



СБОРНИК АННОТАЦИЙ

51 школы-конференции
«Актуальные проблемы механики»
памяти Д.А. Индейцева



51 ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ

19–21 июня 2024

Великий Новгород



При поддержке



УДК 531/534
ББК 22.2
В85

51 школа-конференция «Актуальные проблемы механики» памяти Д.А. Индейцева: сборник аннотаций, 19–21 июня, 2024 г. – 299 с.

МЕХАНИКА ПОЛЗУЧЕСТИ - ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ

Альтенбах Х.

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Германия
holm.altenbach@ovgu.de

Механика ползучести - это направление механики сплошных сред, которое начало развиваться независимо друг от друга в 19 веке [1]. В 1930-х годах были разработаны первые теории, которые позволили анализировать конструкции и описывать поведение материалов [2]. В последние годы появилось множество публикаций, посвященных современному состоянию исследований и численным методам решения. О них сообщается в [3, 4] и других источниках.

Теория вязкоупругости представила подходы, которые можно было связать с реологическими моделями [5]. Поэтому реологические модели и их перспективы будут рассмотрены в заключительной части [6].

Литература

1. Altenbach, H.; Eisenträger, J.; Knape, K.; Naumenko, K. (2023): "Creep Mechanics – Some Historical Remarks and New Trends" In: Creep in Structures VI (ed. by Altenbach, H.; Naumenko, K.), Cham: Springer Nature, Advanced Structured Materials, vol. 194, pp. 57–68. DOI: 10.1007/978-3-031-39070-8_3.
2. Altenbach, H.; Eisenträger, J. (2020): "Introduction to Creep Mechanics" In: Encyclopedia of Continuum Mechanics (ed. by Altenbach, H.; Öchsner, A.), Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1337–1344. DOI: 10.1007/978-3-662-55771-6_155.
3. Naumenko, K.; Altenbach, H. (2016): Modeling High Temperature Materials Behavior for Structural Analysis. Part I: Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models, Cham: Springer, Advanced Structured Materials, vol. 28. ISBN: 978-3-319-31627-7, DOI: 10.1007/978-3-319-31629-1.
4. Naumenko, K.; Altenbach, H. (2020): Modeling High Temperature Materials Behavior for Structural Analysis. Part II: Solution Procedures and Structural Analysis Examples, Cham: Springer, Advanced Structured Materials, vol. 112. ISBN: 978-3-030-20381-1, DOI: 10.1007/978-3-030-20381-8.
5. Altenbach, H. (2023): "Rheological Modeling — Historical Remarks and Actual Trends in Solid Mechanics" In: Advances in Mechanics of Time-Dependent Materials (ed. by Altenbach, H.; Kaplunov, J.; Lu, H.; Nakada, M.), Cham: Springer Nature, Advanced Structured Materials, vol. 188, pp. 1–16. DOI: 10.1007/978-3-031-22401-0_1.
6. Altenbach, H. (2023): "Creep and Damage of Materials at Elevated Temperatures" In: Advanced Theories for Deformation, Damage and Failure in Materials (ed. by Altenbach, H.; Ganczarski, A.), Cham: Springer International Publishing, CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol. 605, pp. 1–62. DOI: 10.1007/978-3-031-04354-3_1.

АКУСТИКА ТЕРРИТОРИИ ВБЛИЗИ ГОРНОГО МАССИВА

**Бабешко В.А.¹, Уафа С.Б.¹, Евдокимова О.В.², Бабешко О.М.¹, Зарецкая М.В.¹,
Евдокимов В.С.¹**

1 - Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

2 - Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

babeshko41@mail.ru

В докладе впервые изучается поведение точного решения контактной задачи для штампа клиновидной в плане формы в анизотропной слоистой среде. Рассмотрена контактная задача о действии клиновидного, с прямым углом в плане, жесткого штампа на поверхность многослойной анизотропной среды. Случай остроугольного в плане штампа некоторым преобразованием сводится к рассматриваемому. Штмп предполагается действующим на многослойную среду без трения. Возможны случаи статического и динамического, воздействия, вызываемого гармоническим колебанием штампа. Основное внимание уделено анализу поведения поверхности анизотропной слоистой среды вне зоны контакта. Построены формулы, описывающие поведение поверхности в дальней зоне и приведен пример вычисления необходимых параметров для их применения. Рассматриваемая смешанная задача приводится к решению двумерного интегрального уравнения Винера-Хопфа, преобразование Фурье ядра которого представляет отношение двух аналитических функций. Изотропный случай наличия отношения двух целых функций в представлении ядра, недавно был исследован универсальным методом моделирования, подсказавшим переход к малоизученному анизотропному случаю. В пространственных контактных задач исследование проводится численными методами,

малоэффективными для анизотропных сред. Точное решение удавалось построить лишь в случаях одномерных, или сводящихся к ним, интегральных уравнений. Разработанный в статье метод позволяет, наряду со статическими задачами, изучать акустические свойства поверхности вне зоны контакта штампа со средой в динамическом случае, которые имеют малоизученную специфику поведения по секторам. Впервые решенное двумерное интегральное уравнение Винера-Хопфа может быть использовано в задачах сейсмологии, при оценке последствий горных землетрясений, распространения радиоволн, при конструировании элементной базы радиоэлектроники, в проблеме прочности в механике, в многочисленных других важных областях.

Постановка задачи

Рассматривается интегральное уравнение Винера-Хопфа, заданное в первом квадранте [1]. Оно имеет вид

$$\mathbf{K}q = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(x-\xi, y-\eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty$$
$$k(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta$$
$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда, региональный проект 24-11-20006.

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Точное решение универсальным методом моделирования контактной задачи в четверти плоскости многослойной среды. // Прикладная математика и механика, 2022, том 86, № 5, С. 628–637.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА, ЦИФРОВОЙ ИНЖИНИРИНГ, ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ЦИФРОВОЙ СЕРТИФИКАЦИИ

Боровков А.И.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Санкт-Петербург, Россия
office.borovkov@compmechlab.com

В докладе рассмотрена роль механики и основанных на ее законах цифровых технологий в реализации фронтальных промышленных задач высокого уровня сложности. Особое внимание уделено основным положениям, составляющим онтологию цифрового инжиниринга (Digital Engineering), которые включают:

В первую очередь, **механику** и ее ключевые области – общую механику, механику деформируемого твердого тела, механику жидкости и газа, экспериментальную механику. Метод конечных элементов (МКЭ), предложенный А.П. Хренниковым (1940 год) и немного позднее развитый выдающимися учеными Р. Курантом, Дж. Аргирисом, О. Зенкевичем, Р. Клафом, Р. Галлагером, а также многими другими учеными, способствовал развитию САЕ-систем (систем инженерного анализа, или систем компьютерного инжиниринга, Computer-Aided Engineering) и заложил основу для развития нового научного направления – вычислительной механики (Computational Mechanics).

- **Математику** и ее направления – прикладную математику, вычислительную математику и численные методы, которые в совокупности с наукой механикой формируют новые вычислительные науки – вычислительную математику, вычислительную физику, вычислительную механику и др. Именно вычислительные науки составляют основу современного инжиниринга, на них основываются в том числе программные системы инженерного анализа, широкое применение которых способствует разработке конкурентоспособных изделий высокотехнологичной промышленности.
- **Инжиниринг** и составляющие его виды инжиниринга, включая компьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering), системный инжиниринг (Systems Engineering), который впоследствии

сконцентрировался на моделировании (модельно-ориентированный системный инжиниринг, MBSE, Model-Based Systems Engineering). Развитие и широкое применение вычислительных технологий и CAE-систем потребовали разработки решений для осуществления интеграции различных инструментов и управления результатами их применения, которые воплотились в SPDM-платформы (Simulation Process and Data Management) для управления данными, процессами и результатами компьютерного моделирования.

- **Цифровую экономику** (Digital Economy), поскольку применение вычислительных технологий в решении современных инженерных задач сопровождается преобразованиями высокотехнологичной промышленности и экономической сферы и способствует переходу к новому типу экономики. Цифровая экономика базируется на генерации больших данных, сверхнизких транзакционных издержках и платформенных решениях, в том числе платформенных решениях для проведения инженерного анализа, вычислительных экспериментов, цифровых испытаний.
- **Технологии «Индустрии 4.0»**, которые совместно с рядом «сквозных» технологий способствовали смене традиционного подхода к компьютерному инжинирингу, когда инженерные расчеты проводились, как правило, на стадии конструкторской проработки изделия, и переходу к современному подходу, согласно которому компьютерный инжиниринг участвует на всех этапах разработки, производства и эксплуатации изделия, что так же способствует ускоренному выводу высокотехнологичной продукции на рынок.

Таким образом, основой всей промышленности, в первую очередь, машиностроения, драйвером развития и становления парадигмы цифрового инжиниринга выступает наука механика. В соответствии с подходом Инжинирингового центра (CompMechLab[®]) СПбПУ и Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» (ПИШ СПбПУ) **цифровой инжиниринг** – это высокотехнологичный мультидисциплинарный наукоемкий подход к созданию объектов (изделий), который предполагает обеспечение жизненного цикла объекта (изделия) с поддержанием непрерывной IT-связи между физическим (реальным) миром и цифровым (виртуальным) пространством, включая разработку на основе многоуровневой матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, программно-технологической платформы (цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench[®]), предназначенных для разработки цифровых двойников изделий на стадиях разработки (ЦД-Р), производства (ЦД-П), эксплуатации (ЦД-Э), проведения цифровых (виртуальных) испытаний на цифровых (виртуальных) стендах и полигонах. Неотъемлемой частью цифрового инжиниринга является **технология разработки цифровых двойников изделий** (Digital Twins).

Кроме того, в рамках доклада представлены ключевые **примеры реализации проектов** Инжиниринговым центром (CompMechLab[®]) СПбПУ в интересах высокотехнологичных отраслей промышленности, в частности, разработка оптимальной конструкции вибросита для очистки бурового раствора от частиц твердой породы при бурении нефтяных и газовых скважин, разработка цифрового двойника тепловыделяющей сборки, разработку экспериментальной технологии создания цифрового двойника морского газотурбинного двигателя и редуктора в составе агрегата и др.

МОДЕЛИ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ТЕЛ С ПОКРЫТИЯМИ

Горячева И.Г.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
goryache@ipmnet.ru

Потери на трение и изнашивание являются одной из главных причин снижения эффективности работы трибосопряжений. Одним из способов управления этими процессами является нанесение на поверхности тел твердосмазочных покрытий, а также консистентных смазок. Моделирование фрикционного взаимодействия упругих тел при наличии на их поверхности покрытий, обладающих различными механическими и геометрическими характеристиками, представляет собой актуальную задачу; ее решение позволит определить значения геометрических и механических характеристик покрытий, обеспечивающих требуемые значения силы трения и контролируемый износ взаимодействующих тел в заданных условиях эксплуатации. К настоящему времени разработаны как аналитические, так и численные методы, позволяющие рассмотреть контакт упругих тел, имеющих на своей поверхности относительно мягкие или твердые покрытиями.

В докладе излагаются методы решения контактных задач о качении и скольжении осесимметричного индентора (1) по упругому телу (2), имеющему на своей поверхности тонкое деформируемое покрытие (3), рис.1. Для описания механического поведения покрытия использованы модели упругого и вязкоупругого материала.

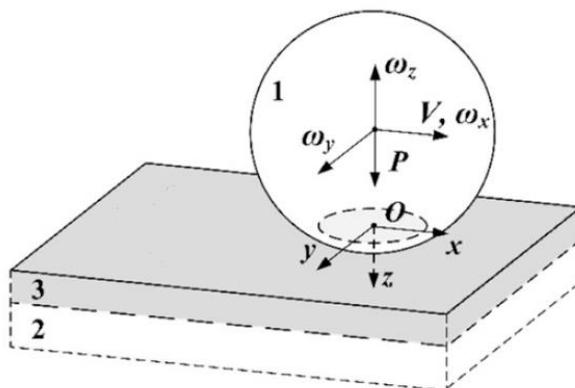


Рис. 1. Схема фрикционного контакта

На основании построенных решений [1,2] контактных задач для различных моделей поверхностного слоя проведен анализ влияния механических свойств слоя на характеристики контактного взаимодействия и силу сопротивления при скольжении и качении упругих тел, имеющих на своей поверхности покрытия.

Анализ контактно-усталостного разрушения взаимодействующих тел в условиях циклических перемещений основан на расчете полей внутренних напряжений и построении функции поврежденности их поверхностных слоев [3]. Изучена зависимость глубины возникновения усталостных трещин от условий контактного взаимодействия и свойств материалов покрытий.

На основании результатов проведенных исследований сформулированы основные требования к выбору материалов покрытий, обеспечивающих уменьшение силы сопротивления и снижение скорости накопления контактно-усталостных повреждений в подповерхностных слоях материалов при заданных условиях фрикционного взаимодействия.

Работа выполнена в рамках исследования по гранту РФФИ № 22-49-02010.

Литература

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.Наука. 2001
2. Goryacheva I and Miftakhova A. Modelling of the viscoelastic layer effect in rolling contact. *Wear* 2019; V.430-431, p.256–262.
3. Мещерякова А.Р., Горячева И.Г. Напряженное состояние упругих тел в условиях качения с проскальзыванием при наличии промежуточного слоя // *Физическая мезомеханика*. 2020. Т. 23, № 6

ПОСТРОЕНИЕ НЕСИНГУЛЯРНОГО РЕШЕНИЯ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЕВКЛИДОВОЙ МОДЕЛИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

Гузов М.А., Черныш Е.В.

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия
guzev@iam.dvo.ru

В механике сплошной среды для задач теории упругости хорошо известен факт существования сингулярных решений для полей напряжений [1]. Начиная с пятидесятых годов XX века в центре внимания теоретических исследований стояла проблема конструирования моделей для описания микрохарактеристик материалов, чтобы исключить сингулярность в решениях и получить физически реальный результат. Способы получения регулярных решений сингулярных задач представлены у отечественных и зарубежных исследователей (см. [3-5] и ссылки). Следует отметить, что анализ физических моделей дефектов кристаллической структуры материалов привел исследователей к выводу о необходимости использовать при их описании неевклидовы геометрические объекты, запрещенные в классической теории упругости. В данной работе мы намечаем путь построения несингулярной модели дефектов как неевклидовой модели сплошной

среды.

Основная идея состоит в следующем. В [5] было показано, что структура поля для тела складывается из поля напряжений, созданного дефектами, и компенсирующего их поверхностную неуравновешенность поля упругих напряжений. Совместное действие полей обеспечивает выполнение уравнения равновесия Коши и интегральных условий равновесия. Однако поля не определяется однозначно. В частности, для них существует класс трансляционных преобразований с произвольной функцией, которые не меняют полного поля внутренних напряжений. Выбор трансляционной функции фиксирует калибровку при построении. В частности, если поля напряжений имеют сингулярности, то трансляционную функцию можно выбрать так, чтобы поля не проявляли сингулярного поведения.

Предложенный подход был реализован для построения распределения несингулярных осесимметричных полей напряжений для плоско-деформированного состояния материала [6] и несингулярного распределения равновесного поля напряжений сферически симметричного состояния сплошной среды [7]. В данной работе выполнено обобщение при наличии угловой зависимости у полей напряжений для плоско-деформированного состояния материала.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института прикладной математики ДВО РАН (тема № 075-00459-24-00).

Литература

1. Sinclair G. // On ensuring structural integrity for configurations with stress singularities. A review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **39**:5 2016. 523–535.
2. В.В. Васильев, С.А. Лурье // Дифференциальные уравнения и проблема сингулярности решений в прикладной механике и математике. *ПМТФ*, **64**:1 2023. 114–127.
3. Po G., Lazar M., Admal N. C., & Ghoniem N. // A non-singular theory of dislocations in anisotropic crystals. *International Journal of Plasticity*, 103 2018. 1–22.
4. Parisi K., Konstantopoulos I., & Aifantis E. C. // Nonsingular Solutions of GradEla Models for Dislocations: An Extension to Fractional GradEla. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*. 2018
5. Мясников В.П., Гузев М.А. //Геометрическая модель внутренних самоуравновешенных напряжений в твердых телах. *Доклады РАН*. **380**:5 2001. 627-629.
6. Guzev M.A., Riabokon E.P. //Construction of Nonsingular Stress Fields for Non-Euclidean Model in Planar Deformations. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. **14**:6 2021. 815–821.
7. М.А. Гузев, В. Лю, Ч. Ци, Е.П. Рябоконе. //Компенсирующая роль самоуравновешенных полей напряжений при построении несингулярных решений с использованием неевклидовой модели сплошной среды для несжимаемого шара. *ПМТФ*. **62**:5 2021. 38-44.

МЕХАНИКА КАК ОСНОВА МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОГО ЦИФРОВОГО ИНЖИНИРИНГА

Хасанов М.М.

Директор по науке ПАО «Газпром нефть», Россия
khasanovmm22@gmail.com

В настоящее время происходит переход от Эпохи машин (методической основой которой были редукционизм, специализация и аналитический способ мышления) к Эпохе Систем, базирующейся на синтетическом методе мышления, междисциплинарности и Системном инжиниринге.

Системный инжиниринг зародился в начале 20 века, когда в производство пришли ученые и начали создаваться исследовательские центры при цехах и заводах, выпускающих наукоемкую продукцию (примерами таких образований являются ЦАГИ в СССР, General electric и Bell laboratories в Америке). Так, в Bell Laboratories Системный инжиниринг развивался в качестве ключевой составляющей так называемой Технологии организованного творчества (Organised Creative Technology) – целостного подхода к созданию «бесшовного» успешного пути от НИР до конечного высокотехнологичного продукта. Достаточно полное исследование сложных систем старыми добрыми аналитическими методами невозможно, поэтому современный Системный инжиниринг по необходимости является Цифровым.

Краеугольным камнем Системного инжиниринга является мультидисциплинарность, под которой нельзя понимать простое объединение специалистов различного профиля, когда каждую проблему исследует своя дисциплина. Истинно мультидисциплинарный подход подразумевает:

- Наличие полной иерархии интегрированных математических моделей управляемых систем.
- Широкое внедрение методологий системного подхода.
- Организацию системы эффективного обучения всем необходимым дисциплинам.

Опыт практической работы в нефтяной отрасли показал, что при создании цифровых двойников производственных объектов наиболее востребованными и ценными являются механика как наука и сами механики как инженеры.

ГИБРИДНЫЕ ПОДХОДЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ: ОПЫТ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ГАЗПРОМ НЕФТЬ

Юдин Е.В.¹, Марков Н.С.²

1 - ООО “Газпромнефть-НТЦ”, Санкт-Петербург, Россия

2 - ООО “Недра”, Санкт-Петербург, Россия

yudin.ev@gazprom-neft.ru

Развитие современных подходов к решению инженерных задач тесно связано с инновациями в сфере искусственного интеллекта (ИИ). Применение методов машинного обучения позволило создать подходы, способные быстро решать технические задачи с довольно высокой точностью. Несмотря на широкое применение ИИ в современной инженерии ряд важных технических вопросов остается не решенным. В частности, как научить ИИ понимать суть задачи и не выходить за рамки базовых принципов, лежащих в основе моделируемой системы.

Данная работа направлена на развитие подходов ИИ к решению практических инженерных задач по созданию цифровых двойников. На примере моделирования работы скважин и пластовых систем продемонстрировано корректное применение ИИ, ограничивающее влияние ИИ моделей на расчеты. Для регуляризации ИИ применен подход на основе гибридных моделей, непосредственно связывающий дифференциальные уравнения с нейронными сетями в процессе обучения. Показано, что такой подход позволяет заметно повысить точность моделирования за счет баланса между ограничениями математических моделей и реальными данными.

Представленные в работе примеры доказывают необходимость развития ИИ для решения инженерных задач. Необходимость ограничения ИИ при сохранении гибкости приводит к задачам создания новых гибридных моделей ИИ, основанных на физически-корректных математических моделях. Дальнейшее направление данной работы подразумевает как создание новых архитектур ИИ, так и создания единого решателя дифференциальных уравнений на основе технологий гибридного моделирования.

ВОЛНЫ В БАЛКЕ НА НЕЛИНЕЙНОМ ВЯЗКО-УПРУГОМ ОСНОВАНИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ СИЛЫ

Абрамян А.К., Вакуленко С.А.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

andabr55@gmail.com

Представлено аналитическое решение задачи о волнах, возникающих в балке Бернулли-Эйлера, лежащей на вязкоупругом нелинейном основании при действии движущейся сосредоточенной нагрузки. Основное уравнение, описывающее динамику балки имеет вид:

$$m_0 u_{tt} + Du_{xxxx} + K(u + \alpha u^3) + \epsilon f(u_t, u) = F(x - Vt),$$

Где

$$\begin{aligned} f(u_t, u) &= \text{sign}(u_t)u^2, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad u_t(x, 0) = u_1(x), \\ u_x(x, t), u(x, t) &\rightarrow 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad t > 0 \end{aligned}$$

Основное внимание уделено локализованному решению при скоростях меньших критической и поведению рассматриваемой системы в районе критической скорости. Используя метод возмущений и метод Ритца удалось исследовать влияние нелинейности упругого основания и линейного, а также нелинейного демпфирования (внутреннего трения) на поведение решения и его устойчивость. Нелинейность приводит к

ограниченности, конечности, перемещения при скорости близкой к критической. Максимальное перемещение при этом тем меньше, чем больше коэффициент при нелинейности. Также нелинейность приводит к уменьшению критической скорости, при которой наблюдается скоростной резонанс и влияет на форму локализованного решения. Для района вблизи критической скорости получено асимптотическое решение, которое позволяет найти амплитуду перемещения с учетом нелинейности, при этом показано, что внутреннее трение мало влияет на поведение и форму решения. Внутреннее трение приводит, как и ожидалось к демпфированию гармонических волн. Получены точные асимптотические выражения для смещения частоты и амплитуды таких волн. При скоростях выше критической линейное и нелинейное трение приводит к неустойчивости решения. При этом, нелинейное трение влияет слабее на устойчивость, чем линейное. Затухание, вызванное нелинейным трением, зависит от волнового вектора. Введено понятие эффективного коэффициента упругого основания для случая учета нелинейности коэффициента упругого основания. Нелинейная упругость увеличивает эффективный коэффициент и, следовательно, увеличивает частоту отсечки системы. На рис.1 приведены амплитуды перемещений балки в зависимости от скорости движения нагрузки при линейном (красная линия) и нелинейном упругом основании.

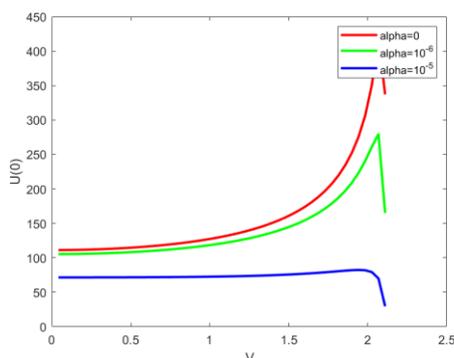


Рис. 1. Зависимость максимального перемещения балки от скорости сосредоточенной нагрузки

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПОЛОГИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Авдониюшкин Д.В., Матвеева А.И., Новокшенов А.Д.

*Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
avdonyushkin.dmitrij@mail.ru*

В данной работе представлены две нейронные сети, разработанные для прогнозирования углов ориентации в элементах и определения топологии композитных материалов на основе податливости и углов ориентации.

Первая из представленных нейронных сетей предназначена для прогнозирования углов ориентации компонентов напряжений в элементах. На вход данной сети поступают компоненты тензора напряжений, а на выходе формируются предсказания углов ориентации. Особенностью данного подхода является представление выхода нейронной сети в виде синуса угла и синуса двойного угла ориентации, что позволяет учесть равнозначность направлений, характеризуемых разностью углов в 90 градусов, и повышает точность прогнозирования. Вторая нейронная сеть использует в качестве входных данных податливость в элементах и углы ориентации с целью последующего определения топологии.

В качестве примера рассматривается ортотропная пластина 30x60 элементов, углы ориентации могут независимо изменяться в каждом элементе. Левый край пластины зафиксирован, а положение силы варьируется для формирования обучающей выборки. Данная пластина оптимизируется, в постановке минимальной податливости, с помощью объединенного алгоритма, включающего в себя метод движущихся асимптот для оптимизации топологии и эвристический алгоритм для изменения углов ориентации. Проведенное сравнение на валидационной выборке показывает точность описанных выше нейронных сетей, что означает потенциальную возможность использования нейронных сетей в этой области.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Айзикович С.М., Панфилов И.А.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
saizikovich@gmail.com

Одним из распространённых методов для контроля и определения упругих свойств материалов является индентирование. В настоящей работе анализируется особенность использования решения, полученного с учётом полного пластического нелинейного поведения материала.

Рассматриваются задачи о внедрении сферического и конического штампов в упругопластическое полупространство в статической осесимметричной постановке. Численно реализуется модель пластической деформации. Для верификации численного решения задач о внедрении сферического и конического индентора в упругое однородное полупространство проведено сравнение численно построенных решений с известными аналитическими решениями. Исследуются вопросы сходимости и настройки численных методов, влияния пластичности и применимости аналитических решений. Численно задачи решаются методом конечных элементов в программном комплексе Ansys. Для верификации численных расчетов дополнительно проведены расчеты о внедрении жестких штампов в упругое пространство из алюминия. Контактные задачи относятся к нелинейным задачам из-за изменяющегося статуса контакта и матрицы жесткости и требуют особого внимания к точности и сходимости.

В отличие от аналитических теорий, где учитывается только контактная нелинейность при гипотезе малых деформаций, численно можно реализовать все три типа нелинейности: контактную, геометрическую (большие деформации) и физическую (пластику).

Проведенное исследование показало, что для упругой задачи численный метод дает практически полное совпадение с аналитическими результатами. Погрешность возростала с увеличением деформации и для максимальных значений составила около 2% для вертикальной силы.

Стоит отметить, что данные нагрузки для упругой задачи существенно превышают допустимые по пределу текучести и были рассмотрены как модельные задачи для сравнения моделей. В пределах упругих деформаций погрешность численных результатов составила менее 0.1%.

Зона контакта для упругой модели и упругопластической модели существенно отличается. При пластичности материал «выдавливается» из-под инденторов и существенно увеличивает зону контакта. Для сферического индентора для максимального смещения отличие по радиусу контакта составило около 30%, для конического – 45%.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-19-00732.

РЕЖИМЫ ВЫТЕСНЕНИЯ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПЛАСТА ПРИ ЗАКАЧКЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ СОВЕРШЕННУЮ СКВАЖИНУ

Андреева А.И., Афанасьев А.А.

НИИ механики МГУ, Москва, Россия
aandreeva@imec.msu.ru

Закачка воды или газа в геологический пласт через нагнетательные скважины сопровождается различными эффектами, такими как гравитационное расслоение вытесняющей и вытесняемой жидкостей, капиллярной пропиткой пористой среды и сложным процессом массообмена между пластом и скважинами. Такие течения нельзя описать с помощью простых линейных моделей. Процесс вытеснения изучался многими исследователями ранее, однако в большинстве случаев используются инженерные подходы при изучении конкретных пластов. В данной работе предлагается более системный подход к исследованию вытеснения с помощью определения безразмерных критериев подобия. В рамках профильной двухмерной задачи фильтрации исследуются режимы вытеснения жидкости из анизотропного пласта, вскрытого системой вертикальных скважин. В настоящей работе установлено, что в общем случае процесс вытеснения характеризуется пятью

критериями подобия, один из которых, Λ , определяет характеристики потока жидкости из скважины в пласт. Большим значениям Λ соответствует более эффективное вытеснение жидкости (Рис.1). В некоторых асимптотических режимах вытеснения число определяющих параметров подобия может снижаться. Поэтому была построена диаграмма режимов вытеснения, в которой ограничены области влияния критериев подобия и обнаруженные асимптотические случаи. В рамках данной работы исследовано влияние критериев подобия на эффективность вытеснения: коэффициенты извлечения пластовой жидкости и охвата пласта вытеснением. Результаты настоящего исследования могут быть полезны для оценки эффективности различных методов разработки месторождений в нефтегазовой отрасли.

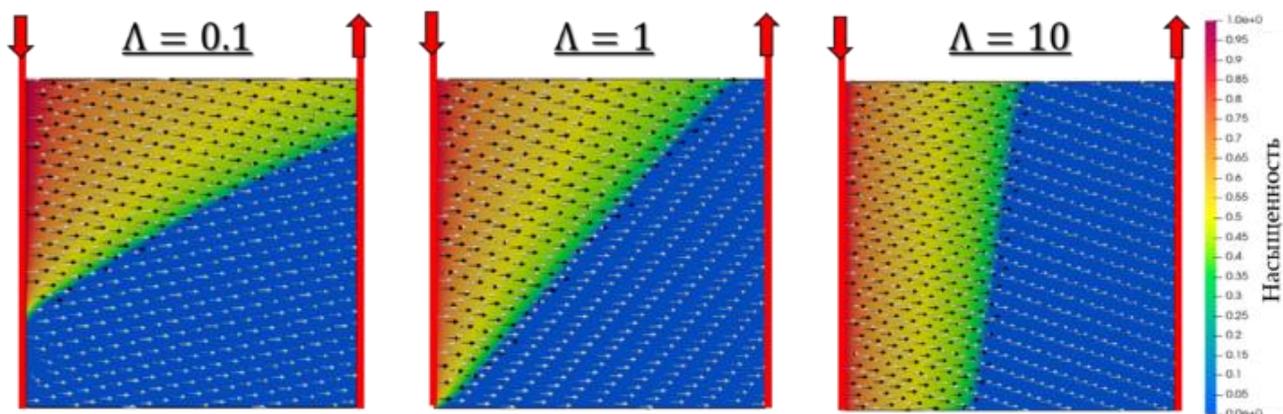


Рис. 1. – Режимы вытеснения при различных значениях критериях подобия Λ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-71-10051.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Антонова М.Н.¹, Петров Ю.В.^{1,2}

1 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

maliya.antonova@gmail.com

Представлена модель, основанная на комбинации модифицированной релаксационной модели пластичности, базирующейся на учете инкубационных характеристик необратимого деформирования, с энергетическим критерием разрушения. Расчеты проведены на примере магниевых сплавов Mg–0,3Ca (мас.%) и Mg–1,0Al–1,0Ca–0,4Mn (мас.%) с различными размерами зерен, оказывающими влияния на параметры модели. Предложенная модификация релаксационной теории пластичности позволяет предсказывать нестабильное поведение деформационных диаграмм различных материалов, в том числе появление и исчезновение зуба текучести при изменении режима деформирования, а также внутренней структуры материала. В частности, изменение формы диаграммы может быть вызвано не только влиянием скорости деформации и температуры, но и изменением размера зерна материала. Показано, что для исследуемых сплавов для больших зерен не наблюдается явление зуба текучести, в то время как с уменьшением размера зерна разница между верхним и нижним пределом текучести увеличивается. Это обстоятельство связано с изменением инкубационного времени, одного из параметров модифицированной релаксационной модели, зависящего от дислокационной динамики в структуре материала. Также представлена связь между инкубационным временем и размером зерна для указанных магниевых сплавов. Наличие такой связи позволяет не только спрогнозировать поведение рассматриваемого материала с разными размерами зерен при различных скоростях деформации даже в случае немонотонности его кривой деформирования, но и определить, как строение материала повлияет на его несущую способность в различных режимах эксплуатации. Для определения момента разрушения и критического удлинения образцов модель дополняется энергетическим критерием разрушения, связанным с критической величиной энергии деформирования. Результаты работы развитой комбинированной модели

представлены на рис. 1.

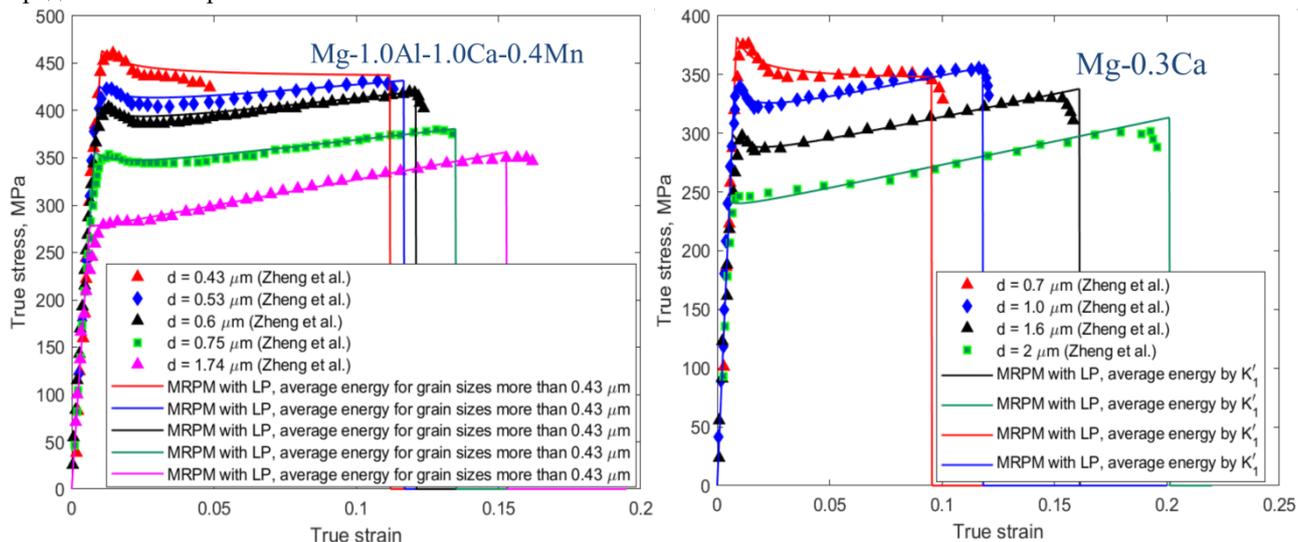


Рис. 1. Рассчитанная и экспериментально измеренная деформация магниевых сплавов вплоть до разрушения

Таким образом, показано, что на основе предложенного подхода можно не только прогнозировать процесс деформации материала, но и определять момент, до которого образец будет необратимо деформироваться без разрушения.

Работа выполнена при поддержке мегагранта № 075-15-2022-1114.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОРОНАРНОГО СТЕНТА

Ровой Э., Антонова О.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия
antonova_ov@spbstu.ru

В настоящее время при коронарном стентировании широкое распространение получили коронарные стенты из металлических биосовместимых сплавов. Коронарное стентирование является одной из самых перспективных и эффективных процедур в области лечения ишемических болезней сердца. Поэтому крайне важно при помощи подходов математического моделирования с использованием виртуального эксперимента выявить характерные особенности и закономерности данной высокотехнологичной процедуры. В данном исследовании основное внимание уделено моделированию процесса установки металлического коронарного стента в сосуд, пораженный атеросклерозом. Основные элементы математической модели, аналогично процессу установки коронарных стентов из полимерных материалов [1]: фрагмент сосуда, атеросклеротическая бляшка, непосредственно коронарный стент сетчатой структуры и баллон, применяемый для установки стента. Кровеносный сосуд моделируется цилиндрической оболочкой. Применяется наиболее корректно описывающая многослойную структуру сосуда анизотропная гиперупругая модель материала Holzapfel-Gasser-Ogden [2]. Атеросклеротическая бляшка моделируется материалом обладающим гиперупругими свойствами. Для моделирования стента из сплава кобальта и хрома используется упругопластическая модель материала. Раскрытие стента, находящегося в сосуде проводится в два этапа: на первом шаге происходит раскрытие стента номинальным давлением, второй шаг – раскрытие стента с использованием баллона с другими характеристиками. В результате исследования были проанализированы основные этапы установки с применением подходов численного моделирования, получены некоторые оптимальные параметры, которые могут быть использованы в ходе планирования медицинского вмешательства.

Литература

1. Ровой, Э. Ю. Математическое моделирование поведения биodeградируемых коронарных стентов из полимерных материалов /Э. Ю. Ровой, О. В. Антонова // Российский журнал биомеханики. – 2024. – Т. 28, № 1. – С. 23–39.

DOI 10.15593/RZhBiomeh/2024.1.02

2. Holzapfel, G.A., Gasser, T.C. & Ogden, R.W. A New Constitutive Framework for Arterial Wall Mechanics and a Comparative Study of Material Models. Journal of Elasticity 61, 1–48 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1010835316564>

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВИБРАЦИОННОГО ГИРОСКОПА

Антуфьев Д.В., Лукин А.В., Попов И.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия
antufiev.dv@edu.spbstu.ru

В данной работе было проведено исследование эффекта параметрического усиления кольцевого резонатора, возникающего под действием напряжения на окружающих резонатор электродах. Параметрическое усиление – эффект, возникающий в динамических системах с периодическим параметрическим и внешним воздействиями, который заключается в изменении амплитуды в зависимости от относительной фазы параметрического и внешнего воздействия [1].

Было получено уравнение движения для безразмерной модальной координаты ведущей собственной формы колебаний кольцевого резонатора q для линейно-упругого материала с учетом геометрической нелинейности. Уравнение движения имеет вид

$$\ddot{q}(1 + \mu q^2) + 2\Gamma\dot{q} + q(1 + \dot{q}^2\mu - F_{f1}\cos(\Omega\tau + \varphi) - F_{p1}\cos(2\Omega\tau)) - q^2F_{f2}\cos(\Omega\tau + \varphi) + q^3(\gamma - F_{f3}\cos(\Omega\tau + \varphi) - F_{p3}\cos(2\Omega\tau)) = F\cos(\Omega\tau + \varphi).$$

С помощью метода многих масштабов [2] были получены уравнения для медленных переменных B_r и B_i – вещественной и мнимой составляющих комплексной амплитуды колебаний. Уравнения для медленных переменных имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{B}_r &= \frac{F\sin(\varphi)}{4} + \frac{3F_{f2}B_i^2\sin(\varphi)}{4} + \frac{F_{f2}B_iB_r\cos(\varphi)}{2} + \frac{F_{f2}B_r^2\sin(\varphi)}{4} - \frac{F_{p1}B_i}{4} - F_{p3}B_i^3 - \Gamma B_r - \frac{3\gamma B_i^3}{2} - \frac{3\gamma B_iB_r^2}{2} + \mu B_i^3 \\ &\quad + \mu B_iB_r^2 + \sigma\epsilon B_i, \\ \dot{B}_i &= -\frac{F\cos(\varphi)}{4} - \frac{F_{f2}B_i^2\cos(\varphi)}{4} - \frac{F_{f2}B_iB_r\sin(\varphi)}{2} - \frac{3F_{f2}B_r^2\cos(\varphi)}{4} - \frac{F_{p1}B_r}{4} - F_{p3}B_r^3 - \Gamma B_i + \frac{3\gamma B_i^2B_r}{2} + \frac{3\gamma B_r^3}{2} \\ &\quad - \mu B_i^2B_r - \mu B_r^3 - \sigma\epsilon B_r. \end{aligned}$$

Полученные уравнения использовались для анализа динамики системы. Были получены значения параметров системы, при которых возникает параметрическое усиление, зависимость усиления от фазы φ (рис. 2(а)), зависимость усиления от напряжения на электродах (рис. 2(б)).

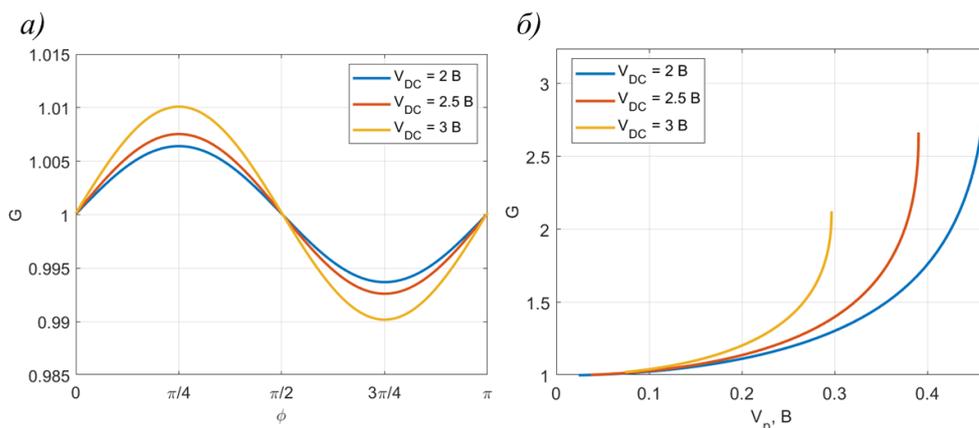


Рис. 1. а) Зависимость усиления от фазы; б) Зависимость усиления от напряжения.

Литература

1. Rugar D., Grütter P. Mechanical parametric amplification and thermomechanical noise squeezing // Physical Review Letters. – 1991 – Vol. 6 (67). – С. 699–702.
2. Nayfeh A. H., Mook D. T. // Nonlinear oscillations. J. Wiley & sons. 1995. 720 с.

ПОЛЗУЧЕСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ СТАРЕНИЯ ПО РАЗЛИЧНЫМ ПРОГРАММАМ

Арутюнян А.Р.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
a.arutyunyan@spbu.ru

В последние годы все большее распространение и развитие получают различные полимерные композиционные материалы, в частности, углепластики. Они внедряются практически во все сферы промышленности и строительства, в частности, в авиастроении и ракетостроении. Преимущества этих материалов: высокая прочность и жесткость, легкость, высокая усталостная прочность, химическая инертность и др. В связи с тем, что данные материалы используются в ответственных областях инженерной практики, это делает их длительные характеристики старения первостепенно важными. В то же время физико-химические характеристики этих материалов после длительной эксплуатации изменяются, что в значительной степени обусловлено процессом старения [1-3]. В связи с этим, необходимы исследования процессов старения этих материалов.

В работе исследовались образцы однонаправленного углепластика марки T107/ОН190/P132436 длиной 250 мм, рабочей длиной 140 мм, шириной 15 мм и толщиной 0,8-1 мм. Для изучения влияния климатического и деформационного старения на ползучесть использовались следующие экспериментальные программы. Программа 1. Выдержка во льду при температуре -16°C в течение 2 дней, выдержка в дистиллированной воде в течение 3 недель; выдержка в лабораторных условиях в течение 5 месяцев; эксперименты на ползучесть при $\sigma = 240$ МПа (0,42 от предела прочности при растяжении) в течение 8 часов; выдержка в дистиллированной воде в течение 3 недель, выдержка во льду при температуре -16°C в течение 3 недель; выдержка в лабораторных условиях в течение 4 месяцев; эксперименты на ползучесть при $\sigma = 240$ МПа в течение 8 часов; выдержка в лабораторных условиях в течение 7 месяцев; циклическое нагружение с постоянной амплитудой при напряжении $\sigma = 276,35$ МПа (приблизительно 0,5 от предела прочности при растяжении), $R = 0$ и частоте нагружения 20 Гц до 15 000 000 циклов; выдержка в лабораторных условиях в течение 4 месяцев; эксперименты на ползучесть при $\sigma = 240$ МПа в течение 8 часов; выдержка в лабораторных условиях в течение 7 месяцев; выдержка в дистиллированной воде в течение 5 дней, выдержка во льду при температуре -16°C в течение 2 месяцев, выдержка в дистиллированной воде в течение 7 дней; выдержка в лабораторных условиях в течение 4 месяцев; эксперименты на ползучесть при $\sigma = 240$ МПа в течение 8 часов. Программа 2. Выдержка во льду при температуре -16°C в течение 2 дней, выдержка в дистиллированной воде в течение 3 недель; выдержка в лабораторных условиях в течение 7 месяцев; выдержка в дистиллированной воде в течение 3 недель, выдержка во льду при температуре -16°C в течение 3 недель; выдержка в лабораторных условиях в течение 11 месяцев; выдержка в дистиллированной воде в течение 5 дней, выдержка во льду при температуре -16°C в течение 2 месяцев, выдержка в дистиллированной воде в течение 7 дней; выдержка в лабораторных условиях в течение 2 месяцев; эксперименты на ползучесть при $\sigma = 240$ МПа в течение 8 часов. Программа 3. Старение при температуре 120°C в течение 2 часов, выдержка в дистиллированной воде в течение 3 недель; выдержка в лабораторных условиях в течение 7 месяцев; выдержка в дистиллированной воде в течение 3 недель, старение при температуре 120°C в течение 2 часов; выдержка в лабораторных условиях в течение 23 месяцев; эксперименты на ползучесть при $\sigma = 240$ МПа в течение 8 часов.

Для описания полученных экспериментальных кривых ползучести образцов углепластика используется модифицированное уравнение Максвелла, записанное в шкале обобщенного времени. Параметр эффективного времени в общем случае способен описать взаимосвязанные деформационные и физико-химические процессы и определить их развитие в шкале деформационного и химического времени. Построены теоретические кривые ползучести. Наблюдается хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными кривыми ползучести.

Литература

1. L.C.E. Struik // Physical aging in amorphous polymers and other materials. 1978. 229 p.
2. Nadai // Theory of flow and fracture of solids. 1963. 321 p.
3. Р.А. Арутюнян // Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. 2004. 252 с.

ОБЪЕМНЫЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТЕРМОУПРУГИЕ ВОЛНЫ В ОДНОРОДНОМ ИЗОТРОПНОМ УПРУГОМ СЛОЕ

Астапов Я.К., Лукин А.В., Попов И.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия*
astapov.yaroslav.00@mail.ru

Работа современных акустоэлектронных устройств опирается на процесс генерации поверхностных и объемных упругих волн в тонких пластинах [1-2]. Одним из ключевых аспектов при проектировании архитектур микромеханических тонкопленочных резонаторов на акустических волнах является обеспечение максимальной добротности резонансных свойств на рабочих формах колебаний, физически достижимая граница которой определяется механизмом термоупругого рассеяния энергии. Отдельный класс исследований составляют вопросы создания оптоакустических резонаторов на основе применения лазерного термооптического способа генерации механических колебаний [3]. Из сказанного следует, что при формулировании математической модели необходимо разрешать связанную задачу термоупругости [4]. В известных классических работах аналитически строгое решение задачи в форме трансцендентных дисперсионных уравнений разрешалось численно с применением ряда асимптотических допущений, что приводило лишь к приближенному решению [5].

Целью данной работы является получение точного решения задачи о стационарных термоупругих волнах в однородном изотропном упругом слое с применением аппарата символьного программирования и теории продолжения решения нелинейных уравнений. Проводится исследование фактора термоупругого рассеяния механической энергии при вариации физических и геометрических параметров. Выполняется сравнение полученных результатов с известными коротковолновыми и длинноволновыми асимптотиками стационарных термоупругих волн, в том числе, соответствующих балочным моделям Эйлера-Бернулли и Тимошенко.

Работа выполнена при поддержке гранта Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4577.2022.1.1.

Литература

1. 'Technical Guide to 6 GHz for MSPs, ISPs and SPs'//tanaza – Электронный ресурс: <https://www.tanaza.com/blog/technical-guide-to-6ghz-wifi-frequency-band/>
2. Ruochen Lu, Songbin Gong, 'RF acoustic microsystems based on suspended lithium niobate thin films: advances and outlook' J. Micromech. Microeng. 31 114001, 2021
3. X.L. Deán-Ben, D. Razansky 'Optoacoustic signal excitation with a tone-burst of short pulses' Photoacoustics, V.11, 2018
4. R. Lifshitz, M. Roukes, 'Thermoelastic damping in micro- and nanomechanical systems' Phys. Rev. B 61(8), 5600-5609. Physical Review B. 61. 5600-5609. 10.1103/PhysRevB.61.5600, 2000
5. Новацкий В. 'Теория Колебаний', изд. «МИР», 1975

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Асфандияров Ш.А., Гребенников А.С., Томилина Т.М.

ИМАШ РАН, Москва, Россия
asfandiyarov@imash.ac.ru

Расчет механической прочности является важным этапом разработки научных приборов на борту космических аппаратов, подвергающихся высоким эксплуатационным механическим нагрузкам. Предварительный расчет прочности позволяет выявить возможные слабые места предложенной конструкции, обеспечивающей ее заданный функционал, которые могут возникнуть на стадии натурных испытаний на заданные нагрузки в составе космического аппарата особенно если она является составной. Таким примером может служить конструкция Грунтозаборного устройства (ГЗУ) (рис. 1). Расчет многоэлементной конструкции можно провести на основе упрощенной модели аналитически путем разбиения конструкции на отдельные элементы простейшей геометрии (стержни, балки, пластины и т.д.) и проведения независимых расчетов для

каждого элемента. Однако такой подход не позволяет рассчитывать элементы, имеющие сложную форму, а также не учитывает взаимодействие элементов между собой. С другой стороны, численный анализ на основе Метода конечных элементов (МКЭ) позволяет проводить расчет многоэлементной конструкции как единого целого, однако подробная МКЭ-модель, которая включает все конструктивные элементы в том числе мелкие детали, болтовые и шарнирные соединения и т.д. требует больших вычислительных мощностей и даже может приводить к некорректным результатам. В работе представлен компромиссный подход с понижением порядка модели для расчета многоэлементной конструкции, который по степени детализации лежит между аналитическим расчетом и детальным расчетом МКЭ с использованием коммерческих пакетов программ, при этом не требует значительных вычислительных и временных ресурсов. Рассмотрены методы упрощения геометрии исследуемой конструкции на примере конструкции бурового устройства, которое устанавливается на космическом аппарате, а также оптимизации вычислительного алгоритма.

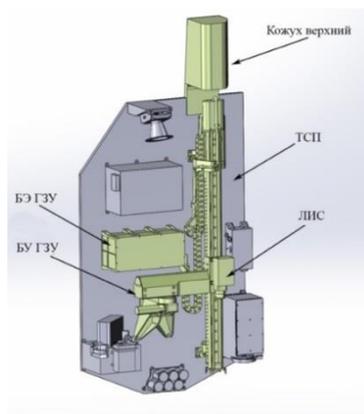


Рис. 1. Общий вид ГЗУ и его составных частей.

Предложенные замены элементов конструкции на те или иные упрощенные элементы были проверены экспериментально на вибрационном стенде. Были проведены испытания элементарных конструкций, составляющих упрощенную геометрию исследованной конструкции. Результаты сравнены с более сложными типами элементов конструкции: болтовые, шарнирные соединения. Также произведено сравнение с результатами расчета.

Представлены результаты анализа механической прочности по заданным требованиям: продемонстрированы слабые места конструкции, определены низшие собственные частоты и поля напряжений в критически важных элементах. Такой подход позволил произвести оптимизацию конструкции по массе и критериям жесткости на стадии проектирования.

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ЭРОЗИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ZrN

**Атрошенко С.А.^{1,2}, Валиев Р.З.³, Казаринов Н.А.², Морозов Н.Ф.², Валиев Р.Р.³,
Савина Я.Н.³, Антонова М.Н.², Евстифеев А.Д.²**

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

3 - Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

satroshe@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному изучению износа и разрушения сплава ВТ6 с защитным покрытием ZrN в исходном крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях при высокоскоростной динамической эрозии твердыми частицами корунда со средним размером 109 и 30 μm в воздушном потоке со скоростями от 50 до 250 m/s и временем экспозиции – 30 s, 1 и 5 min. По результатам проведенных экспериментов определяли скорость эрозионного износа, замеряли долю вязкого разрушения, а также глубину разрушенного слоя, изменение микроструктуры сплава вблизи эрозионной поверхности с покрытием и без него. Показано, что при столь высокоскоростном эрозионном воздействии закономерности

износа и разрушения сплава тесно связаны со временем экспозиции, скоростью эрозии, размером порошка и структурой подложки.

Объектом исследования в настоящей работе является двухфазный титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V), широко используемый в авиадвигателестроении для изготовления ответственных деталей, в частности лопаток 1-3 ступеней компрессора низкого давления газотурбинного двигателя. В сплаве ВТ6 была сформирована ультрамелкозернистая структура методом равноканального углового прессования по ранее разработанному режиму. Заготовки диаметром 20 мм и длиной 100 мм подвергали предварительной термообработке по режиму: закалка при $T = 960\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа с последующим отпуском при $T = 675\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 4 часов; затем деформировали методом равноканального углового прессования (РКУП) на оснастке с углом пересечения каналов 120° , по маршруту Вс при температуре $T=650^{\circ}\text{C}$ в 4 прохода. На поверхность образцов с исходной крупнозернистой (КЗ) и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой катодно-дуговым методом было осаждено покрытие ZrN, которое является популярным для титановых сплавов.

Для эрозионных испытаний в равных условиях образцы титанового сплава ВТ6 в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии с покрытием ZrN и без покрытия были изготовлены в виде полукруга диаметром 15 mm и установлены в одну державку так, чтобы они подвергались воздействию одного и того же потока частиц, тем самым нивелируя возможную разницу в определении скорости частиц твердой фракции в потоке и их размеров. Эксперименты по эрозионному износу выполнялись на эрозионной установке аэродинамического типа, позволяющей ускорять двухфазный поток (воздух с твердой фазой – абразивными частицами) до необходимых скоростей, варьируя давление в системе. Установка состоит из компрессорной камеры, дозатора твердой фракции, разгонного участка трубы длиной 1.6 м и диаметром 50 мм, рабочей камеры и пневматического привода введения в камеру образцов. Воздух с заданным давлением по трубопроводу поступает на разгонный участок, в начале которого установлен дозатор. Твердые частицы, подаваемые с фиксированной скоростью, смешиваются с потоком воздуха и разгоняются на разгонном участке. Сформированная таким образом струя «газ-твердые частицы» на выходе из сопла ударяется о поверхность образцов со скоростью, определяемой скоростью потока, размером и плотностью частиц. Основными параметрами эрозионной установки, определяющими режим ударного воздействия на образец, является скорость и масса твердых частиц. Таким образом, используемая экспериментальная установка позволяет регулировать скорость абразивных частиц, их расход и время экспозиции образцов. Параметры высокоскоростной эрозии – скорость воздушного потока, размеры частиц и угол атаки 90° были заметно выше этих параметров при стандартных испытаниях лопаток ГТД, где скорость потока обычно не превышает 60 м/с, а угол атаки меньше 60° . Исследование поверхностей эрозионного разрушения образцов титанового сплава ВТ6 после разных видов обработки и эрозии осуществлялось на микроскопе Axio-ObserverZ1-M в темном поле и в контрасте C_DIC.

Работа выполнена в рамках проекта «Динамика и экстремальные характеристики перспективных наноструктурированных материалов» (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-1114) и при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00091.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФИНОВЫХ СТРУКТУР ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Ахунова А.Х., Баймова Ю.А.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия
akhunova.a.a@gmail.com

Графин, новый двумерный материал, состоящий из одного слоя атомов углерода, которые находятся в sp и sp^2 - гибридизациях. Изучение механизмов деформации подобных двумерных структур позволяет не только понять фундаментальные основы их поведения, но также может расширить область их применения при создании новых материалов и устройств гибкой электроники.

В данной работе методом молекулярной динамики изучено механическое поведение графинов при одноосном растяжении при температуре 0 К. Были рассмотрены β_1 -, β_3 -, γ_1 -, γ_2 - графины (рис. 1, а - д). Условиями задачи допускалось образование складок, что является очень распространенным явлением в двумерных материалах [1, 2] и существенно снижает их прочность. Как видно из рис.1, е, γ_2 -графин демонстрирует самый высокий предел прочности при растяжении (максимальное растягивающее напряжение, при котором начинается разрушение), а также самое высокое среднее напряжение при растяжении. Три других

графина имеют близкие значения предела прочности. Эти различия тесно связаны с особенностями их строения. Как видно из рисунка, γ_2 -графин имеет гораздо более высокую плотность структуры, ковалентные связи здесь были более напряженными, при этом они расположены в направлении растяжения.

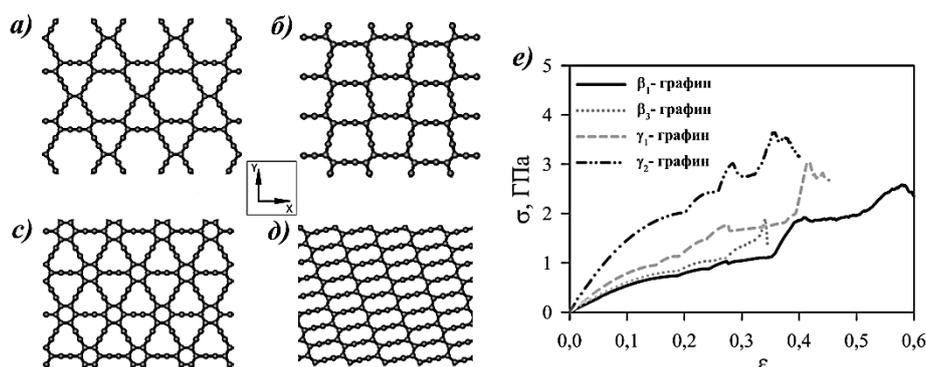


Рис. 1. Фрагменты ячеек моделирования (а-д) четырех графинов (β_1 , β_3 , γ_1 , γ_2) и (е) соответствующие этим структурам графики «напряжение-деформация», полученные при одноосном растяжении вдоль оси x .

Для всех рассмотренных структур можно определить одни и те же стадии деформации: 1) упругая деформация примерно до $\epsilon=0,05$; (2) трансформация от плоской структуры к морщинистой примерно до $\epsilon=0,2$ с одновременным изменением ковалентных связей и углов; (3) разглаживание морщин с резким удлинением ковалентных связей; и (4) докритический режим, когда структура снова разглаживалась, при этом создавались большие напряжения вследствие резкого изменения валентных углов. Деформация разрушения была различной для всех структур, причем для β_1 -графина она была самой большой.

Полученные результаты позволяют детально понять деформационное поведение таких новых структур, что имеет большое значение для их будущего применения в новых электронных устройствах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания ИПСМ РАН (молодежная лаборатория).

Литература

1. А.Х. Ахунова, Ю.А. // Журнал технической физики, 93:4 2023. 445-452
2. A.Kh. Akhunova, L.Kh. Galiakhmetova, J.A. Baimova // Applied Sciences, 13:1 2023. 9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ ПЛАСТ-СКВАЖИНА

Аюпова Г.К.¹, Пашкин В.Д.¹, Кузькин В.А.^{1,2}, Самоловов Д.А.³

*1 - Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

*3 - Научно-технический центр Газпромнефти, Санкт-Петербург, Россия
gooooglik@yandex.ru*

В данной работе представлены модели для прогнозирования температуры в пласте и в стволе горизонтальной скважины. В аналитической модели пласта рассматривалась неизотермическая фильтрация несжимаемого флюида в однородном пористом пласте к скважине, на стенке которой задано давление. Для описания поля давления в однородном пласте использовалось уравнение пьезопроводности в осесимметричной форме. Для описания изменения температуры в насыщенном пористом пласте при фильтрации газа к скважине использовалось уравнение Чекалюка в осесимметричной форме. В результате изменение температуры некоторого объема газа происходит вследствие проявления радиальной теплопроводности и конвективного теплопереноса за счет движения газа в пласте. Полученные результаты являются граничным условием для модели скважины. Основные дифференциальные уравнения, описывающие установившееся движение природного газа по скважине с притоком газа через боковые стенки, выводились из законов сохранения массы, импульса и энергии. Движение газа считалось одномерным. Площадь поперечного сечения скважины величина постоянная. Из сопротивлений рассматривалось лишь сопротивление трения газа о стенку скважины. Для замыкания систем уравнений выбрано уравнение состояния Редлиха-Квонга. После обезразмеривания величин получилась система из двух дифференциальных уравнений относительно плотности и давления. В результате

получена математическая модель, которая описывает изменение температуры, давления и плотности в скважине с учетом притока газа через боковые стенки скважины. Полученные результаты можно использовать для предсказания выпадения асфальтеносмолопарафиновых отложений.

О РЕШЕНИИ СТАТИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЧЕТВЕРТИ ПЛОСКОСТИ

Бабешко О.М.¹, Уафа С.Б.¹, Евдокимова О.В.², Бабешко В.А.¹, Евдокимов В.С.¹

1 - Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

2 - Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

babeshko49@mail.ru

В докладе впервые методом блочного элемента построено точное решение статической контактной задачи о действии жесткого клиновидного штампа, занимающего первый квадрант, на слой композитного материала, имеющего произвольную анизотропию.

В отличие от многочисленных, в основном, безуспешных попыток, решения этой и подобных задач аналитическими или численными методами, позволявшими выявлять лишь частичные свойства решения этой задачи, метод блочного элемента дал возможность вскрыть более богатый комплекс свойств ее решений. Решение получено в видах, как в координатном, так и в преобразованиях Фурье. Это делает особенно удобным дальнейшее его исследование численным анализом с помощью стандартных компьютерных программ. Они позволят выявлять те или иные свойства композитов, как конструкционных материалов, диктуемые разными типами анизотропий. В работе показано, что полученное решение точно удовлетворяет двумерному уравнению Винера-Хопфа для произвольной правой части. Выявлен ряд ранее не известных свойств решения. В частности, полученное представление решения контактной задачи в клине, дало его общего вида. По сравнению с полосовыми штампами оно содержит аддитивно дополнительный член, описывающий концентрацию контактных напряжений в угловой точке, то есть, в вершине, штампа. Расчет показателя особенности концентрации контактных напряжений в этой точке близок к выполненным численными методами в ряде работ значениям. В работе показано, что зона вблизи вершины штампа имеет превосходящую податливость при внедрении штампа в среду, по сравнению с удаленными зонами. Это соответствует получаемым оценкам на примере внедрения в слой сужающихся по ширине полосовых штампов. В зоне, рассматриваемой вдали от вершины штампа, точное решение переходит в решение для случая полубесконечного штампа. Разработанный метод применим для композитов произвольных анизотропий, возникающих в линейно упругих материалах и кристаллах любых сечений, допускающих построение функции Грина, а отсюда - и двумерных интегральных уравнений Винера-Хопфа. Установление общего вида решения рассмотренной контактной задачи открывает возможность изучения предвестников повышения сейсмичности в горных территориях, а также совершенствования численных методов для получения более точных решений усложненных контактных задач в инженерной практике.

$$\mathbf{K}q = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(x-\xi, y-\eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta = f(x, y), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty$$

$$k(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(\alpha, \beta) e^{-i(\alpha x + \beta y)} d\alpha d\beta, \quad Q(\alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} q(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta$$

$$F(\alpha, \beta) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(\xi, \eta) e^{i(\alpha \xi + \beta \eta)} d\xi d\eta$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда, региональный проект 24-11-20006.

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Точное решение универсальным методом моделирования контактной задачи в четверти плоскости многослойной среды. // Прикладная математика и механика, 2022, том 86, № 5, С. 628–637 Сер.:

О НЕОДНОЗНАЧНЫХ ДИАГРАММАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И СПОСОБАХ ПРЕОДОЛЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ

Бабушкин А.В., Бабушкина А.В., Ожгихин И.П.

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь, Россия
bav651@yandex.ru

В последние годы бурно развиваются технологии создания изделий авиакосмического транспорта из объемноармированных полимерных композиционных материалов (вязаные структуры, 3D-армированные, прошивные и т.п.) [1, 2]. При этом механическое поведение образцов таких материалов при проведении стандартных испытаний часто существенно отличается от поведения традиционных слоистых ламинатов и текстолитов. К факторам неоднозначности можно отнести такие особенности как положительная бимодальность, множественность срывов на восходящем участке и другие, но, прежде всего, отсутствие явно выраженного максимума диаграммы. В таких случаях стандарты, как правило, предлагают некоторый формальный признак (ограничитель). Результаты, полученные на основе таких ограничений, совершенно не отражают физические процессы, формальны, ложны. Тогда фундаментальной научной становится проблема адекватного анализа неоднозначных диаграмм нагружения (деформирования) и объективная оценка механических характеристик материалов, обладающих подобными диаграммами при стандартных видах нагружения.

В работе осуществлено развитие методологии проведения экспериментальных исследований с использованием современных испытательных и измерительных систем и изучения механического поведения конструкционных композитов ответственного назначения. Проведено уточнение стандартных методик механических испытаний образцов объемноармированных полимерных композиционных материалов через применение так называемых «дополнительных средств измерений» в ходе процесса нагружения типа систем анализа полей деформаций методом корреляции цифровых изображений (DIC), метода акустической эмиссии, тепловизионного сканирования. При анализе результатов стандартных испытаний неоднозначные диаграммы выявлены при сжатии полосок с отверстием, испытаниях на четырехточечный изгиб и на сдвиг. Получены результаты пробных испытаний для подтверждения неоднозначности диаграмм. Получены совмещённые диаграммы нагружения и дополнительных измерений. На основе анализа предварительных данных сделан вывод о принципиальной возможности объективного уточнения механических характеристик [3]. По результатам пробных испытаний, с учётом особенностей испытательных методик, был уточнён план-график основного объема экспериментальных исследований. Так выяснилось, что тепловизионное сканирование невозможно при вышеупомянутых видах нагружения и было проведено только при испытании на растяжение. Применение системы анализа полей деформаций методом корреляции цифровых изображений (DIC) в случаях, когда измерение деформаций не предусмотрено стандартом, то есть в виде дополнительного средства наблюдения за процессом деформирования, также оказалось ограниченным. Таким образом, а также ввиду более развитого исследовательского аппарата данной системы, основной акцент в исследовании был сделан на систему анализа сигналов акустической эмиссии. Проведён основной объём испытаний согласно актуального плана-графика. Формируется алгоритм анализа сигналов акустической эмиссии с точки зрения определения критической энергии разрушения – звукового аналога предела прочности материалов (несущей способности) от начала нагружения до предполагаемого экстремума.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00931.

Литература

1. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // Textile Research Journal. 2012. Vol.82. №7. P.725-743.
2. Субботин В.В., Гринев М.А. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и PORCHER в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 5. (<http://www.materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/45.pdf>).
3. Бабушкин А.В., Бабушкина А.В., Ожгихин И.П. Уточнение механических характеристик 3D-армированных углепластиков авиационного назначения при перекрестном наблюдении за процессом деформирования // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2023. № 75. С. 103-119. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.75.09

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ДВУМЕРНОЙ СКАЛЯРНОЙ РЕШЕТКЕ

Трунова И.Н.¹, Бессонов Н.М.², Кривцов А.М.^{1,2}, Баимова Ю.А.³

1 - Санкт-Петербургский Политехнический Университет, Санкт-Петербург, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

3 - Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

julia.a.baimova@gmail.com

Теоретическое описание локализованных волн в пространстве и времени с использованием нелинейных или линейных подходов активно развивается на протяжении последних десятилетий. Понимание распространения энергии и возмущений важно для различных физических процессов, особенно на наномасштабе. Новая область энергетической динамики, которая предлагает аналогию между переносом энергии и массопереносом для волновых процессов, была успешно использована для описания теплопереноса в твердых телах на наномасштабе [1]. Показано, что на микро- и наномасштабах наблюдается недиффузионный баллистический и аномальный перенос тепловой энергии [2-4]. Идея энергетической динамики для описания переноса волновой энергии через массоперенос была представлена в [1] для одномерной системы взаимодействующих частиц. Этот подход можно использовать для различных физических явлений на разных масштабных уровнях. Распространение энергии в скалярной гармонической решетке описано в работе [5].

В данной работе на модели квадратной гармонической решетки в рамках классической механики исследуется движение и расплывание локализованных волн, определяются возможности и ограничения кинетического описания переноса энергии в кристаллических телах. Введены понятия энергетического центра и полного потока энергии для локализованной волны, а также определение энергетического радиуса. Аналитически и численно показано, что полный поток энергии в системе сохраняется и энергетический центр движется прямолинейно и равномерно с заданной скоростью. Это является аналогом движения центра масс в классической механике. Расплывание возмущения происходит в направлении нормальном направлению движения возмущения. Рассматриваемые процессы имеют большое значение для понимания переноса энергии в решетке и установления связи между динамикой решетки и кинетикой фононов.

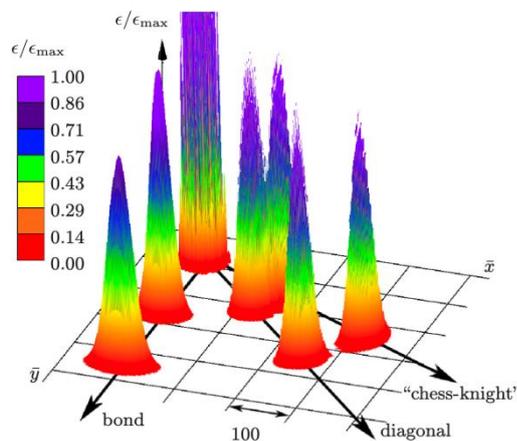


Рис. 1

Литература

1. A.M. Krivtsov // Dynamics of matter and energy, ZAMM, 2022. e202100496.
2. M. Krivtsov // Heat transfer in infinite harmonic one- dimensional crystals, Dokl. Phys. 60 2015. 407.
3. V. A. Kuzkin // Unsteady ballistic heat transport in harmonic crystals with polyatomic unit cell, Continuum Mech. Thermodyn. 31 2019. 1573.
4. V. A. Kuzkin and A. M. Krivtsov // Ballistic resonance and thermalization in the Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou chain at finite temperature, Phys. Rev. E 101 2020. 042209.
5. J.A. Baimova, N.M. Bessonov, A.M. Krivtsov // Motion of localized disturbances in scalar harmonic lattices, Phys. Rev. E, 107 2023. 065002.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТКРЫТОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ДОЗВУКОВЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ С АКУСТИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧЕГО ПОТОКА

Батура Н.И., Гаджимагомедов Г.Г., Галанская Ю.Н., Чудаков А.Я.

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Москва,
Россия*

nikolai.batura@tsagi.ru

Одной из существенных проблем при создании дозвуковых аэродинамических труб (АДТ) с открытой рабочей частью является наличие свободной затопленной струи. Как показывает опыт эксплуатации АДТ с открытыми рабочими частями в контуре таких труб возникают значительные низкочастотные колебания давления, амплитуда и частота которых увеличивается с увеличением скорости рабочего потока, что приводит к вибрациям элементов конструкции трубы и в ряде случаев к аварийным ситуациям. Ситуация усугубляется при наличии значительной по объему акустической камеры вокруг рабочей струи.

Турбулентные струи достаточно давно являются объектом пристального внимания исследователей, что определяется их широким практическим применением [1-4].

Значительное количество работ по исследованию свободных затопленных струй выполнено в 30–40-х годах прошлого века и было связано с интенсивным развитием экспериментальной базы дозвуковой аэродинамики. Актуальность этой темы не уменьшилась и в дальнейшем, в связи с разработкой новых аэродинамических труб, а также модернизацией имеющихся для получения более высоких скоростей рабочего потока по сравнению с реализованными ранее [3, 4].

В настоящей работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований в обеспечение создания перспективной АДТ больших дозвуковых скоростей с акустической камерой.

Экспериментальная часть работы проводилась в АДТ ЦАГИ замкнутого типа с открытой рабочей частью с соплом прямоугольного сечения размером 575×370 мм со скошенными углами. Расстояние от сопла до диффузора (длина струи) $L = 1300$ мм. Испытания проводились как с открытой рабочей частью, так и с рабочей частью в виде камеры Эйфеля размером $2500 \times 1400 \times 1500$ мм. В рамках проводимого исследования скорость рабочего потока изменялась в диапазоне (10...40) м/с.

Проведено комплексное исследование структуры течения рабочей струи с применением современных методов диагностики течений. Для исследования структуры течения использовалась система измерения полей скорости PIV. В результате измерений были получены мгновенные поля двух компонент скорости в слое смешения струи в центральном сечении трубы в плоскости XY.

В ходе проведенных исследований в исследуемом диапазоне скоростей рабочего потока определен вариант оптимальной компоновки геометрии выходной кромки сопла и входного устройства диффузора, обеспечивающий возможность получения в ядре рабочей струи равномерного потока при снижении уровня пульсаций в слое смешения.

В работе проведены расчетные исследования особенностей течения на основе численных решений уравнений Навье – Стокса с использованием программного комплекса ANSYS CFX, выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Приводятся результаты обобщения полученных экспериментальных зависимостей.

Литература

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 715 с.
2. Жданов В. Г. Влияние формы и размеров вихревых генераторов на смешение струйных ограниченных течений // ММФ–2016: XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (23–26 мая 2016 г.): Тез. докл. и сообщ. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Минск, 2016. Т. 1. С. 88–93.
3. Стрелков С. П., Бендриков Г. А., Смирнов Н. А. Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их // Труды ЦАГИ. 1946. № 593.
4. Батура Н. И., Вожаев В. В., Гаджимагомедов Г. Г., Липатов И. И. Структура слоя смешения струи в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII, № 8. С. 26–36.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Баяндин Ю.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
buv@icmm.ru

Целью работы является обоснование и экспериментальная верификация разработанной структурно-феноменологической модели [1] деформирования и разрушения композитных ламинатов при квазистатических и динамических нагружениях. Проведена адаптация предложенной модели усталостного разрушения композиционного материала для описания деградации модуля упругости при циклическом нагружении с фиксированной амплитудой напряжений [2] на основе данных оригинальных экспериментов и показано соответствие результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Разработанная модель накопления повреждений в анизотропном материале позволила количественно описать зависимости деградации упругих свойств при квазистатическом деформировании [3] и кривую усталости в диапазоне многоциклового усталости [2,3].

Математическая постановка для динамического нагружения анизотропных материалов с учетом накопления повреждений была реализована методом конечных элементов в ослабленной формулировке с использованием модуля Weak Form пакета прикладных программ Comsol Multiphysics. Начальные условия выбирались однородными. Граничные условия задавались на двух противоположных гранях образца, одна из которых была фиксированной (нулевые перемещения), а на второй задавался импульс нагружения. На остальных гранях попарно задавались условия симметрии (условия одноосной деформации). Результаты численного моделирования представлены на рисунке 1.

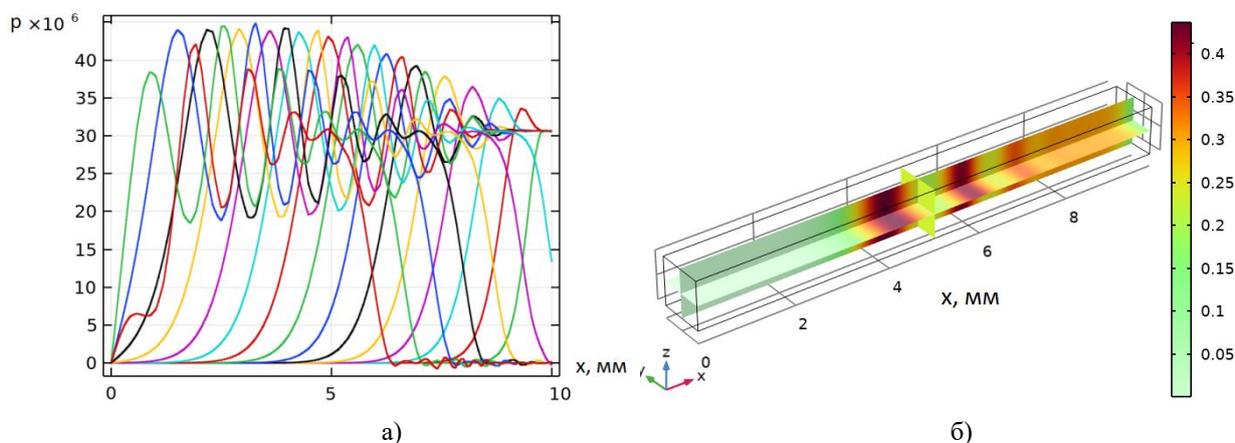


Рис. 1. Результаты моделирования: а) распределение обусловленной дефектами деформации вдоль оси образца в различные моменты времени, б) распределение поврежденности $D = p_{xx} / p_c$ в момент времени 1 мкс.

Разработанная структурно-феноменологическая модель была верифицирована по данным измерения скорости звука, позволяющая описать деградацию продольного модуля Юнга при одноосном растяжении образца из углепластика [3]. Для циклического нагружения численное моделирование проводилось в рамках модели накопления повреждений с учетом нелинейной кинетики роста дефектов в сопоставлении с S-N кривой [2,3]. Динамическая постановка задачи реализована в соответствии с условиями нагружения по методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона для анизотропного упругого материала с учетом нелинейной кинетики роста дефектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-30041.

Литература

1. Bayandin Yu., Panteleev I., Zhitnikova K., Naimark O. Numerical simulation of deformation and failure of orthotropic composite materials // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2016. – Vol. 1785, №. 1. –P. 040007.
2. Bayandin Yu., Golovin M., Ledon D., Naimark O. Model of elastic modulus degradation and fracture of composite

materials under cyclic loading. Procedia Structural Integrity, 2021, vol. 32, P.26-31.

3. Баяндин Ю.В., Головин М.С., Банников М.В., Уваров С.В. Модель накопления повреждений в ортотропном композиционном материале // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024 – Т. 17, № 1. (принята к печати)

КОНВЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ В ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ, ОБДУВАЕМОЙ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Бекежанова В.Б.¹, Гилёв Н.И.^{1,2}, Шефер И.А.^{1,3}

1 - Институт вычислительного моделирования СО РАН, Россия

2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

3 - Сибирский федеральный университет, Россия

vbek@icm.krasn.ru

Рассматривается установившееся совместное течение испаряющейся жидкости и спутного газового потока в плоском горизонтальном канале, на внешних стенках которого приложен линейный нагрев. Газ прокачивается с заданным расходом R_g , что приводит к формированию дополнительных сдвиговых напряжений на термокапиллярной границе раздела и росту скорости испарения. Для описания возникающих режимов течения используется точное частично-инвариантное решение уравнений термоконцентрационной конвекции, построенное в рамках двусторонней модели испарительной конвекции [1]. На примере системы сред HFE-7100 – азот исследуется влияние величины расхода газа на характеристики конвективных режимов и скорость испарения. Проводится сравнительный анализ теоретических результатов, полученных с помощью точного решения с данными теплофизических экспериментов [2].

Исследуется устойчивость двухслойных течений и эволюция нейтральных кривых при изменении скорости прокачки газа для плоских и пространственных нормальных возмущений. Установлено, что в рассматриваемой двухфазной системе всегда реализуется колебательная неустойчивость в форме валиковой конвекции. При потере устойчивости в жидком слое формируются конвективные структуры в виде поперечных валов, которые сносятся основным потоком. Увеличение R_g имеет дестабилизирующее влияние, при этом фазовая скорость главных возмущений растёт. Поскольку кризис рассматриваемого стационарного течения связан с развитием в областях с неустойчивой температурной стратификацией плоских возмущений рэлеевского типа изучается поведение возмущений такого типа с конечной амплитудой. Обнаружено существование второго порога, за которым вблизи межфазной поверхности жёстко возбуждаются винтовые пространственные структуры. С ростом температуры межфазной поверхности интенсивность вихревого движения в упорядоченных продольных валах возрастает. Увеличение скорости прокачки газа приводит к развалу структур на валики с меньшим поперечным размером. Предсказываемые точным решением формы неустойчивости в жидкости подтверждаются данными теплофизических экспериментов [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00243.

Литература

1. В. Б. Бекежанова, О. Н. Гончарова // Задачи испарительной конвекции (обзор), ПММ, 82:2 2018. 219–260.
2. В. Б. Бекежанова, О. Н. Гончарова, Ю. В. Люлин // Теоретическое и экспериментальное исследование течений с испарением на термокапиллярной границе раздела: особенности моделирования, анализ характеристик, Многофазные системы, 18:3 2023. 97–99.
3. O. A. Kabov, D. V. Zaitsev, V. V. Cheverda, A. Bar-Cohen // Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels, Exp. Therm. Fluid Sci. 35:5 2011. 825-831.

КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ШАРИКОПОДШИПНИКЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОДОРОДА

Зиновьева Т.В.¹, Галяутдинова А.Р.², Беляев А.К.¹

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
aliyagalautdinova@gmail.com

НДС ослабленного водородом кольца подшипника

Воздействие водорода – один из факторов, способных непредсказуемо сократить срок службы подшипника. Выделяемые из смазки атомы водорода диффундируют в подшипниковую сталь, что ведет к накоплению ее поврежденности. Предварительная оценка влияния водорода [1] показала формирование слоя с ослабленными механическими свойствами во внутреннем кольце подшипника, посаженного на вал с натягом. В данной работе показано, что внутреннее кольцо испытывает дополнительное расширение под воздействием водорода. Это приводит к уменьшению радиального зазора в подшипнике, что может стать причиной преждевременного его выхода из строя, поскольку увеличивается сила, прижимающая тела качения к кольцу.

Контактные напряжения в кольце от тел качения

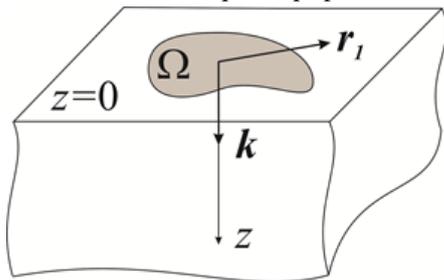
Для расчета глубинных напряжений в кольце подшипника под давлением шара, пренебрегая кривизной, кольцо заменяется упругим полупространством (рис. 1а). Контактное напряжение между шаром и полупространством определяется по формулам Герца. Напряженное состояние найдено с помощью подхода Папковича-Нейбера, представляющее перемещение полупространства через гармонические функции B и B_0 [2]:

$$\mathbf{u} = -z\bar{\nabla}B - \bar{\nabla}B_0 + \psi\mathbf{k}, \quad \psi = (3-4\nu)B - z\partial_z B - \partial_z B_0, \quad \Delta B = \Delta B_0 = 0.$$

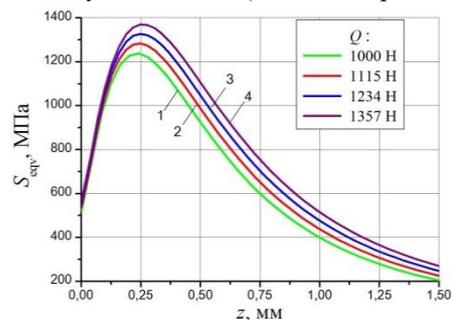
На плоскости $z = 0$ задана распределенная нормальная нагрузка p в области Ω , это граничное условие ведет к задаче Неймана для функции B и к соотношению между искомыми гармоническими функциями:

$$\partial_z B|_{z=0} = -\frac{1}{2\mu} \begin{cases} p(r_1), r_1 \in \Omega \\ 0, r_1 \notin \Omega \end{cases}, \quad \partial_z B_0 = (1-2\nu)B.$$

Задача решается с потенциалом простого слоя, распределенного по области Ω . Для параметров подшипника ISO 6320 построен график эквивалентного напряжения в глубине кольца (линия 1 на рис. 1б).



(а)



(б)

Рис. 1. Нагрузка на полупространство (а) и эквивалентное напряжение по Мизесу в кольце подшипника (б) при различных его расширениях: 0 мкм (1), 1 мкм (2), 2 мкм (3), 3 мкм (4)

Рассчитана добавка к прижимающей шар силе Q , возникающая от расширения кольца подшипника под воздействием водорода. Расширение равное 3 мкм вызовет увеличение прижимающей силы с 1000 Н до 1357 Н. Работа выполнена в рамках госзадания ИПМаш РАН FFNF-2024-0003 № 124041100005-4.

Литература

- Zinovieva T.V., Galyautdinova A.R. Hydrogen Degradation of Material of a Bearing Ring Fitted on a Rotating Shaft. LNME. 2024. pp. 66-76. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_7.
- А. И. Лурье // Теория упругости. 1970. 933 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ МНОГОКРАТНОМ СРАБАТЫВАНИИ

Беляев Ф.С.¹, Волков А.Е.², Евард М.Е.², Горбаченко Д.Ф.²

1 - Институт проблем машиноведения РАН

*2 - Санкт-Петербургский государственный университет
belyaev_fs@mail.ru*

Термомеханические приводы на основе сплавов с памятью формы (СПФ) имеют ряд преимуществ относительно обычных приводов: это высокая надежность срабатывания, легкость, компактность конструкции, бесшумность и плавность срабатывания, долговечность. Благодаря этим преимуществам термомеханические приводы нашли применение в различных областях, от медицинской техники и робототехники до автомобильной и аэрокосмической промышленности.

Работа термомеханического привода основана на реализации эффекта памяти формы – восстановлении деформации рабочего тела из СПФ при нагреве. Соответственно при охлаждении привод должен возвращаться в свое начальное состояние. Восстановление начальной деформации происходит за счет эффекта пластичности превращения, который реализуется при приложении внешней нагрузки во время охлаждения. Таким образом рабочий цикл приводов на основе СПФ состоит из двух этапов: этап «взведения», когда рабочее тело накапливает деформацию и этап срабатывания, когда деформация рабочего тела восстанавливается. Обычно в конструкцию термомеханических приводов входят: рабочее тело из СПФ, которое и совершает полезную работу при нагреве, и упругое контртело, которое восстанавливает начальную деформацию рабочего тела при охлаждении.

Несмотря на все достоинства приводов на основе СПФ, они не лишены и недостатков. Основным недостатком является плохая стабильность функциональных свойств СПФ. При многократной реализации рабочего цикла может накапливаться необратимая деформация, могут изменяться характеристические температуры мартенситных превращений, может изменяться величина восстанавливаемой деформации. Все это может привести к снижению производимой полезной работы в цикле или к неполному срабатыванию привода. В связи с этим целью данной работы было теоретическое исследование влияния различных характеристик приводов на стабильность их рабочих циклов при многократном срабатывании.

Объектом исследования был торсионный привод с рабочим телом из сплава TiNi и упругим контртелом. Для моделирования деформационного поведения рабочего тела в режиме рабочего цикла привода применялась ранее разработанная авторами микроструктурная модель СПФ [1]. В работе исследовалось влияние жесткости упругого контртела на производимую в цикле полезную работу. Показано что полезная работа немонотонно зависит от жесткости контртела и существует оптимальная жесткость, при которой полезная работа максимальна. Построены расчетные зависимости величин эффекта памяти формы, максимального напряжения в цикле, необратимой деформации от номера цикла. Показано, что от цикла к циклу идет накопление необратимой деформации, скорость которого постепенно падает. Вследствие этого снижается как величина эффекта памяти формы, так и величина развиваемых приводом напряжений, что в совокупности приводит к снижению производимой полезной работы. Полученные результаты качественно соответствуют экспериментальным данным из работы [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

Литература

1. Fedor S. Belyaev, Aleksandr E. Volkov, Margarita E. Evard, Microstructural modeling of fatigue fracture of shape memory alloys at thermomechanical cyclic loading // AIP Conference Proceedings Vol. 1959, 2018, art. 070003. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5034678cc>
2. Sibirev, S. Belyaev, N. Resnina, The influence of counter-body stiffness on working parameters of NiTi actuator // Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 319, 2021, art. 112568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112568>

СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ РОСТА И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕН

Белякова Т.А., Бушманов О.Е., Галиев Р.Р.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
tatiana.beliakova@math.msu.ru

Сверхпластическое деформирование обладает рядом преимуществ при создании ответственных конструкций из алюминиевых и титановых сплавов [1]. Пневмотермическая формовка в режиме сверхпластичности в сочетании с диффузионной сваркой позволяют создавать изделия сложной формы без создания дефектов, ограничивающих надежность и время работы конструкции. Важным условием для реализации сверхпластического процесса является подготовленная мелкозернистая микроструктура материала. Описание эволюции этой микроструктуры признается необходимым для определения оптимальных технологических режимов и расчета свойств готовых изделий [2]. Многослойные гофровые и ячеистые панели, получаемые в ходе сверхпластической формовки, представляют собой легкие и прочные конструкционные элементы и находят широкое применение в авиастроении и ракетостроении [3,4]. В работе исследуется деформирование трехслойной полых конструкции (рис 1, а) на основе определяющих соотношений вязкопластичности, учитывающих деформационное упрочнение, и дифференциального уравнения для микроструктурного параметра d , определяемого по среднему размеру зерен [5]: $\dot{d} = D/d^\beta + G\xi_e/d^\gamma$, $\xi_e = \sqrt{2\dot{\varepsilon}_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p}/3$. Рассмотрены процессы формовки при постоянном давлении и при постоянной интенсивности скоростей деформации. Показано, что время формовки при постоянном давлении с учётом роста зёрен увеличивается. Изменение параметра микроструктуры влияет на зависимость от времени давления газа $P(t)$, обеспечивающую постоянную скорость деформаций. Для неоднородного распределения зерен по размеру предложена модель, позволяющая учесть измельчение зерен в процессе формовки трехслойной панели.

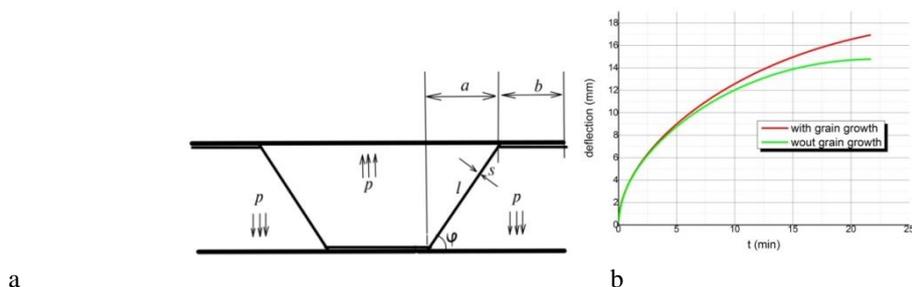


Рис. 1. а) Формовка трехслойной панели давлением газа б) Прогиб внешнего слоя при заданном законе давления.

Известно, что прогиб внешних слоев может приводить к возникновению дефектов-утяжин при посадке трехслойных панелей [3]. В работе исследовано деформирование внешнего слоя как цилиндрической оболочки под действием давления $P(t)$ для различного соотношения толщин внешнего и внутреннего слоев. Показано, что учет микроструктурного параметра приводит к увеличению прогиба внешнего слоя (Рис. 1, б).

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Литература

1. К.А. Padmanabhan, R.A. Vasin, F.U. Enikeev // Superplastic Flow: Phenomenology and Mechanics. 2001. 363 p.
2. П. В. Трусов, А. И. Швейкин // Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения 2019. 605 с.
3. А. В. Колесников // Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей из титановых сплавов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2015.
4. Р. В. Сафиуллин // Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций. Часть I. Международный опыт. Письма о материалах, 2 2012. 32–35
5. J. Lin, F.P.E. Dunne // Modelling grain growth evolution and necking in superplastic blow-forming. International Journal of Mechanical Sciences, 43:3 2001. 595–609

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Бердюгин Д.А.¹, Ривис Н.М.^{1,2}, Бирюков Д.А.²

1 - НИУ "МЭИ", Москва, Россия

2 - Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

berdyugindaniel@gmail.com

На сегодняшний день ультразвук имеет широкий спектр применения для повышения эффективности использования различных промышленных и технических систем. Например, снижение гидравлических потерь при транспортировке жидкостей с большой вязкостью на дальние расстояния, такие как нефть и сжиженный природный газ [1]. На ряду с этим, ультразвук применяется для интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах малой и большой энергетики [2, 3]. Изучение влияния ультразвуковых колебаний на течение жидкостей в каналах остается актуальным вопросом и требует дальнейших исследований.

Основным объектом исследования при течении жидкости в каналах является пограничный слой [4], на который оказывают влияние ультразвуковые поля. Чем больше толщина погранслоя, тем ниже эффективность теплоотдачи. Для решения этой проблемы поток жидкости перемешивают, реализуя тем самым турбулентный режим течения. Однако, во многих случаях наряду с повышением характеристик теплоотдачи, увеличиваются затраты на прокачку, что приводит к росту гидравлических потерь. Воздействуя ультразвуком на жидкость, может возникнуть явление акустической кавитации [5]. Акустическая кавитация сопровождается возникновением пузырьков газа, которые вследствие резкого роста и колебаний схлопываются в жидкость. Таким образом, резкое сжатие пузырька газа вблизи твердой стенки способно вызвать турбулентность из-за разрушения вязкого подслоя, что может привести к снижению потерь на трение при прокачке.

В представляемой работе проводится экспериментальное исследование влияния ультразвуковых колебаний на течение жидкостей с различными значениями динамического коэффициента вязкости. Схема экспериментальной установки с указанием основных компонентов представлена на Рис. 1.

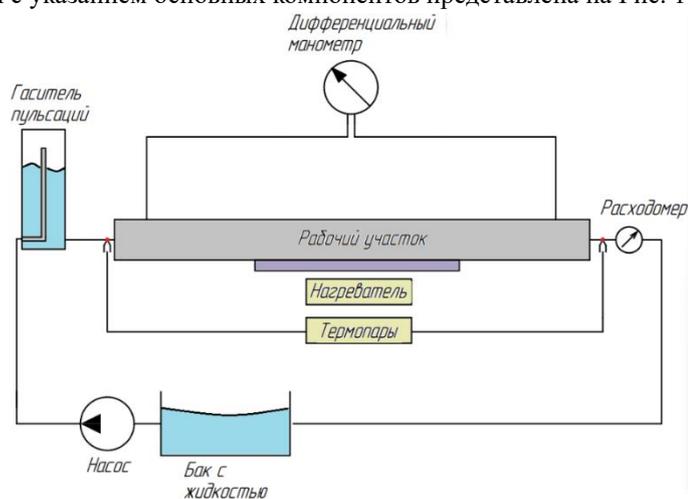


Рис 1. Схема экспериментальной установки

Литература

1. Верховых А. А., Вахитова А. К., Елпидинский А. А. Обзор работ по воздействию ультразвука на нефтяные системы //Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №. 8. – С. 37-42.
2. Legay M. et al. Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances //International Journal of Chemical Engineering. – 2011. – Т. 2011.
3. Кудашев С. Ф. и др. Интенсификация теплопередачи в пластинчатом теплообменнике за счет пульсации потока теплоносителя //Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №. 10-2. – С. 262-267.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – 1974.
5. Apfel R. E. Acoustic cavitation inception //Ultrasonics. – 1984. – Т. 22. – №. 4. – С. 167-173.

ТОЧНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ТЕЧЕНИЯ ТИПА КУЭТТА–БЕНАРА

Берестова С.А., Просвиряков Е.Ю.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
s.a.berestova@urfu.ru

Приводится точное решение и анализ гидродинамических полей для сдвигового течения. Аналитическое интегрирование уравнений Навье-Стокса рассмотрено в контексте идей построения класса точных решений Линя-Сидорова-Аристова.

Нахождение точных решений уравнений гидродинамики вязкой жидкости является актуальной проблемой на протяжении нескольких столетий. Аналитическое интегрирование уравнений Навье-Стокса было начато с конца XIX столетия. Течение Куэтта, течение Пуазейля, решение задач Стокса, течение Экмана стали классическими результатами аналитических частных решений дифференциальных уравнений в частных производных при определенных начальных условиях, варьирование которых позволяет получать классы точных решений. В первых обзорах по точным решениям был сделан акцент на геометрии линий тока для установившихся и нестационарных течений. Можно констатировать, что в этом обзоре используются идеи для точного интегрирования уравнений движения, предложенные Громека, Тркал и Бельтрами. Дальнейшее развитие идей построения точных решений уравнений Навье-Стокса сформулировало класс точных решений Линя-Сидорова-Аристова. Современные потребности микроэлектроники, микро и нано-флюидики ставят вопрос о применении сдвиговых течений для решения точно-интегрируемых задач конвекции. Нахождение точных решений уравнений гидродинамики вязкой жидкости является актуальной проблемой на протяжении нескольких столетий.

Исследовано влияние термокапиллярного механизма на конвективное перемешивание жидкости и показано влияние ограниченных условий и диссипативных коэффициентов жидкости на существование двумерного поля скорости. Построены эпюры скоростей с указанием застойных точек. Исследованы поля температуры и давления в слоях жидкости в зависимости от чисел подобия Рейнольдса, Грасгофа и Эйлера. Показано, что структура гидродинамических полей сопровождается стратификацией.

ПЕРЕДОВОЕ ОЦЕНИВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННЫХ КУРСАХ ПО МЕХАНИКЕ

Берестова С.А., Романовская Е.М.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия
s.a.berestova@urfu.ru

На кафедре теоретической механики Института фундаментального образования Уральского федерального университета идет активная работа по разработке электронных курсов на образовательной платформе Moodle. На данный момент активно используются в учебном процессе курсы: «Введение в инженерную деятельность», «Инженерная механика», «Теоретическая механика», «Основы математического моделирования» и «Динамика механических систем».

Электронные курсы содержат теоретические материалы в виде конспектов, видео-лекций (либо видео-примеров), включают разбор примеров решения задач. Особое место в представленных в курсе материалов занимают примеры для решения задач с поэтапной самопроверкой знания ответов на теоретические вопросы, навыков применения методов, теорем, формул, проведения промежуточных вычислений. Контроль осуществляется с помощью тестов с автоматической проверкой результатов тестирования и заданий.

Существенное сокращение трудоемкости работы преподавателей достигается полу-автоматической проверкой еженедельных заданий. Учебный элемент электронного курса «Задание» позволяет преподавателям создавать задачи с визуальной проверкой результатов. В курсе есть возможность сохранять ответы студентов в виде файлов и собирать студенческие работы для хранения в цифровом архиве. Оценивание возможно с предоставлением отзыва студенту на его работу, у преподавателя есть возможность делать отметки, выделения в самом файле-ответа. При оценивании задания преподаватель может оставлять отзывы в виде комментариев, загружать файл с исправленным ответом студента или аудио-отзыв. Все комментарии будут доступны студенту. В качестве ответов на задания студенты могут отправлять любой цифровой контент: документы Word, документы PDF, электронные таблицы Excel, изображения, аудио- или видеофайлы.

Ответы на задания могут быть оценены не только баллами, оценками, но и рубриками – это наиболее прогрессивный метод оценивания. Пожалуй, составление рубрик самый трудоемкий процесс. К этому способу оценивание необходимо проработать критерии оценки этапов выполнения работы, расставить веса значимости того или иного критерия. Рубрики должны максимально наглядно давать представление студенту о том, что в его работе будет оценено, на какие моменты следует обратить особое внимание. Рубрики позволяют свести к минимуму время, которое уходит на проверку работ и практически исключает апелляции студентов к поставленной оценке. Опыт показал, что для поддержания курса, на котором обучается порядка тысячи студентов, достаточно 15 преподавателей.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ПЛАСТИНЫ НА УПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Шитикова М.В.^{1,2}, Беспалова А.С.¹

1 - Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
2 - Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
psilotsibin@yandex.ru

Лучевой метод является эффективным методом решения задач, связанных с возникновением и распространением волновых поверхностей сильного и слабого разрывов [1], в том числе и задач динамического контактного взаимодействия [2]. Так, анализ нестационарных колебаний классической пластины постоянной толщины, покоящейся на анизотропном или изотропном упругом полупространстве, используя лучевой метод, был впервые проведен в работах [3,4] в линейной постановке. Нестационарные колебания вызываются действием на пластину мгновенных нагрузок, в результате чего возникают плоские ударные волны, распространяющиеся в упругом полупространстве. Решение за волновыми фронтами вплоть до границы контакта строится с использованием лучевых разложений [1]. Неизвестные функции, входящие в коэффициенты лучевых рядов и в уравнение колебаний пластины, определяются из граничных условий контактного взаимодействия пластины с полупространством. При этом авторам работ [3,4] удалось «вручную» (без использования каких-либо математических пакетов) определить только три первых члена лучевого ряда. Таким образом, трехчленное лучевое разложение позволило получить временную зависимость прогиба пластины на небольших интервалах времени.

На основе метода, изложенного в [4], нами был разработан алгоритм решения данной задачи, используя программный пакет MapleSoft для различных типов контактных условий [5]. Было показано, что использование математических пакетов при аналитическом решении рассматриваемой задачи позволяет уточнить решение за счет увеличения числа членов лучевого ряда.

В данной работе лучевой метод применяется для анализа нестационарных колебаний бесконечно длинной упругой нелинейной классической пластины фон Кармана постоянной толщины, лежащей на упругом изотропном полупространстве. В качестве метода решения использован разработанный алгоритм, успешно примененный в линейных задачах [5].

На основе этого алгоритма были определены скорости первой и второй волн (волны сжатия и сдвига), записаны циклы для определения скачков. Полученные скачки позволили определить перемещения и напряжения для полупространства и пластины. Далее используя условие контакта, начальное условие и нелинейное уравнение движения пластины были определены произвольные функции, входящие в лучевые ряды для перемещений и напряжений, и искомая величина прогиба, а также построен график зависимости прогиба от времени с учетом разного числа членов в лучевом разложении. Был проведен сравнительный анализ динамического контактного взаимодействия нелинейной и линейной пластин с упругим полупространством.

Показано, что разработанный алгоритм на базе программного пакета MapleSoft дал возможность продвинуться по времени в изучении волнового процесса. Он может быть применен и к другим типам граничных и начальных условий, а также обобщен для анализа динамического контактного взаимодействия для более сложных динамических систем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания № 075-03-2023-132 (FZGM-2023-0006).

Литература

1. Yu.A. Rossikhin, M.V. Shitikova // Applied Mechanics Reviews, 48:1 1995. 1-39.
2. Yu.A. Rossikhin, M.V. Shitikova // Encyclopedia of Continuum Mechanics, Springer, 2020. 2141-2159.
3. Ю.А. Россихин // Прикладная математика и механика, 42:2 1978. 333-339
4. Yu.A. Rossikhin, M.V. Shitikova // Journal of Sound and Vibration, 181:3 1995. 417-429
5. M.V. Shitikova, A.S. Bespalova // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 19:1 2024. 12-20.

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ НАСОСОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК (РУ) ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

Бесчеров Д.Е., Ереев М.Н., Куликов Д.А., Маслов М.Г., Порфирьев М.С., Савчук Д.В.

АО "ОКБМ Африкантов", Россия
bescherov@okbm.nnov.ru

К современным центробежным насосам реакторных установок предъявляются требования по низкому уровню вибрации и шума.

Наиболее важным следствием воздействия вибрации на насос является накопление повреждений при циклическом изменении нагрузки. Этот процесс приводит к образованию и распространению трещин, которые в конечном итоге разрушают конструкцию.

Задача исследования вибрационных характеристик центробежных насосов актуальна для современных реакторных установок и требует комплекс связанных расчетов гидродинамики и вибрации.

В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается центробежный насос, обеспечивающий выбранные гидравлические характеристики:

- расход $Q = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- напор $H = 30 \text{ м}$.

Обеспечение требуемых вибрационных характеристик центробежного насоса проводится в результате расчетного исследования методами компьютерного моделирования.

Анализ влияния варианта проточной части на вибрационные характеристики насоса проводится по методике, прошедшей верификацию в АО «ОКБМ Африкантов» на насосе прототипе. Методика позволяет получать, с использованием метода конечного элемента, расчетные результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными.

При расчетном исследовании рассматриваются варианты проточной части насоса с выбранными гидравлическими характеристиками. Для каждого варианта используются конечно-элементные модели корпуса насоса (рисунок 1), по которым проводятся гидродинамические и вибрационные расчеты.

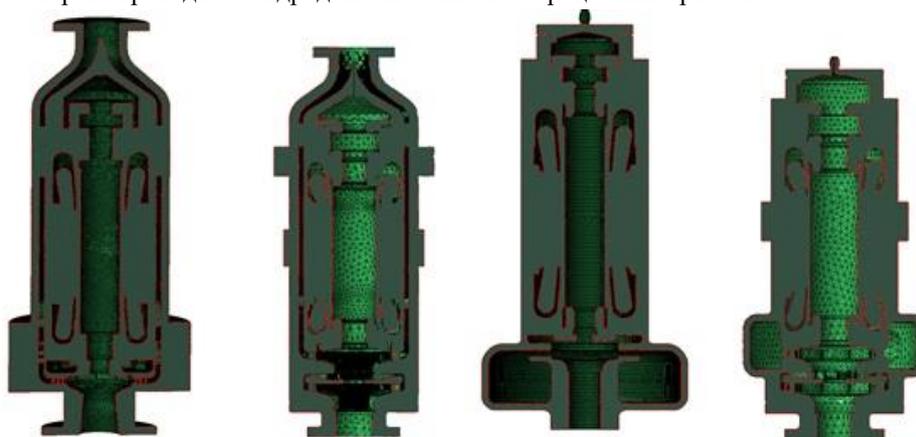


Рис. 1. Рассмотренные варианты конструкции насоса

По результатам расчетного исследования определено, что полнопроточная одноступенчатая конструкция насоса обладает лучшими вибрационными характеристиками, чем прототип и может быть рекомендована для реакторной установки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ КОМПОЗИТОВ "МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ СПЛАВ/ГРАФЕН", СОДЕРЖАЩИХ ВЫДЕЛЕНИЯ ВТОРОЙ ФАЗЫ

Бобылев С.В.^{1,2}, Шейнерман А.Г.^{1,2,3}

- 1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*
3 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
bobylev.s@gmail.com

Предложена теоретическая модель, позволяющая рассчитывать кривые растяжения (напряжение-деформация) композитов металлический сплав/графен, содержащих дисперсионные выделения второй фазы. На примерах композитов Al-4Cu/графен и Cu-2Ag/графен было показано, что графен в границах зерен играет большую роль в упрочнении композитов по сравнению с графеном, внедренным во внутреннюю часть зерен. Расчет предела прочности при растяжении и критического равномерного удлинения для модельного случая разрушения композитов из-за образования шейки показал, что с увеличением содержания графена предел прочности существенно возрастает, хотя и за счет умеренного снижения пластичность. Результаты расчетов также показывают, что наряду с содержанием графена ключевым параметром, влияющим на деформационное упрочнение композитов Al-4Cu/графен, является доля площади границ зерен, занимаемая графеном. С увеличением размера зерна этот параметр может увеличиваться, если доля графеновых пластинок, лежащих в границах зерен, не меняется с размером зерна. В последней ситуации увеличение размера зерна может увеличить напряжение течения при деформации более 2%, хотя и снижает предел текучести. В то же время для композита Cu-2Ag/графен как предел текучести, так и напряжение течения незначительно уменьшаются с увеличением размера зерна, что можно объяснить большей ролью внутризеренных механизмов упрочнения по сравнению с Al-4Cu/графен. Напротив, если изменение размера зерна не приводит к изменению доли площади границ зерен, занятой графеном, то размер зерна очень слабо влияет на предел текучести и напряжение течения композитов. Помимо изменения размера зерен, доля площади границ зерен, занимаемая графеном, может измениться, если границы становятся предпочтительными местами размещения для графеновых пластинок. В этом случае перераспределение пластинок графена между объемом и границами зерен можно описать параметром, уменьшение которого означает увеличение доли графена в границах зерен и приводит к упрочнению.

Таким образом, предложенная модель предсказывает, что высокая прочность композитов металлический сплав/графен определяется не столько размером зерна или размером графеновых пластинок, сколько долей графена в границах зерен. Это указывает на важность выбора содержания графена, которое, с одной стороны, достаточно для обеспечения высокой доли площади границ зерен, занимаемой графеном, но, с другой стороны, недостаточно велико, чтобы вызвать агломерацию графена.

ДИНАМИКА ДВУХ СВЯЗАННЫХ НЕЙРОНОВ ХОДЖКИНА-ХАКСЛИ

Богатенко Т.Р.¹, Сергеев К.С.¹, Стрелкова Г.И.¹, Куртц Ю.²

- 1 - СГУ им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*
2 - Потсдамский институт изучения климатических изменений, Потсдам, Германия
trbogatenko@gmail.com

В настоящее время представление природных объектов и явлений в качестве элементов сети с целью выявления их выраженных свойств и предсказания их поведения является широко используемым методом, зарекомендовавшим себя во многих областях исследований [1-3]. Одним из наиболее очевидных примеров объектов, который можно естественным образом представить в качестве сети, является нервная система живого организма. Численное моделирование становится по-настоящему полезным для изучения таких сложных мелкомасштабных систем, поскольку, несмотря на новые методы исследования мозга, технологические сложности все еще могут быть помехой для получения данных от живых организмов.

Таким образом, настоящее исследование сосредоточено на особенностях динамики двух связанных нейронов Ходжкина-Хаксли. Исследуемая система определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= \frac{1}{C_m} (\bar{g}_K n^4 (x_i - x_k) + \bar{g}_{Na} m^3 h (x_i - x_{Na}) + \bar{g}_l (x_i - x_l) + I_{ext}) + \sum_{j=1, j \neq i}^N g_{ij} (x_j - x_i), \\ \frac{dn_i}{dt} &= \alpha_{n_i} (x_i) (1 - n_i) - \beta_{n_i} (x_i) n_i, \\ \frac{dm_i}{dt} &= \alpha_{m_i} (x_i) (1 - m_i) - \beta_{m_i} (x_i) m_i, \\ \frac{dh_i}{dt} &= \alpha_{h_i} (x_i) (1 - h_i) - \beta_{h_i} (x_i) h_i; \end{aligned} \quad 1)$$

Система (1) описывает два нейрона Ходжкина-Хаксли, связанных линейной электрической связью. Целью исследования было выяснить влияние величины силы связи между нейронами и индивидуальных характеристик самих нейронов, а именно начальных условий и значений внешнего тока. Для оценки степени синхронности между двумя нейронами используется коэффициент корреляции Пирсона:

$$P = \frac{\sum_T (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_T (x_i - \bar{x})^2 \sum_T (y_i - \bar{y})^2}} \quad 2)$$

Было обнаружено, что два нейрона могут довольно легко синхронизироваться при большинстве значений рассматриваемых параметров. При этом было обнаружено, что нейроны могут синхронизироваться в разных режимах в зависимости от значений указанных параметров. Таким образом, синхронизация может быть достигнута путем изменения как значений внешнего тока и начальных условий отдельных нейронов, так и силы связи между ними в зависимости от желаемого режима, демонстрируемого нейронами.

Исследование было поддержано грантом РФ №23–12-00103.

Литература

1. N. Boyers, J. Kurths, N. Marwan. Complex systems approaches for Earth system data analysis, J. Phys. Complex. 2 (2021) 011001
2. T. Mitsui, N. Boers. Seasonal prediction of Indian summer monsoon onset with echo state networks, Environ. Res. Lett. 16 (2021) 074024
3. Y. He, A. Evans. Graph theoretical modeling of brain connectivity. Curr. Opin. Neurol. 23 (2010) 341-350

К ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ НЕКЛАССИЧЕСКОГО ТРАНСЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Богданов А.Н.

НИИ механики МГУ, Москва, Россия
bogdanov@imec.msu.ru

Исследование устойчивости классических пограничных слоев по отношению к малым возмущениям гармонического типа $\sim \exp(i\alpha(x-ct))$ показало, что на плоскости (Re, α) (Re – число Рейнольдса), области устойчивости и неустойчивости разделены некоторой кривой (называемой кривой нейтральной устойчивости) характерной петлеобразной формой с двумя ветвями, неограниченно продолжающимися в направлении роста числа Re до его очень больших значений, охватывающей область растущих возмущений [1]. Форма кривой существенно зависит от вида профиля скорости невозмущенного течения, наличие на нём точек перегиба существенно увеличивает область неустойчивости.

Развитие теории свободного вязко-невязкого взаимодействия газовых потоков привело к формулировке концепции неклассических пограничных слоев (с самоиндуцированным давлением) [2], впоследствии распространенной на трансзвуковые режимы [3]. Получить уравнение кривой нейтральной устойчивости для таких режимов не удалось, а ограничилось расчетом асимптотик верхней и нижней ветвей при $Re \rightarrow \infty$. Однако, дальнейшие исследования обнаружили гиперболическую вырожденность классической математической модели нестационарного свободного вязко-невязкого взаимодействия для трансзвукового режима. Регуляризация математической модели позволила получить новый взгляд на некоторые классические результаты

[4]. Оказалось, что разграничение областей устойчивости/неустойчивости течения оказывается качественно более сложным [5], нежели это полагалось ранее [6].

Одно из самых ярких впечатлений автора о Дмитрие Анатольевиче Индейцеве – его выступление перед Домом ученых Сибирского отделения РАН в Новосибирском академгородке. Оно было неофициальным (частным), не имело большого числа слушателей, скорее всего произошло случайно. Дмитрий Анатольевич касался вопросов происхождения турбулентности, было видно, что этот вопрос глубоко волнует его, настолько эмоциональной была его речь. От него автор впервые услышал широко известные в научных кругах слова (он приписывал их Карману) : "Когда я предстану перед творцом, я спрошу его – Господи, зачем Ты придумал турбулентность?!"

Занятия автора вопросами устойчивости течений газа позволили ему внести свой вклад в эту область.

Литература

1. Schlichting H. Boundary-Layer Theory. 6th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. 1968. 747 p. (Имеется перевод: Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1969. 744 с.)
2. Нейланд В.Я. Асимптотические задачи теории вязких сверхзвуковых течений/ Труды ЦАГИ. М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1974. № 1529. 125 с.
3. Рыжов О.С. О нестационарном пограничном слое с самоиндуцированным давлением при околосзвуковых скоростях внешнего потока// Докл. АН СССР. 1977. Т.236. № 5. С. 1091-1094.
4. Богданов А.Н., Диесперов В.Н., Жук В.И. Неклассические трансзвуковые пограничные слои. К преодолению некоторых тупиковых ситуаций в аэродинамике больших скоростей//ЖВММФ. 2018, т. 58, № 2, с. 270–280.
5. Богданов А.Н., Диесперов В.Н., Жук В.И. Асимптотика нижней ветви кривой нейтральной устойчивости для трансзвукового взаимодействующего пограничного слоя на плоской пластине// Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 160-162.
6. Жук В.И. Волны Толлмина–Шлихтинга и солитоны. М.: Наука, 2001. 167 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НА СУДАХ С МАЛОЙ ПЛОЩАДЬЮ СЕЧЕНИЯ ПО ВАТЕРЛИНИИ

Прокофьев В.В., Бойко А.В., Архангельский Е.А.

НИИ Механики МГУ, Москва, Россия
mailband@mail.ru

Идея использования волновой энергетики моря для движения судов возникла давно. Первые упоминания об использовании энергии морских волн для движения судов относятся еще к 19 в. Препятствием к применению различных волновых движителей (ВД) является нестабильность параметров реальных морских волн и сильная зависимость эффекта от параметров самого судна и волнового движителя. Тем не менее, примеры применения ВД довольно многочисленны [1]. Экспериментальные исследования, проведенные в условиях гидроканалов на гладких волнах показали, что скорость судна, оборудованного крыльевыми волнодвижителями при фиксированной частоте волн примерно пропорциональна их высоте. Однако, при движении против реальных штормовых волн с крутизны близкой к максимальной, судно испытывает большое сопротивление при взаимодействии волн с корпусом вплоть до полной остановки при работающих на полный ход машинах [2]. Однако, известна конструкция судов мало подверженных воздействию волн, так называемых, судов с малой площадью сечения по ватерлинии (СМПВ), еще их часто называют полупогруженными катамаранами. Суда этого типа имеют специальную форму корпуса - расположенную над водой платформу, укрепленную на двух подводных понтонах с помощью нескольких (в нашем случае четырёх) опор, которые образуют минимальную площадь сечения по ватерлинии.

На гидроканале Института механики МГУ проведены испытания двух моделей таких судов: большая модель представляет собой конструкцию, состоящую из двух цилиндрических пластмассовых корпусов-понтонных диаметром 110 мм, соединенными с надводной платформой четырьмя пенопластовыми пилонными эллиптического сечения. Полная длина собранного корпуса понтона равна 1700 мм. Расстояние между центрами понтонов – 1160 мм. Элементы волновых движителей и стабилизатор размещены в пространстве между корпусами судна. Модель, выполненная в меньшем масштабе, имела длину 840 мм. Результаты испытаний традиционного ВД с подпружиненный жестким профилем приведены в работе [2]. В докладе приводятся результаты испытания на модели СМПВ ВД типа подводный парус и прямоточного ВД (использовалась закрепленная между корпусами наклонная пластина).

Показано, что имеется оптимальное натяжение подводного паруса, в зависимости от частоты волн также имеется максимум эффективности, для плавающих корпусов этот максимум соответствует отношению длины волны к длине корпуса примерно 1.5. С погружением корпусов при неизменном заглублении ВД скорость движения против волн сначала уменьшается, а затем по мере удаления корпусов от поверхности воды увеличивается, при этом максимум эффективности значительно (в 2 раза) смещается в сторону более длинных волн. Показано, что наиболее эффективное заглубление самого движителя определяется высотой волн. Таким образом традиционные ВД могут успешно применяться на полупогруженных судах, причем основным возбудителем качки судна тут служит не корпус судна, а сам ВД.

В исследованном диапазоне параметров судна эффективность прямооточного ВД существенно росла с увеличением осадки судна при фиксированном положении рабочего органа ВД (наклонная пластина с верхней кромкой на невозмущенном уровне воды, с нижней кромкой ниже подошвы волн). Эффективность такого ВД в основном связана с высотой, а не с частотой волн – таким образом наибольший эффект наблюдается на предельных для гидроканала волнах (крутизной примерно 0.08), которые можно считать аналогом штормовых волн.

Литература

1. Прокофьев В.В., Филатов Е.В., Такмазьян А.К., Якимов А.Ю. Сравнительные исследования эффективности судовых волновых движителей различных типов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. №3. С. 1 – 17.
2. Прокофьев В.В., Архангельский Е.А., Бойко А.В., Филатов Е.В. Использование волновых движителей на судне с малой площадью ватерлинии // Изв. РАН. МЖГ. 2023. №1. С. 41–53

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ЕДИНИЧНОМ ВОЗМУЩЕНИИ В СИСТЕМЕ ИЗ ДВУХ ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫХ ЦЕПОЧЕК

Борисенков Б.С.¹, Ляжков С.Д.²

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
nickendsm@gmail.com

Рассматривается одномерная линейная механическая модель составного кристалла. Модель представляет собой две соединенные полубесконечные цепочки с разными свойствами. В начальный момент времени задается ненулевой импульс одной из частиц. Записывается точное решение для скоростей частиц в виде интегралов, а также проводится асимптотическая оценка (по аналогии с работой [1]) полученных выражений. Сравняется численное решение с асимптотикой для скоростей. Анализируются быстрые и медленные движения кинетической температуры.

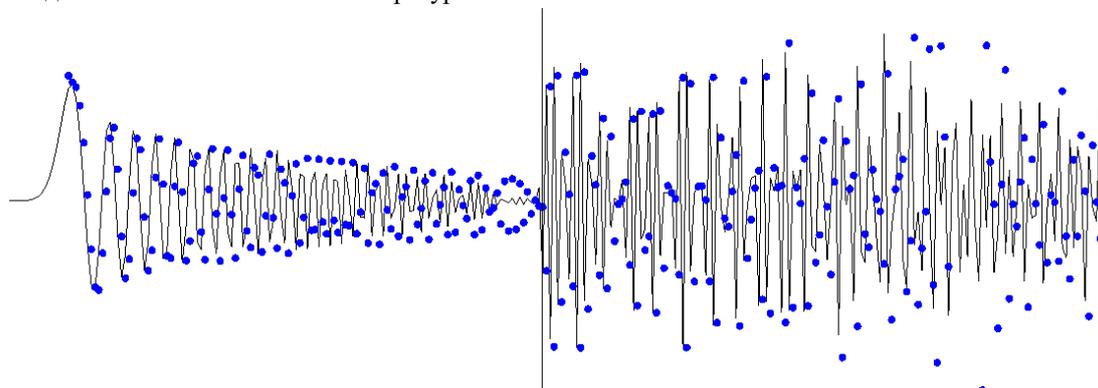


Рис. 1. Сравнение численного и асимптотического решения для скоростей при малых временах.

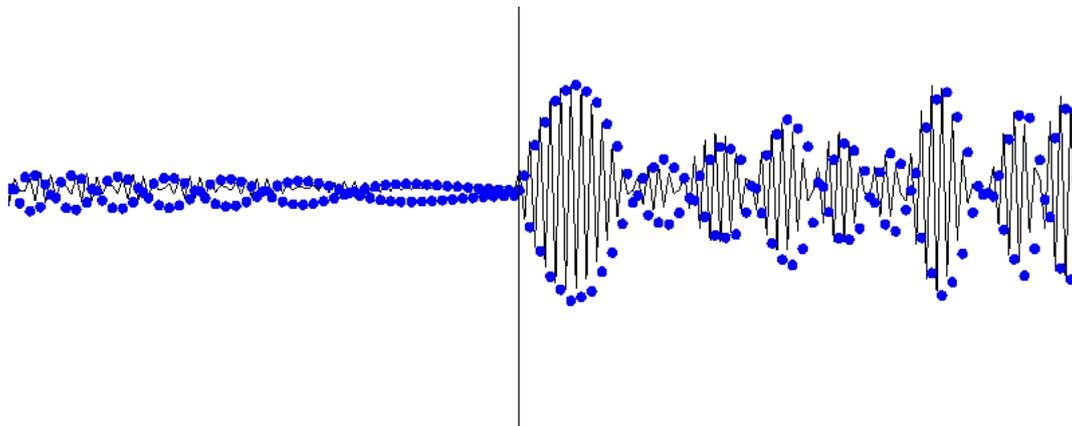


Рис. 2. Сравнение численного и асимптотического решения для скоростей при больших временах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-11-00364.

Литература

1. Gavrilov, S. N. Discrete and continuum fundamental solutions describing heat conduction in a 1D harmonic crystal: Discrete-to-continuum limit and slow-and-fast motions decoupling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123019 (2022)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОПОР В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ СОСРЕДОТОЧЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Боршевецкий С.А.^{1,2}, Локтева Н.А.^{1,3}

1 - ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (НИУ)", Москва, Россия

2 - ПАО "Яковлев", Москва, Россия

3 - НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

wrdeww@bk.ru

С целью уменьшения общей массы конечного продукта во многих областях машиностроения используются тонкостенные элементы конструкции. Они представляют собой различные пластины и оболочки произвольных форм и размеров. Примерами могут служить защитные экраны, обтекатели, крышки и панели. Однако, подобные конструкции крупных габаритов не способны нести сколь угодно малую нормальную нагрузку. Одним из способов повышения жесткости конструкции является установка дополнительных опор.

Проблема аналитического определения расположения дополнительных опор в тонкостенных конструкциях при произвольной действующей нагрузке является особенно актуальной на первоначальных этапах проектирования. В ранних работах [1, 2] была разработана и рассмотрена новая методика решения подобной задачи для прямоугольных пластин. В представляемой работе речь пойдет о цилиндрической оболочке.

Рассматривается цилиндрическая оболочка радиуса R , высотой H и постоянной толщины h . В произвольное место оболочки действует сосредоточенная статическая нагрузка P . Оболочка выполнена из упругого изотропного материала. В качестве модели была выбрана оболочка Кирхгофа-Лява [3]. Требуется определить расположение дополнительных опор таким образом, чтобы максимальный нормальный прогиб не превышал половину толщины [4]. Для использования ранее упомянутой методики задача решается в цилиндрической системе координат. В таком случае цилиндр может быть развернут в прямоугольную пластину размерами 2π на H (Рисунок 1).

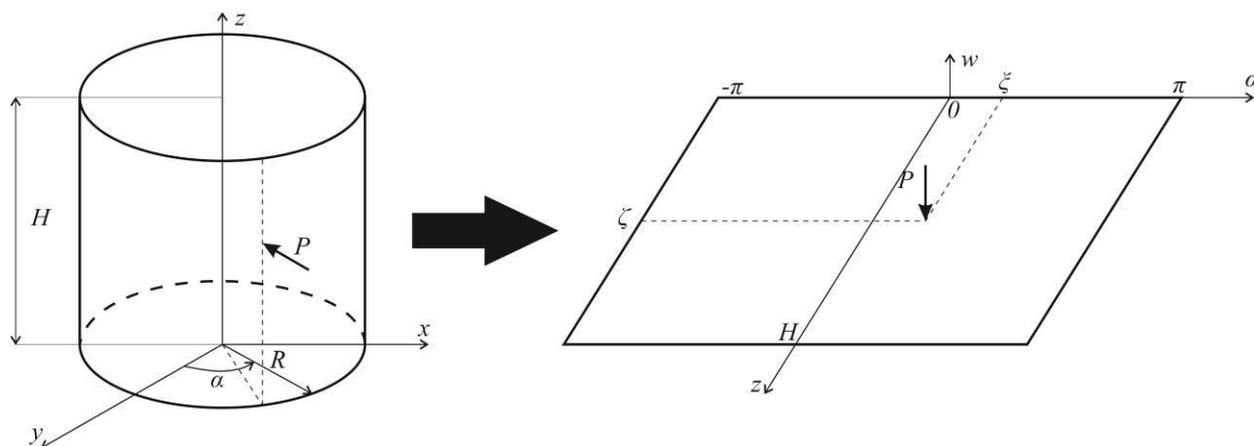


Рис. 1. Развертка цилиндрической оболочки в прямоугольную пластину

Важным моментом решения задачи является условие стыка краев пластины для обратной свертки ее в цилиндр. Это реализуется с условием равенства функции нормальных перемещений в $-\pi$ и π соответственно. А для расположения дополнительных опор учитывается необходимость их четного количества для числа полуволн.

Дальнейшее решение происходит аналогично прямоугольной пластине. Затем проводится верификация полученных результатов при помощи метода конечных элементов.

Литература

1. Боршевский С.А. Определение расположения дополнительных опор шарнирно опертой пластины при гармоническом воздействии // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171384> DOI: 10.34759/trd-2023-128-03
2. Боршевский С.А. Методика определения расположения дополнительных опор шарнирно опертой пластины Кирхгофа при произвольном воздействии // Сборник аннотаций конкурсных работ XV Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». — М. Издательство Перо, 2023. — С. 129-131.
3. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 472 с.
4. А. А. Лукашевич / Теория расчета пластин и оболочек: учеб. пособие, СПбГАСУ. – СПб., 2017. – 127 с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СТИК-СЛИП КОЛЕБАНИЙ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ И ВАЛИДАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ ТЕСТОВ

Тихонов В.С.¹, Букашкина О.С.², Дуарте М.³

1 - *Weatherford, Москва, Россия*

2 - *Везерфорд, Санкт-Петербург, Россия*

3 - *Везерфорд, Хьюстон, США*

olga.bukashkina@weatherford.com

Автоколебания типа стик-слип при роторном бурении возникают за счет взаимодействия продольных и крутильных форм колебаний бурильной колонны вследствие зависимости нагрузки и момента на долото типа PDC от толщины срезаемого слоя породы. При критических значениях параметрах системы это приводит к развитию интенсивных колебаний оборотов долота, кратковременной остановке вращения, отскоку долота от забоя и др. эффектам.

В докладе предложена усовершенствованная модель продольно-крутильных колебаний бурильной колонны в 3D скважине произвольного профиля. В качестве базовой модели взаимодействия долота с породой используется модель, разработанная Detourney et al [1]. Представлены результаты сравнительного анализа автоколебаний оборотов долота и нагрузки на долото с данными полевых тестов.

Показано, что одним из главных параметров, влияющих на возникновение колебаний стик-слип, являются обороты ротора и внутренняя удельная энергия разрушения породы. Эффект ширины кромок

затупления лопастей долота и коэффициента трения на затупленных кромках, а также скорости подачи колонны проявляется в меньшей степени. Одним из важных результатов работы явилось установление величины внутренней удельной энергии разрушения породы, при которой амплитуда колебаний оборотов долота становится минимальной при заданных значениях оборотов ротора и скорости подачи долота в скважину ($e = 130$ МПа, см. рис. 1). Это позволяет выбрать «оптимальный» режим бурения для пород с различными прочностными характеристиками.

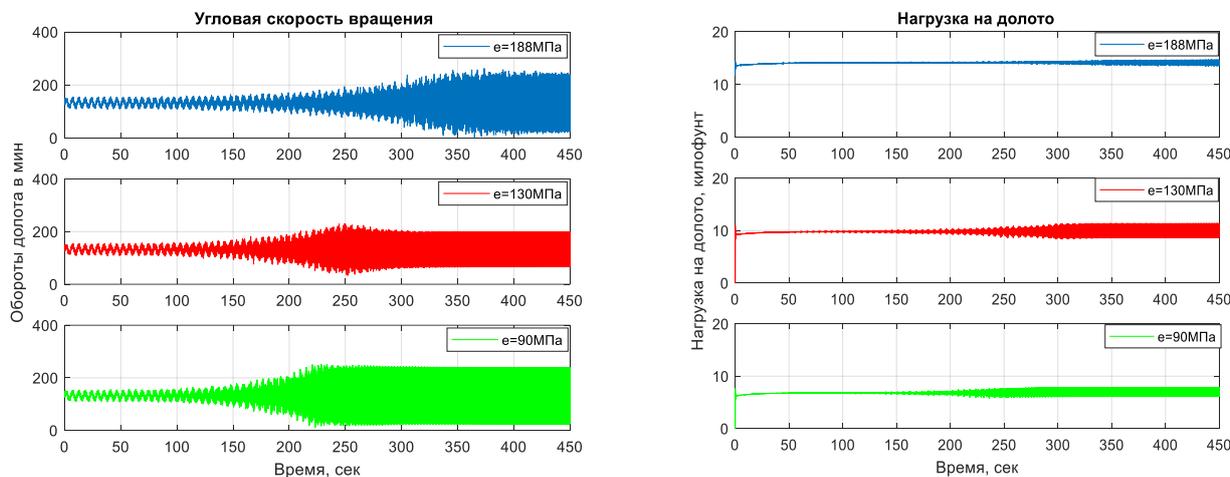


Рис. 1. Колебания оборотов долота и нагрузки на долото при различных прочностных свойствах пород

Предложена оригинальная модель бурильной колонны, в которой граничным условием является нагрузка на долото как наблюдаемый параметр. Сравнительный анализ результатов расчета по данной модели с данными полевых тестов продемонстрировали адекватность модели с приемлемой для практики степенью точности.

Литература

1. Detournay, E., Richard, T., Shephard, M. // Drilling response of drag bits; Theory and experiment, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **45**, pp. 1347-1360.

ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

Буковский П.О.¹, Вани М.Ф.²

1 - Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

2 - Национальный технологический институт, Сринагар, Индия

bukovskiyo@ipmnet.ru

Твердые смазочные покрытия предпочтительны для работы в условиях высокого вакуума, низких и высоких температур, а также при очень длительных рабочих циклах, которые характерны для механических систем в космической технике, например, для космических аппаратов, спутников, телескопов, антенн [1]. Одним из наиболее распространенным материалом является дисульфид молибдена (MoS_2). Он отличается прочностью и очень низким коэффициентом трения, что делает его идеальным для применения в вакуумных средах и широком диапазоне рабочих температур [2].

Данное исследование посвящено анализу четырех различных композиционных покрытий MoS_2 -ZrN с различным процентным содержанием ZrN (0, 10, 20 и 30%). Композитное покрытие из дисульфида молибдена (MoS_2) и нитрида циркония (ZrN) было нанесено на стальные подложки из подшипниковой стали марки AMS 5898. Для осуществления хорошей адгезии покрытия поверхность подложки была тщательно подготовлена. Сначала она была отшлифована наждачной бумагой разной зернистости, а затем – алмазной пастой до достижения средней шероховатости поверхности (R_a) 2 нм. Для определения характеристик трения и износа композиционных покрытий экспериментальное исследование выполнялось на лабораторном трибометре MFT-5000 (RtecInstruments, США). Испытания проводились при постоянной нагрузке $F = 10$ Н и скорости вращения 110 об/мин по схеме контакта «шарик-диск».

На рисунке 1 представлены графики, отражающие зависимость среднего коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) от состава покрытия.

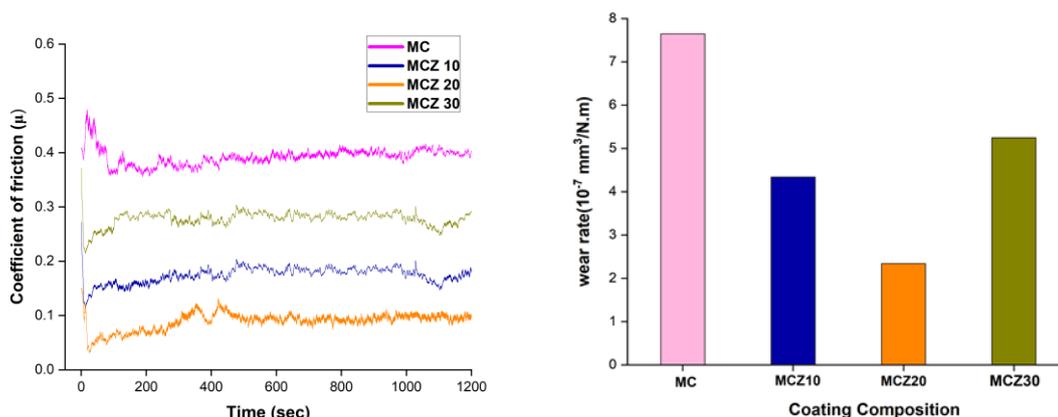


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) от состава покрытия

Анализ рисунка 1 показывает, что композиционное покрытие с содержанием ZrN 20% имеет самые низкие показатели коэффициента трения (0,09), а также скорости изнашивания ($2,3 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$). Покрытие с содержанием 30% ZrN показало наихудшие (самые высокие) трибологические характеристики вследствие сильного адгезионного взаимодействия покрытия с материалом шарика.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-49-02010.

Литература

1. MR. Vazirisereshk, A. Martini, DA. Strubbe, MZ. Baykara. Solid lubrication with MoS₂: a review // Lubricants, 7:7 2019
2. Z. Chen, X. He, C. Xiao, SH. Kim. Effect of humidity on friction and wear-a critical review // Lubricants, 6:3 2018. 1–26.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СЛЕДА ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТАЛИ 45 ПО ТРАЕКТОРИЯМ ТИПА СМЕЩЕННОГО ВЕЕРА

Булгаков А.Н., Широков А.Н., Алексеев А.А., Гультияев В.И.

Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия
elstatik@bk.ru

При испытаниях материалов на сложное нагружение по двухзвенным ломанным траекториям с углами излома более 90 градусов видно, что в точке излома K напряжения начинают резко уменьшаться, постепенно приближаться к некоторому минимуму, после чего снова начинают возрастать (рис. 1). Согласно принципу запаздывания А.А. Ильюшина, направление вектора напряжений относительно траектории деформации определяется не всей историей процесса деформирования из первоначального состояния, а лишь некоторым конечным участком траектории именуемым следом запаздывания [1]. Таким образом все векторы напряжений для разных кривых, при различных углах излома должны сходиться в одной точке K_0 , названной В.Г. Зубчаниновым вторичным пределом текучести.

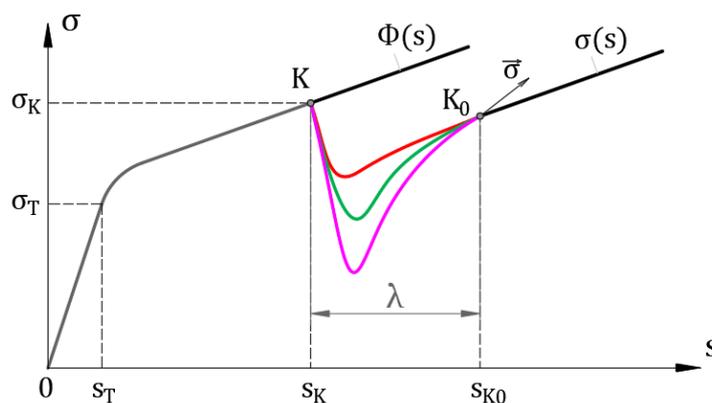


Рис. 1. Уточненный принцип запаздывания векторных свойств В.Г. Зубчанинова

Чтобы перейти к следующему этапу сложного деформирования необходимо преодолеть отрезок равный следу запаздывания длиной λ , при этом кривая по которой пойдет процесс будет выбрана материалом самостоятельно. Для верификации определяющих соотношений связи между напряжениями и деформациями используемых при построении теории пластичности необходимо знать величину λ , которую пока можно найти только экспериментально [2]. Эксперименты были выполнены в ТвГТУ на начально изотропных образцах [3] как часть серии экспериментов по сложному деформированию цилиндрических оболочек программами смещённого веера [4].

Литература

1. Зубчанинов В.Г. Механика сплошных деформируемых сред. – Тверь: ЧуДо, 2000. – 703 с. – ISBN-5-7995-0148-9.
2. Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 352 с. – ISBN 978-5-9221-1235-2.
3. Гульгьяев, В. И. Экспериментальное изучение упругопластического деформирования конструкционных материалов на автоматизированном испытательном комплексе СН-ЭВМ / В. И. Гульгьяев, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2023. – № 2(56). – С. 53-64. – DOI 10.37972/chgpru.2023.56.2.006.
4. Экспериментальное исследование материала сталь 45 при деформировании по программам смещённого веера / В. И. Гульгьяев, А. А. Алексеев, А. Н. Широков, А. Н. Булгаков // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева., Серия: Механика предельного состояния. – 2023. – № 2(56). – С. 88-98. – DOI 10.37972/chgpru.2023.56.2.009.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВИХРЯ ЧЕРЕЗ НЕПОДВИЖНЫЙ СКАЧОК УПЛОТНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ

Бут И.И.^{1,2}, Епихин А.С.^{1,2}

1 - Институт системного программирования РАН, Москва, Россия

2 - Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия
ivan.but@ispras.ru

С развитием вычислительных средств и новых численных методов всё большую актуальность приобретают задачи, предназначенные для валидации новых решений. Хорошим примером такой задачи является прохождение вихря через ударную волну. На сегодняшний день хорошо известно, что при прохождении вихря через ударную волну, вихрь деформируется и генерирует акустические волны [1, 2], в зависимости от чисел Маха ударной волны (M_s) и Маха самого вихря (M_v) эволюция течения после прохождения ударной волны вихрем может проходить по одному из четырёх сценариев: тип 1 (нормальный вихрь), тип 2 (триполь), тип 3 (квадруполь), тип 4 (разрушение вихря).

На сегодняшний день большинство исследователей предпочитают использовать для валидации своих алгоритмов задачу ударно-вихревого взаимодействия протекающего по третьему сценарию, когда вихрь проходя через ударную волну разделяется на два связанных вихря (квадруполь), ограничиваясь при этом качественным совпадением решения, что не позволяет детально оценивать особенности тех или иных алгоритмов и схем.

В нашей работе с использованием двух открытых вычислительных комплексов OpenFOAM и AMReX, а также различных численных алгоритмов представлено количественное распределение поля плотности на линиях, характеризующих ударно-вихревое взаимодействие. Постановка задачи о прохождении вихря через ударную волну аналогична работе [3]. Рассматриваются численные алгоритмы на базе схем Курганова, а также регуляризованных уравнений газовой динамики [4]. Построена карта, описывающая взаимосвязь параметров Маха вихря и Маха ударной волны с соответствующим им типом течения $Ms = (1.1 - 2)$, $Mv = (0.5 - 1.5)$.

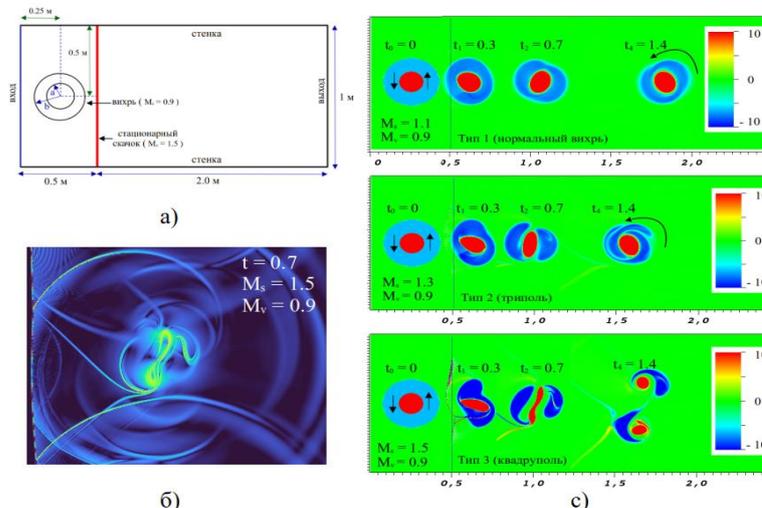


Рис. 1. а) геометрия расчётной области; б) численный Шлирен в моменты времени $t=0.7$; в) Поле завихренности в моменты времени $t_1 = 0.3$, $t_2 = 0.7$, $t_3 = 1.4$.

Работа выполнена при поддержке Московского центра фундаментальной и прикладной математики, Соглашение с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2022-283

Литература

1. Dosanjh D.S., Weeks T.M. // Interaction of a starting vortex as well as a vortex street with a traveling shock wave //AIAA journal. 1965. 3.2. 216-223.
2. Ellzey J.L. et al. // The interaction of a shock with a vortex: Shock distortion and the production of acoustic waves //Physics of Fluids. 1995. 7. 1. 172-184.
3. Кирюшина М.А., Елизарова Т.Г., Епихин А.С. // Моделирование взаимодействия вихревого образования с ударной волной для тестирования численных алгоритмов //Мат. Моделирование. 2022. 34.9. 54-70.
4. Елизарова Т. Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. 2007.

ВОЛНОВОЙ МОРФОГЕНЕЗ

Вакуленко С.А.

ИПМАШ РАН, Санкт-Петербург, Россия
vakulenfr@mail.ru

В данной работе мы рассматриваем реакционно-диффузионные системы, описывающие распространение волн с хаотическими и периодическими во времени фронтами. Используя это свойство, мы покажем, что существуют реакционно-диффузионные модели с небольшим количеством реагентов, которые при варьировании исходных данных способны для создания всех возможных одномерных клеточных структур. Описаны алгоритмы, которые позволяют получить любые заданные шаблоны клеток-мишеней с помощью хаотичных волн. Нашу модель можно рассматривать как реакционно-диффузионный аналог универсальной машины Тьюринга. Итак, предложен новый надежный механизм передачи позиционной информации, который, в отличие от градиентов Вольперта, может работать на больших расстояниях. Универсальность модели помогает объяснить, почему гены, ответственные за морфогенез, высоко консервативны в течение длительных периодов эволюции.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЦЕРКВИ БЛАГОВЕЩЕНИЯ НА ГОРОДИЩЕ

Вареник К.А.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород,
Россия*
vkirillv89@mail.ru

Направлением исследований авторов является внедрение технологии информационного моделирования в сохранении и трансляции объектов архитектурного наследия. Рассматриваемым объектом является церковь Благовещения на Городище – один из древнейших храмов Новгорода с богатой и сложной историей. Церковь, построенная в 1103 г., была разобрана и перестроена, претерпевала капитальные реконструкции, военные разрушения и на данный момент является объектом музейной консервации. Проведенное лазерное сканирование объекта, изучение проектов реставрации и графической реконструкции позволяют создавать цифровой исторический паспорт объекта. Он будет отражать внешний облик церкви в разные периоды времени, а также будет являться основой для аккумулирования разнообразной информации.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Вахтерова Я.А.^{1,2}, Федотенков Г.В.^{1,2}

*1 - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия*

2 - НИИ Механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
yana-vahterova@mail.ru

Нестационарные обратные задачи механики деформированного твердого тела являются одними из наименее исследованных. Для решения прямых и обратных нестационарных задач механики деформируемого твердого тела используются два подхода. Первый подход основан на аналитических либо численно-аналитических решениях прямой и обратной задачи с помощью метода функций влияния. Второй подход реализован с применением технологий глубокого машинного обучения и физически информированных нейронных сетей (PINN), который позволяет построить решения новых нестационарных прямых и обратных задач, которые ранее аналитически получить было крайне сложно или не возможно.

Физически информированные нейронные сети (ФИНС) в сочетании с алгоритмами их обучения, которые по сути являются градиентными методами математической оптимизации, могут быть использованы для решения прямых и обратных задач, в том числе с зашумленными экспериментальными наблюдениями данными. Поскольку ФИНС могут использовать известные данные, придерживаясь любых заданных физических законов, выраженных в математической постановке задачи (уравнения, начальные и граничные условия, дополнительные данные), их можно отнести к классу нейронных сетей, которые решают задачи обучения с учителем. ФИНС могут применяться к решению дифференциальных уравнений и начально-краевых задач, имеющих наиболее общую форму: дифференциальные уравнения могут быть линейными или нелинейными, граничные условия могут являться условиями Дирихле, Неймана, смешанными или периодическими. При этом уравнения и соотношения математической постановки могут описывать разнообразные физические системы, включая как прямые, так и обратные задачи механики деформируемого твёрдого тела. Причём как прямая, так и обратная задача рассматриваются в рамках одной нейросетевой модели – с помощью подхода, основанного на использовании ФИНС обе проблемы могут быть решены «за один проход», т.е. в рамках одного цикла обучения (оптимизации). В таком контексте основной целью является «научить» нейронную сеть аппроксимировать заданные дифференциальные уравнения, начальные, граничные условия и дополнительные соотношения (в случае обратной задачи) путем определения матриц весов и векторов смещений нейронной сети приводящих к минимизации функции потерь, которая представляет собой сумму невязок (возможно, взвешенную), включающую невязки всех уравнений, начальных и граничных условий, а также дополнительных соотношений, составляющих математическую постановку задачи. Именно построение такой специальной функции потерь,

которая включает в себя полную информацию о математической модели, отличает ФИНС от других типов нейронных сетей. В тоже время сама математическая модель и является «учителем» для нейронной сети. Таким образом, нет необходимости в огромных базах тренировочных и проверочных наборов данных, которые необходимы, например, для обучения нейронной сети распознаванию образов или речи. Иными словами, такая нейронная сеть «заранее знает» чему она должна обучиться. ФИНС, в частности, представляют собой бессеточные методы, которые позволяют использовать решения как обычные функции после прохождения этапа обучения, а также позволяют получать дифференцируемые решения с использованием аналитических градиентов. Наконец, они предоставляют простой способ совместного решения прямых и обратных проблем, используя одну и ту же задачу оптимизации. Помимо решения дифференциальных уравнений (прямая задача), ФИНС можно использовать для решения обратных задач, например, определение характеристик потоков жидкости или параметров материала твёрдых деформируемых тел на основе данных, получаемых с датчиков. Фактически тот же код, который использовался для решения прямых задач, можно использовать для решения обратных задач с минимальными изменениями. Более того, в контексте обратного проектирования уравнения в частных производных могут использоваться в качестве дополнительных жестких ограничений, накладываемых на искомые решения. Таким образом, ФИНС могут быть использованы для решения задач математической физики в областях с очень сложной геометрией или очень большими размерами, которые трудно моделировать численно, а также решать обратные задачи и задачи оптимизации с ограничениями. В заключение отметим, что теория обратных задач, дополненная методами решений на основе технологий искусственного интеллекта – это новая, бурно развивающаяся область современной математики, которая находит многочисленные приложения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00217, <https://rscf.ru/project/20-19-00217/>

ОБ УРАВНЕНИЯХ ВЛАСОВА-ЭЙНШТЕЙНА И КОСМОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

Веденяпин В.В., Фимин Н.Н., Чечеткин В.М., Руссков А.А.

ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия
vicveden@yahoo.com

В классических работах (см. [1–4]), уравнения для полей предлагаются без вывода правых частей. Здесь мы даем вывод правых частей уравнений Максвелла и Эйнштейна в рамках уравнений Власова–Максвелла–Эйнштейна из классического, но немного более общего принципа наименьшего действия [5–11]. Получающийся вывод уравнений типа Власова даёт уравнения Власова–Эйнштейна отличные от того, что предлагались ранее [12–15]. Предлагается способ перехода от кинетических уравнений к гидродинамическим следствиям [5–8], как это делалось раньше уже самим А.А. Власовым [4]. В случае гамильтоновой механики от гидродинамических следствий уравнения Лиувилля возможен переход к уравнению Гамильтона–Якоби, как это делалось уже в квантовой механике Е. Маделунгом [16], а в более общем виде В.В.Козловым [17–18]. Таким образом получаются в нерелятивистском случае решения типа Милна–Маккри, а также нерелятивистский и релятивистский анализ решений типа Фридмана нестационарной эволюции Вселенной. Это позволяет проанализировать Лямбду Эйнштейна и темную энергию как причину ускоренного расширения Вселенной [19–23]

Литература

1. Фок В.А. // Теория пространства, времени и тяготения. М.: ЛКИ, 2007.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Теория поля. М.: Наука, 1988.
3. Вейнберг С. // Гравитация и космология. М.: Мир, 1975, 696 стр.
4. Власов А.А. // Статистические функции распределения. М.: Наука, 1966. 356 стр.
5. Веденяпин В.В., Негматов М.А. // О выводе и классификации уравнений типа Власова и МГД. Тождество Лагранжа и форма Годунова Теоретическая и математическая физика. ---2012. Т. 170. № 3. С. 468–480.
6. Веденяпин В.В., Негматов М.-Б. А., Фимин Н.Н. // Уравнения типа Власова и Лиувилля, их микроскопические, энергетические и гидродинамические следствия. Изв. РАН. Сер. матем. 2017. Т. 81. № 3. С. 45–82.
7. Веденяпин В.В., Негматов М.А. // О выводе и классификации уравнений типа Власова и магнитной гидродинамики. Тождество Лагранжа, форма Годунова и критическая масса. СМФН, 2013, том 47, С. 5–17.
8. В. В. Веденяпин, В. И. Парёнкина, С. Р. Свиричевский. // “О выводе уравнений электродинамики и гравитации из принципа наименьшего действия”, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 62:6 (2022), 1016–1029..
9. Веденяпин В.В., Воронина М.Ю., Руссков А.А. О выводе уравнений электродинамики и гравитации из принципа

- наименьшего действия. Доклады РАН, 2020, том 495, с. 9–139.
10. Vedenyapin V.V., Fimin N.N., Chechetkin V.M. //The system of Vlasov–Maxwell–Einstein-type equations and its nonrelativistic and weak relativistic limits . International Journal of Modern Physics D, 2020. V. 29. № 1. 23 p.
 11. Vedenyapin, V., Fimin, N., Chechetkin, V. //The properties of Vlasov–Maxwell–Einstein equations and its applications to cosmological models . European Physical Journal Plus. 2020. T. 135. № 5. С. 400.
 12. Cercigniani C., Kremer G.M. //The relativistic Boltzmann Equation: theory and applications. Boston, Basel, Berlin: Birghause, 2002.
 13. Choquet–Bruhat Y.// Introduction to general relativity, black holes and cosmology. New York: Oxford University Press. 2015.
 14. G.Rein.// Stability and instability results for equilibria of a (relativistic) self-gravitating collisionless gas—A review. Class.Quant.Grav. 40 (2023) 19, 193001. DOI: 10.1088/1361-6382/acf436
 15. Okabe T., Morrison P.J., Friedrichsen III J.E., Shepley L.C.// Hamiltonian Dynamics of Spatially-Homogeneous Vlasov-Einstein Systems. Physical Review D 84, 024011 (11pp) (2011)..
 16. Madelung E. Quantentheorie in hydrodynamischer form (Quantum theory in hydrodynamic form), Z Phys, 40 (1926), 322–326.
 17. Козлов В. В. Гидродинамика гамильтоновых систем //Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1 Матем. Мех., 1983, № 6, 10–22;
 18. Козлов В. В., Общая теория вихрей, Изд-во Удмуртского ун-та, Ижевск, 1998, 239с.
 19. Vedenyapin V.V., Fimin N.N., Chechetkin V.M.// Cosmological aspects of hydrodynamic treatment of the Einstein–Vlasov equations. Eur. Phys. J. Plus., 2022, т.137, № 9..https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03257-7.
 20. В.В. Веденяпин, А. А. Бай, А. Г. Петров, //“О выводе уравнений гравитации из принципа наименьшего действия, релятивистских решениях Милна-Маккри и о точках Лагранжа”, Докл. РАН. Матем., информ., проц. упр., 514:1 (2023), 69–73.
 21. V. V. Vedenyapin , A. A. Bay.// Least action principle for gravity and electrodynamics, the Lambda-term and the analog of Milne–McCrea solution for Lorentzian metric. Eur. Phys. J. Plus (2024) 139:111. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-04885-x.
 22. V.V. Vedenyapin , A.A. Bay , V.I. Parenkina and A.G. Petrov.// Minimal Action Principle for Gravity and Electrodynamics, Einstein Lambda, and Lagrange Points. Markov Processes Relat. Fields 29, 515 – 532 (2023).
 23. В. В. Веденяпин, Н. Н. Фимин, В. М. Чечеткин, //“Уравнения типа Власова–Маквелла–Эйнштейна и их следствия. Приложения к астрофизическим задачам”, ТМФ, 218:2 (2024), 258–279. DOI: https://doi.org/10.4213/tmf10551.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СРЕДАХ

Вельмисов П.А., Тамарова Ю.А.

Ульяновский государственный технический университет, Россия
velmisov@ulstu.ru

Рассматриваются математические модели механической системы «трубопровод – датчик давления», которая предназначена для контроля за изменением давления в газожидкостных средах.

Приведем в качестве примера математическую постановку задачи, соответствующей плоской линейной модели системы «трубопровод-датчик давления»

$$\phi_{tt} = a_0^2 (\phi_{xx} + \phi_{yy}), \quad x \in (0, l), \quad y \in (0, h), \quad (1)$$

$$\phi_y(x, 0, t) = \phi_y(x, h, t) = 0, \quad x \in (0, l), \quad (2)$$

$$\phi_x(l, y, t) = w_t(y, t), \quad y \in (0, h), \quad (3)$$

$$-\rho_0 \phi_t(0, y, t) = P_*(y, t), \quad y \in (0, h), \quad (4)$$

$$P_0 - \rho_0 \phi_t(l, y, t) - \tilde{P} = L(w(y, t)), \quad y \in (0, h). \quad (5)$$

Уравнение (1) для потенциала скорости $\phi(x, y, t)$ описывает движение рабочей среды в трубопроводе (в модели идеального сжимаемого газа); (2),(3) - условия непротекания соответственно стенок трубопровода и поверхности упругого элемента, являющегося составной частью датчика давления; условие (4) задает закон изменения давления $P_*(y, t)$ рабочей среды на выходе из камеры сгорания в двигателе (на входе в трубопровод $x = 0$); уравнение (5) описывает динамику упругого элемента. Дифференциальный (или интегро-дифференциальный) оператор $L(w)$ в (5) задается в зависимости от выбранной модели деформируемого тела.

В (1) – (5) индексы x, y, t снизу обозначают частные производные по координатам x, y и времени t ; $w(y, t)$ - деформация упругого элемента датчика, расположенного в конце трубопровода $x = l$; $P_0, \rho_0, a_0, \tilde{P}$ - некоторые физические постоянные.

В одномерном случае рассматривается также нелинейная модель механической системы «трубопровод-датчик давления»

$$\Phi_{tt} + 2\Phi_x \Phi_{xt} + \Phi_x^2 \Phi_{xx} = \left[a_0^2 - (\chi - 1) \left(\Phi_t + \frac{1}{2} \Phi_x^2 \right) \right] \Phi_{xx}. \quad (6)$$

$$P(0, t) = P_0 + P_*(t), \quad (7)$$

$$u(l_*(t), t) = w_t(t), \quad l_* = l + w(t), \quad (8)$$

$$L(w(t)) = P(l_*(t), t). \quad (9)$$

Уравнение (6) для потенциала скорости $\Phi(x, t)$ описывает движение рабочей среды (в модели идеального сжимаемого газа) в трубопроводе; условие (7) задает закон изменения давления $P_*(t)$ рабочей среды на выходе из камеры сгорания (на входе в трубопровод $x = 0$); (8) – условие непротекания на поверхности поршня, являющегося составной частью датчика давления, расположенного на выходе из трубопровода $x = l$ (закон движения поршня $x = l + w(t)$); уравнение (9) описывает движение поршня, $L(w(t))$ - линейный или нелинейный дифференциальный оператор. При этом давление в потоке определяется интегралом Лагранжа-Коши:, а скорость потока в трубопроводе

$$P(x, t) = P_0 \left[1 - \frac{\chi - 1}{a_0^2} \left(\Phi_t + \frac{1}{2} \Phi_x^2 \right) \right]^{\frac{\chi}{\chi - 1}}$$

находится по формуле $u = \Phi_x$.

Задачи (1)-(5) и (6)-(9) необходимо дополнить начальными условиями. Для указанных начально-краевых задач предложены численно-аналитические методы решения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-21-00517.

ГАЗОДИНАМИКА В ПРОЦЕССЕ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Верезуб Н.А., Простомолотов А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
verezub@ipmnet.ru

Представлены результаты математического моделирования газодинамики инертного газа (аргона) в разреженной атмосфере ростовой камеры установки Редмет-10 для выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского. Рассмотрены течения газа в холодной (при комнатной температуре) и в горячей (во время ростового процесса) камерах. Анализируются конвективные течения газа для двух способов впуска газа в ростовую камеру: 1 – основной выпуск только через верхнее центральное отверстие и 2 – при дополнительном к основному впуске через боковое отверстие камеры [1]. Выпуск газа в обоих случаях производился через центральное отверстие на дне ростовой камеры. В случае холодной камеры изучается вынужденная конвекция с использованием модели несжимаемого идеального газа. В случае горячей камеры применяется как модель неизотермического сжимаемого идеального газа, так и модель слабо сжимаемого газа в приближении Буссинеска, на основе которых изучается структура вихреобразования, вызванная совместным действием вынужденной и термогравитационной конвекций. Обсуждается влияние различных способов впуска газа на конвективный перенос монооксида кремния, испаряющейся со свободной поверхности расплава.

На Рис. 1а: 1 – водоохлаждаемая стальная оболочка, 2 – монокристалл кремния, 3 – расплав кремния, 4 – фронт кристаллизации, 5 – свободная поверхность расплава, 6 – кварцевый тигель, 7 – графитовая подставка тигля, 8 – резистивный нагреватель, 9 – графитовый экран, 10 – верхнее отверстие для центрального впуска газа, 11 – боковое отверстие для дополнительного впуска газа, 12 – нижнее отверстие для центрального

вытекания газа. Белыми стрелками показаны направления втекания и вытекания газа, черная стрелка показывает направление вытягивания кристалла из расплава со скоростью V . Справа от оси – расчетная сетка треугольных элементов. На Рис. 1б показаны потоки газа в холодной камере при центральном и боковом втекании газа.

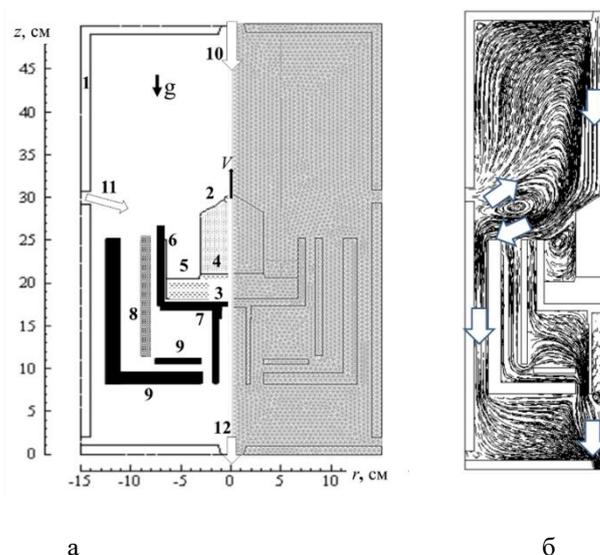


Рис. 1. Компоненты ростовой камеры и расчетная сетка для установки Редмет-10 (а) и течение газа (б).

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124013000674-0).

Литература

1. Критская Т.В., Журавлев В.Н., Бердников В.С. Возможность использования потока инертного газа для управления качественными характеристиками выращиваемых монокристаллов кремния // Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22. № 3. С. 158–167. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-3-158-167>

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН С ОТВЕРСТИЯМИ

Вестяк В.А.¹, Мартиросов М.И.¹, Смагин Е.И.²

1 - Московский авиационный институт, Москва, Россия

2 - ПАО "Яковлев", Москва, Россия

v.a.vestyak@mail.ru

В настоящее время происходит интенсивное внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в силовые ответственные и несилловые элементы конструкций в различных областях промышленности, что способствует, в том числе, повышению весовой эффективности разрабатываемой техники [1]. Однако, помимо положительного эффекта при проектировании следует учитывать ещё и негативные факторы, сопровождающие широкое внедрение ПКМ [2]. Применение ПКМ сопровождается исследованиями свойств материала и конструкции в местах соединений.

Для оценки прочности ортотропных пластин с концентраторами напряжений в виде нагруженного и свободного отверстий в настоящее время применяют различные расчётно-экспериментальные методы. Например, в работе [3] приводится решение задачи Кирша, которое демонстрирует напряжённо-деформированное состояние (НДС) изотропной полосы прямоугольной формы со свободным (незаполненным) круговым отверстием в условиях растяжения.

В настоящей работе представлены результаты расчётно-экспериментальных исследований прочности ортотропных пластин со свободным и нагруженным отверстиями. Рассмотрены различные методы испытаний для образцов, моделирующих работу конструкции с проходящей и сминающей нагрузкой, а также образцы,

моделирующие совместное действие указанных нагрузок [4-6]. На образцах со свободным и нагруженным отверстиями проведены экспериментальные исследования НДС и остаточной прочности ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна. Представлены подходы оценки области несущей способности двухсрезного соединения с учётом совместного воздействия смятия и проходящей нагрузки. Разработаны конечно-элементные модели образцов, использующие принципы послойного моделирования монослоёв [7,8]. Обоснованы граничные условия в численном эксперименте, описаны критерии разрушения для ПКМ, применяемые в расчётах. Проведены расчёты на несущую способность ортотропной пластины с отверстием в программном комплексе LS-DYNA [9] с использованием неявного метода решения. В ходе проведенного анализа рассмотрены причины различного поведения и характера разрушения образцов для разнообразных укладок (симметричные, сбалансированные), представлен послойный анализ разрушения. Показаны преимущества исследования несущей способности пластин и соединений при комбинированном нагружении. Проведено сравнение экспериментальных данных для различных схем армирования с учётом совместного действия смятия и проходящей нагрузки и без неё. Показано, что расчётные и экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются между собой.

Литература

1. Чернышев С.Л. и др. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу. – М.: ЦАГИ, 2014. 280 с.
2. Composite Material Handbook. Volume 3. Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. – SAE International, 2012. 900 p.
3. Варданян Г.С., Андреев В.И., Агаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – М.: изд-во АСВ, 1995. 572 с.
4. ГОСТ 33498-2015 Метод испытания на смятие. – М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
5. ГОСТ Р 56788-2015 Метод определения прочности при сжатии образцов ламинатов с открытым – М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
6. ГОСТ Р 56790-2015 Метод определения прочности на смятие и трансферной прочности ламинатов, соединенных двумя болтами. - М.: Стандартинформ, 2016. 35 с.
7. Лехницкий С.Г. - Теория упругости анизотропного тела – М.: изд-во Наука, 1977. 417 с.
8. LS-Dyna Keywords user's manual Volume II. Livermore Software Technology corp 2016. 1479 p.
9. LS-Dyna Keywords user's manual Volume I. Livermore Software Technology corp 2016. 2682 p.

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ДВУМЯ ЖИДКОСТЯМИ, СОВЕРШАЮЩИМИ НЕМАЛЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Вин Ко Ко, Темнов А.Н.

МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, Россия
win.c.latt@gmail.com

В предыдущих работах авторы [1-2] показали, что механическим аналогом малых колебаний двух жидкостей, целиком заполняющий цилиндрический бак, является физический маятник, состоящий из двух точечных масс, соединённых невесомым стержнем, закреплённом в цилиндрическом шарнире. При изучении нелинейных колебаний тела с жидкостью уравнения движения значительно усложняются и рядом авторов делалась попытка исследования таких колебаний с помощью наглядной нелинейной механической модели [3]. Однако из-за сложности явления и громоздкости уравнений приходится рассматривать частные случаи движения и принимать дополнительные гипотезы. Так, в работе [3] для плоского случая движения применяется прием «делинеаризации», когда линейная модель математического маятника используется и при немалых углах отклонения.

В предлагаемой работе показывается, что нелинейные колебания поверхностей раздела двух жидкостей, целиком заполняющий цилиндрический бак, является математический маятник, состоящий из точечной массы раной сумме колеблющихся масс верхней и нижней жидкости и невесомого стержня, закреплённого в сферическом шарнире. В работе приведены нелинейные уравнения сил и моментов, полученные через теоремы об изменении количества движения и кинетического момента рассматриваемой механической системы, а также составлены дифференциальные уравнения движения для обобщенных координат α, β механического аналога:

$$\alpha + \sigma^2 \alpha + d_1(\alpha^2 \alpha + \alpha^2 \alpha + \alpha \beta \beta + \alpha \beta^2) + d_2(\beta^2 \alpha + 2\beta \alpha \beta - \alpha \beta \beta - 2\alpha \beta^2) = 0; \quad (1)$$

$$\beta + \sigma^2 \beta + d_1(\beta^2 \beta + \alpha^2 \beta + \alpha \beta \alpha + \beta \beta^2) + d_2(\alpha^2 \beta + 2\alpha \alpha \beta - \alpha \beta \alpha - 2\beta \alpha^2) = 0. \quad (2)$$

В работе исследован сравнительный анализ устойчивости нелинейных колебаний механической модели тела с жидкостями. Построены амплитудно-частотные характеристики и области неустойчивости вынужденных колебаний механической модели тела с жидкостями.

Литература

1. Вин Ко Ко колебания многослойной жидкости в полостях неподвижных и подвижных тел: дис. канд. Физ.-мат. Наук: Д 002.240.01.- Институте проблем механики Российской академии наук, Москва, 2018-157 с.
2. Ко Ко В., Темнов А.Н. // Теоретическое исследование эффектов колебаний двух несмешивающихся жидкостей в ограниченном объёме // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021, № 69. DOI: 10.17223/19988621/69/8
3. Л.В. Докучаев // Нелинейная динамика летательных аппаратов с деформируемыми элементами. – М.: машиностроение, 1987. 232 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС ПЛОТИНЫ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС ПРИ ДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Витохин Е.Ю.¹, Мосягина А.А.¹, Иванов П.С.¹, Осеев В.Г.²

1 - АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», Россия

2 - Филиал АО «ЕвроСибЭнерго» «Красноярская ГЭС, Россия

vitokhineyu@vniig.ru

Обеспечение безопасной и надежной эксплуатации гидротехнических сооружений является важнейшей задачей эксплуатирующих организаций. Особенную важность эта задача имеет для сооружений первого класса, которым является плотина Красноярской ГЭС. Такие ответственные сооружения, расположенные в сейсмически активных районах, должны отвечать требованиям сейсмостойкости, в соответствии с актуальными данными о сейсмичности района. Отечественные нормативные документы позволяют делать вывод о сейсмостойкости сооружения на основе численных расчетных моделей с использованием метода конечных элементов.

В представленной работе описывается процесс создания динамической конечно-элементной модели плотины Красноярской ГЭС совместно со скальным основанием и водохранилищем в программном продукте Code_Aster. Произведена проверка точности созданной модели с помощью собственных форм и частот сооружения с использованием акустических элементов. Изучен вопрос влияния неотражающих граничных условий и способа задания сейсмического воздействия на решение задачи колебания плотины методом прямого интегрирования.

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ ИМПЕЛЛЕРНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ В ОБЛИК ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО САМОЛЁТА

Пигусов Е.А., Волков А.И., Кузин С.А.

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского,

Жуковский, Россия

pigusoff@gmail.com

В настоящее время уделяется большое внимание внедрению гибридных и полностью электрических силовых установок на самолетах, позволяющих повысить взлетно-посадочные и крейсерские аэродинамические характеристики. Одним из вариантов реализации электрической силовой установки является импеллерная распределённая силовая установка (ИРСУ), интеграция которой в облик перспективного регионального самолёта (ПРС) рассматривается в данной работе. В работах [1-3] была показана эффективность применения ИРСУ, интегрированной в закрылок, а именно существенное повышение несущих свойств крыла на взлётно-

посадочных режимах, что обеспечивает расширение возможностей базирования самолета. Отдельный интерес представляет эффективность применения ИРСУ на крейсерском режиме полета.

С целью оценки эффективности интеграции ИРСУ на крейсерском режиме полета выполнены расчётные исследования аэродинамических компоновок ПРС с различным количеством импеллеров. Рассмотрены три варианта ПРС: базовая компоновка самолета без ЭУО; вариант с 10 импеллерами в каждом закрылке с ИРСУ; вариант с 14 импеллерами в каждом закрылке с ИРСУ с измененной хвостовой частью базового профиля крыла в районе установки импеллеров. Расчетные исследования вязкого обтекания компоновок ПРС выполнены при помощи программного комплекса, основанного на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых $k-\omega$ SST-моделью турбулентности с базовыми значениями параметров, в стационарной постановке.

В результате расчётных исследований показано, что применение ИРСУ на крейсерском режиме полета приводит к росту коэффициента лобового сопротивления (без учета тяги импеллеров) ввиду формирования вихревого обтекания мотогондолы ИРСУ. Также показано, что увеличение числа импеллеров в совокупности с модификацией хвостовой части базового профиля крыла в районе установки импеллеров приводит к повышению аэродинамических характеристик ПРС с ИРСУ ввиду уменьшения интенсивности индуктивных вихрей.

Литература

1. В. Г. Кажан, С. А. Кузин // Численное исследование аэродинамических характеристик крыла с импеллерными двигателями при различных вариантах интеграции, Журнал «Ученые записки ЦАГИ», Том 53, № 6, 2022, С. 71 – 81
2. А. И. Волков, М. В. Долотин, В. Г. Кажан, С. А. Кузин, Е. А. Пигусов // Метод приближенной оценки несущих свойств крыла конечного размаха с интегрированной распределенной силовой установкой, Журнал «Ученые записки ЦАГИ», Том 54, № 6, 2022, С. 12 – 27
3. С. А. Кузин // Экспериментальные исследования аэродинамической эффективности применения импеллеров для повышения несущих свойств крыла, XXXIV Научно-Техническая Конференция по Аэродинамике, 2024, С. 67

РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЗАИМНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСТАЛОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Волков И.А., Литвинчук С.Ю., Юдинцева А.И., Волков А.И.

*ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", Нижний Новгород, Россия
pmpmtmvgavt@yandex.ru*

Рассматриваются процессы деградации начальных прочностных свойств поликристаллических конструкционных сплавов при деградиционных механизмах, сочетающих малоцикловую усталость и длительную прочность материала. С позиций механики поврежденной среды (МПС) развита математическая модель, описывающая процессы циклического вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при многоосных непропорциональных режимах комбинированного термомеханического нагружения. Модель состоит из трех взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих циклическое вязкопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения; эволюционных уравнений описывающих кинетику накопления повреждений; критерия прочности поврежденного материала.

Модель вязкопластичности основана на представлении о существовании в пространстве напряжений поверхностей пластичности и ползучести и принципе градиентальности векторов скоростей пластических деформаций и деформаций ползучести к соответствующей поверхности в точке нагружения. Данный вариант уравнений состояния отражает основные эффекты циклического вязкопластического деформирования материала для произвольных сложных траекторий нагружения.

Вариант кинетических уравнений накопления повреждений основан на введении скалярного параметра поврежденности, базируется на энергетических принципах и учитывает основные эффекты образования, роста и слияния микродефектов при произвольных сложных режимах комбинированного термомеханического нагружения. Предложена совместная форма эволюционного уравнения накопления повреждений в областях

малоцикловой усталости и длительной прочности материала.

В качестве критерия прочности поврежденного материала используется условие достижения величиной поврежденности критического значения. Приводятся результаты численного моделирования процессов деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при взаимном влиянии малоцикловой усталости и длительной прочности материала. В первом примере приведен результат экспериментально-теоретических исследований закономерностей изменения скалярных и векторных свойств стали 30ХГСА в экспериментах на сложное нагружение по двухзвенным ломаным траекториям непропорционального деформирования в условиях ползучести. Показано, что с изменением скорости деформирования в следствии наличия реономных эффектов изменяется уровень напряжений и происходит перераспределение вклада пластических деформаций и деформаций ползучести в общий процесс деформирования лабораторного образца.

Во втором примере решена задача расчета кинетики НДС и накопления повреждений в лабораторных образцах из стали Р92 при «жестком» нагружении – одноосном растяжении-сжатии с временными выдержками на максимальной деформации и без них для двух амплитуд деформаций.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных показали, что предложенная модель МПС качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает долговечность материалов при взаимном влиянии малоцикловой усталости и длительной прочности материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00138).

РЕШЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ ДЛЯ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Вуколов Е.А., Евард М.Е.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
e.a.vukolov@yandex.ru

Сплавы с памятью формы (СПФ) находят широкое применение в технике благодаря мартенситным превращениям, вызывающих ряд особых эффектов, в числе которых способность накапливать деформацию под нагрузкой в процессе охлаждения и восстанавливать форму в процессе нагревания после предварительной деформации. В качестве рабочих тел устройств, реагирующих на изменение температуры, могут выступать элементы цилиндрической формы, находящиеся в тепловом контакте со средой. Цель данного исследования – сравнить виды осевой нагрузки цилиндра и показать влияние процессов теплообмена и теплопроводности, протекающих во времени, на процесс изменения формы цилиндрического тела из СПФ.

Для задания кинетики мартенситных превращений использовалась микроструктурная модель [1]. В качестве материала выступал $Ti_{50}Ni_{50}$ с характеристическими температурами мартенситных превращений: $M_f = 303$ К, $M_s = 323$ К, $A_s = 340$ К, $A_f = 360$ К, скрытая теплота превращения: $Q_0 = -150$ МДж/м³. Рассматривались две задачи о растяжении сплошного цилиндра (рис. 1). В задаче (а) на цилиндр действует осевая сила, которая прикладывается к цилиндру на первом этапе нагружения и затем остается постоянной до конца эксперимента. В задаче (б) на одном из оснований цилиндра закреплен элемент-пружина с жесткостью k , другой конец пружины на первом этапе нагружения смещается по оси z до определенной величины (перемещение u на рис. 1б), а затем он фиксируется. В обеих задачах после этапа приложения нагрузки происходит охлаждение в течение 60 с до температуры 300 К и выдержка в течение 300 с. Затем температуру окружающей среды повышают до 415 К со скоростью нагрева 11.5 К/с, после чего цилиндр выдерживают в течение 300 с при постоянной температуре. При этом на всех этапах нагружения учитываются процессы теплопроводности внутри цилиндра и процесс теплообмена с окружающей средой через боковую поверхность.

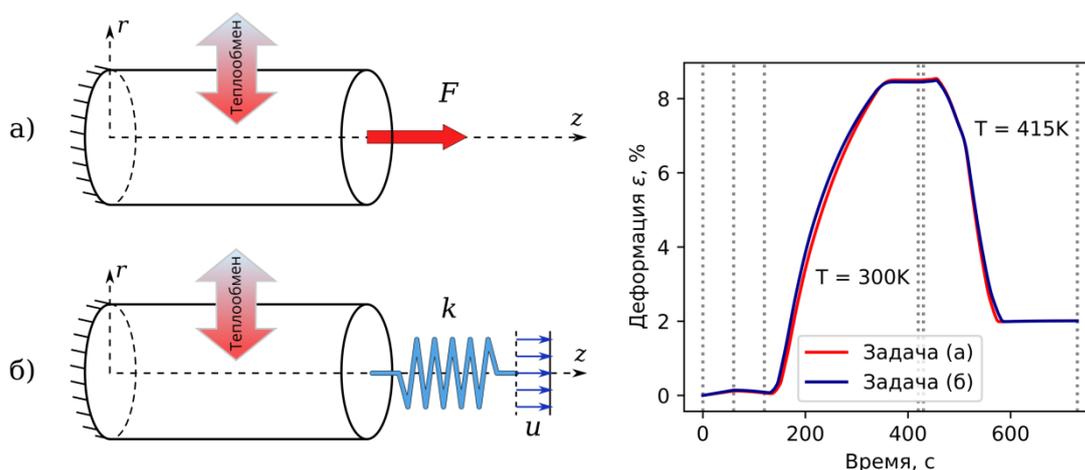


Рис. 1. Две постановки задачи об осевом растяжении сплошного цилиндра из СПФ (слева) и сравнение результатов моделирования (справа). На графике показано изменение относительной деформации цилиндра по оси z , этапы численного моделирования разделены на графике вертикальными пунктирными линиями.

Моделирование показало, что при подборе начального растяжения элемента-пружины в задаче (б) можно получить близкую к задаче (а) временную зависимость осевой деформации цилиндра из СПФ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-21-00167.

Литература

1. Belyaev F. et al. // A Microstructural Model of SMA with Microplastic Deformation and Defects Accumulation: Application to Thermocyclic Loading -- Mater. Today Proc. Elsevier Ltd., 2015. Vol. 2. P. S583--S587

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА ПРИ ПОДГОТОВКЕ НЕФТИ

Габдуллахатов А.И., Шепелев И.А.

*Альметьевский государственный технологический университет Высшая школа нефти,
Альметьевск, Россия
gabdullahatov@gmail.com*

В работе выполняется оценка возможности снижения операционных затрат на процесс подготовки нефти путем целенаправленного воздействия на конкретные параметры процесса для повышения КПД печей. Для достижения этой цели разрабатывается информационная система на базе искусственного интеллекта. Она позволяет систематически анализировать большое количество данных с высокой скоростью и точностью, предсказывать значения КПД печей в различных условиях и тем самым определять наиболее эффективные режимы работы печей. В рамках проекта разработана информационная система контроля за технологическим процессом на объектах подготовки нефти. В ходе работы определена зависимость качественных показателей готовой нефти от остальных параметров процесса подготовки, определена степень прогнозируемости качественных показателей и потенциал модели по сокращению расхода топливного газа.

Система позволяет прогнозировать КПД в реальном времени, что позволяет оперативно реагировать на возможные падения КПД, гибко настраивать расход нефти через печи и вовремя принимать меры по недопущению работы печей в неэффективных режимах. Благодаря этой системе есть возможность отрегулировать процесс для минимизации расходов топливного газа и повышения эффективности производственной линии. Разработанная информационная система обеспечивает высокую степень точности прогноза по ограниченному набору параметров.

О ЯВЛЕНИИ АНТИЛОКАЛИЗАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН И ЕГО СВЯЗИ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ

Гаврилов С.Н., Шишкина Е.В., Мочалова Ю.А.

Институт проблем машиноведения РАН, Россия
serge@pdmi.ras.ru

Обсуждается волновое явление, которое наблюдается в безграничных континуальных и дискретных системах с включениями, где при определенном соотношении параметров возможна локализация линейных волн. Антилокализация нестационарных волн [1-4] — обращение в ноль главного члена нелокализованной (распространяющейся) компоненты нестационарного волнового поля в окрестности включения. На примере нескольких механических систем, где частоты локализованных мод находятся в полосе непропускания, демонстрируется существование явления антилокализации. Оно наблюдается для любых значений параметров системы, исключая наборы параметров, соответствующие границе области существования локализованной моды в пространстве параметров задачи. Обсуждается влияние антилокализации на решение нестационарной задачи дифракции упругих волн на точечном включении (образование тени за включением).

Литература

1. E.V. Shishkina, S.N. Gavrilov // Unsteady ballistic heat transport in a 1D harmonic crystal due to a source on an isotopic defect. *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 35, 431–456 (2023). DOI: 10.1007/s00161-023-01188-x
2. E.V. Shishkina, S.N. Gavrilov, Yu.A. Mochalova // The anti-localization of non-stationary linear waves and its relation to the localization. The simplest illustrative problem. *Journal of Sound and Vibration*, 553, 117673 (2023). DOI: 10.1016/j.jsv.2023.117673
3. S.N. Gavrilov, E.V. Shishkina, Yu.A. Mochalova // An example of the anti-localization of non-stationary quasi-waves in a 1D semi-infinite harmonic chain. *Proc.Int. Conf. DAYS on DIFFRACTION 2023*, pp. 67–72. DOI: 10.1109/DD58728.2023.10325733.
4. S.N. Gavrilov, E.V. Shishkina // Non-stationary elastic wave scattering and energy transport in a one-dimensional harmonic chain with an isotopic defect. *Continuum Mechanics and Thermodynamics* (2024). DOI: 10.1007/s00161-024-01289-1

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛИСТАХ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ

Агамиров В.Л.^{1,2}, Агамиров Л.В.^{1,2}, Фролова Е.А.², Гаева А.П.¹

*1 - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия*

*2 - Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Москва,
Россия*
gaeva.sashulya@mail.ru

В настоящее время широкое развитие нейронных сетей привело к внедрению данных технологий во все сферы производства. В то же время актуальна задача повышения точности и оперативности выявления дефектов и повреждений в промышленности, в том числе в реальном времени.

В этой связи в настоящей работе представлены последние достижения в области применения искусственного интеллекта для контроля качества металлопродукции. Основное внимание уделено разработке и обучению нейронных сетей, способных эффективно обнаруживать и классифицировать различные типы дефектов на поверхности и внутри стальных изделий.

В работе рассмотрено, как использование данных технологий позволяет значительно повысить скорость и точность диагностики по сравнению с традиционными методами визуального и инструментального контроля. Приводятся результаты испытаний моделей на реальных промышленных данных, подтверждающие высокую эффективность предложенного подхода. Также обсуждаются возможности интеграции системы обнаружения дефектов в существующие производственные линии и потенциальное влияние на сокращение времени простоя оборудования и улучшение качества продукции.

В заключение авторы рассматривают перспективы развития данной области и предлагают направления для будущих исследований. Данная работа демонстрирует значительный потенциал применения искусственного

интеллекта в металлургической промышленности, а также повышение эффективности и надежности производственных процессов.

КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ ПРИ ГДИ. ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

**Гарифуллина Р.А.¹, Силов В.Ю.¹, Ридель А.А.¹, Зыков А.С.¹, Щербинин С.А.^{2,3},
Михеев Е.В.²**

1 - Группа Компаний «Газпромнефть»

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

*3 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
garifullina.ra@gazprom-neft.ru*

В работе предлагается рассмотрение колебаний газа («эффект поршневания»), возникающих при гидродинамических исследованиях скважин [1]. Показано, что «поршневание» возникает только в скважинах, сообщающихся с высокопроницаемыми коллекторами. Выделение колебаний газа в общем сигнале на кривых восстановления давления, позволяет по амплитуде (на качественном уровне) определять вероятный диапазон проводимости (проницаемости) пласта. С использованием имеющейся базы гидродинамических исследований скважин возможно создание математической модели, которая, настраиваясь на параметры колебательных процессов, позволит выполнять количественную оценку свойств пласта.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПОСТАНОВКИ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ С ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЖЕНИЕМ ХРУПКОГО СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Калмыков А.П.^{1,2}, Герасимов С.И.^{1,2}, Кузьмин В.А.¹

1 - ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Россия

2 - ИПМ РАН, Россия

s.i.gerasimov@mail.ru

Любая методика испытаний должна предусматривать средства регистрации быстропротекающих динамических процессов. Необходимым элементом любой измерительной системы является механические, электрические и оптические датчики. Предпочтение отдается бесконтактным методам, при стремлении унифицировать методы диагностики как в отношении самих испытываемых образцов (или объектов испытания (ОИ)), так и диагностики применяемой испытательной установки. В работе это демонстрируется использованием скоростной видеосъемки (бесконтактный оптический датчик) в отношении не только ОИ, но и, например, диагностики метательной установки вместо контактных тензодатчиков, контактных датчиков для измерения скорости ударника - снаряда.

Базируясь на применении оптических датчиков, к которым можем отнести и переносные импульсные рентгенографические аппараты, решен ряд задач, представляющих прикладной интерес в исследовании динамического нагружения бетона:

- Размеры бетонной конструкции и ударника, которые удовлетворяют условию внедрения ударника в полубесконечную преграду и возможности его визуализации, внутри преграды имеющимися средствами регистрации;
- размеры образующейся каверны в полубесконечной преграде;
- влияние предварительных методов разупрочнения на разрушение бетонной преграды;
- критические скорости ударников при которых нарушается режим движения твердого тела;
- возможность использования классической трехчленной модели для описания внедрения ударника в бетон.

В частности, показано: длина бетонного блока должна составлять не менее двух глубин проникания, а его диаметр не менее 22 - 25 калибров ударника; смазка не оказывает влияния на интенсивность абразивного стачивания; критическая скорость находится в диапазоне между 1948 м/с и 2017 м/с.



Рисунок - Характерный вид модели из прочной стали после пробития бетонной преграды 300x300x100 (мм³)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА НА БАЗЕ АНАЛОГОВЫХ СРЕДСТВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ИЗУЧЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРОНИКАНИЯ В ЛЕД

Калмыков А.П.^{1,2}, Герасимов С.И.^{1,2}, Капинос С.А.¹

1 - ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", Россия

2 - ИПМ РАН, Россия

s.i.gerasimov@mail.ru

Большую роль в изучении динамического поведения ледовых сред играют экспериментальные исследования.

Это, в свою очередь, требует применение надежных, эффективных методов регистрации, что в условиях высокоскоростного метания с использованием ствольных или взрывных технологий означает необходимость совершенствования или создания новых недорогих устройств аналоговой визуализации, позволяющих в условиях интенсивных нагрузок, осколочных полей, фоновых засветок сохранять работоспособность и получать необходимую информацию как на стадии подхода и внедрения в преграду (вылета из нее), так и при движении внутри, в общем случае, непрозрачной среды.

Представлен аналоговый оптико-рентгенографический комплекс для изучения процессов внедрения высокоскоростных ударников в сплошные прочные среды.

Описано применение комплекса при проведении опытов по прониканию в соленый и пресный лед ударников калибром 14,5мм со средней скоростью $V_0=1000$ м/с. Внедрение осуществлялось по нормали к лицевой поверхности преграды.

Ледовая преграда, используемая в опытах, имела размеры (300x170x450)мм³.

По полученным в эксперименте временам срабатывания датчиков в преграде (т.е. по зависимостям $h(t)$) определяли динамическую твердость H_d и гидродинамический коэффициент сопротивления C при помощи метода наименьших квадратов применительно к схеме движения в форме Понселе.

Заметно, что H_d растет с падением температуры в пресном и в соленом льду. Так же видно, что при низких температурах (ниже минус 12⁰С) пресный лед значительно прочнее соленого.

Следует подчеркнуть, что все показанные в работе параметры получены в предположении независимости их от скорости в диапазоне начальных скоростей $V_0 \approx 900...1100$ м/с, при этом длина измерительного участка зависимости $h(t)$ во всех опытах была одна и та же.

Размеры образующейся во льду каверны определялись путем обмера (с учетом коэффициента увеличения $K_y=1,28-1,32$) зафиксированной полости на рентгеновском снимке. Радиус каверны определялся как половина диаметра полости на фиксированном расстоянии. Размеры образующейся каверны в пресном и соленом льду при реализованных в опытах условиях внедрения практически, с учетом погрешности измерений не зависят от температуры, в соленом льду каверна, в среднем, на 20% шире, чем в пресном.

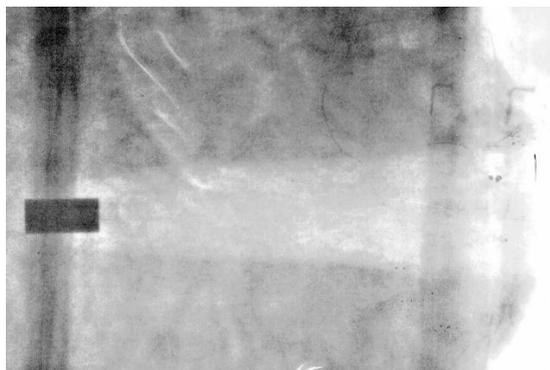


Рисунок - Типовая рентгенограмма движения ударника во льду (движение справа налево).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОБЛОЧНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гермамо А.И., Фролов В.А.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
Самара, Россия
germamo@mail.ru*

Статья посвящена экспериментальному исследованию несущих характеристик моделей многоблочных летательных аппаратов, состоящих из корпуса и двух равновеликих внешних блоков, размещённых в горизонтальной плоскости симметрии (рис.1). В работе использовался тензометрический способ измерения сил, действующих на модель. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Самарского университета [1]. Измеренные нормальные силы, действующие на модель, обрабатывались методом наименьших квадратов. Было установлено, что при малых углах атаки зависимости коэффициента нормальных сил имеют линейный характер. Что позволило определить производные коэффициента нормальной силы по углу атаки. Определённые производные коэффициентов нормальных сил по углу атаки для изолированных корпусов и блоков оказались примерно одинаковы и равны приблизительно 0,041-0,045 1/град. Такой результат наблюдается для различных форм и удлинений головных частей, исследованных тел. Установлено, что зависимость производной коэффициента нормальной силы по углу атаки для компоновки в целом от относительного диаметра внешних блоков (рис. 2) (где введены обозначения: $\bar{d} = d / D$; d – диаметр внешнего блока; D – диаметр корпуса; $C_{уком}^\alpha$ – производная коэффициента нормальной силы по углу атаки для компоновки корпуса и двух внешних блоков) носит немонотонный характер и имеет максимум при относительном диаметре внешних блоков приблизительно равным величине 0,9. В исследовании за характерную площадь была принята суммарная площадь всех трёх тел в поперечной плоскости. Результаты [2-6], представленные на рис. 2, позволяют определять несущие характеристики компоновок многоблочных летательных аппаратов, используя только относительный диаметр внешнего блока во всём диапазоне дозвуковых скоростей обтекания.

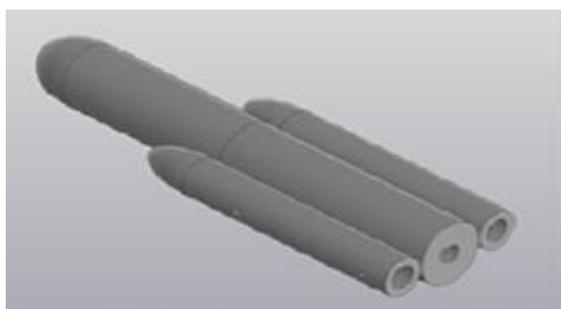


Рис. 1. Модель многоблочного летательного аппарата с внешними блоками в горизонтальной плоскости

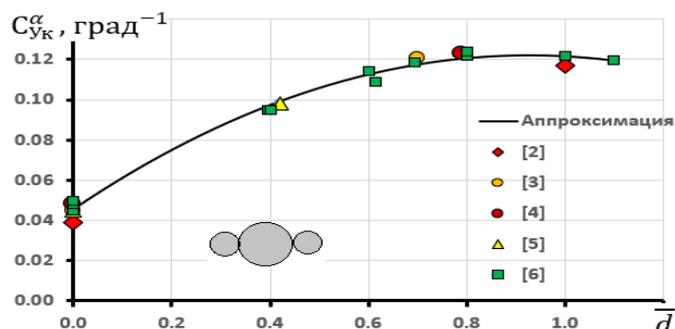


Рис. 2. Зависимость производной коэффициента нормальной силы по углу атаки от относительного диаметра блока

Литература

1. В.А. Комаров и др. Вузовская учебно-исследовательская аэродинамическая труба // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». – 2006. № 10. – С. 34-41.
2. К.П. Петров Аэродинамика транспортных космических систем. 2000. 368 с.
3. А.А. Новикова, В.А. Фролов Экспериментальное исследование интерференции боковых ускорителей, расположенных в перпендикулярных плоскостях симметрии, и корпуса ракеты-носителя // Всерос. конф. мол. учёных-механиков (YSM-2020). 2020. С. 112.
4. Д.И. Савинов и др. Исследование интерференции корпуса ракетоносителя с боковыми ускорителями и крыльями // В сб.: XIV Королёвские чтения. Междунар. молодёж. науч. конф., 2017. С. 220-221.
5. В.А. Веремчук и др. Исследование влияния боковых ускорителей на аэродинамические характеристики ракеты-носителя // В сб.: XIII Королёвские чтения. Междунар. молодёж. науч. конф., 2015. С. 142-143.
6. А.У. Гергатов, В.А. Фролов Экспериментальное определение несущих характеристик комбинации корпуса с двумя блоками, расположенными в горизонтальной плоскости симметрии // Сб. тр. XXVI Всерос. семинара по управлению движением и навигации летат. аппаратов. Самара, 2023. С. 147-153.

ИЗМЕНЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ СВОЙСТВ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ПРИ КОРРОЗИИ

Гиниятуллин Р.Р.¹, Якупов Н.М.¹, Кузнецов В.Г.²

1 - Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

true_way@mail.ru

Обеспечение безопасности конструкций и сооружений от коррозионного разрушения является важной задачей. Одним из перспективных направлений повышения коррозионной стойкости является модификация поверхностного слоя элемента конструкции методом ионной имплантации. Стандартный подход одноосного растяжения для оценки механических свойств тонкостенных элементов с коррозионными дефектами также малоэффективен, а гравиметрический метод, не учитывает изменение структуры материала и физико-механических характеристик, вызванное разрыхлением материала на некоторую глубину. В работе на базе экспериментально-теоретического метода определены интегральные механические характеристики образцов, после воздействия коррозии. Показана эффективность защиты стальных образцов от коррозии путем предварительной обработки поверхностного слоя ионной имплантацией. Приводятся результаты экспериментального исследования коррозионного износа тонкостенной пластины из листовой стали, при различном времени воздействия агрессивной среды, на поверхностный слой которой были имплантированы ионы углерода на примере изменения жесткости (Рис. 1).

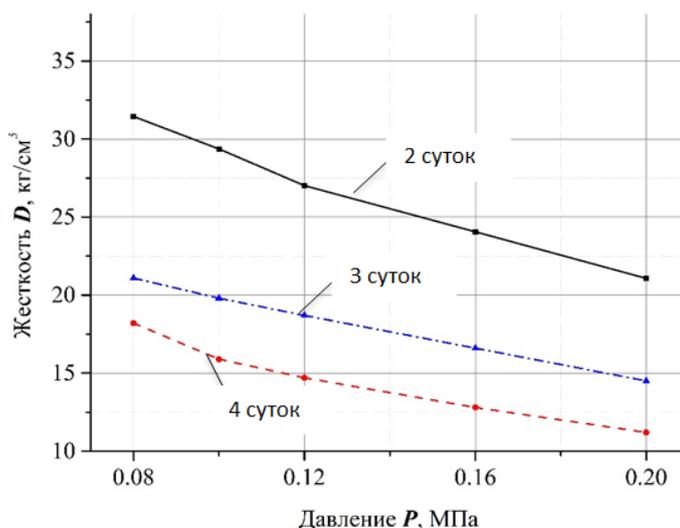


Рис. 1. График зависимости давление P- жесткость D для разного времени воздействия.

РЕЗОНАНСНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Глушков Е.В., Глушкова Н.В.

Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия
nvg@math.kubsu.ru

К настоящему времени эффект появления волн Лэмба с нулевой групповой скоростью (zero group velocity – ZGV [1]) хорошо изучен и используется для неразрушающего определения упругих свойств материала пластин [2], в электроакустических устройствах [3] и некоторых других приложениях. На ZGV частотах амплитуды частотного спектра бегущих волн могут демонстрировать резкий рост (ZGV-резонанс). В многослойном полупространстве бесконечной толщины характерный для слоя изгиб дисперсионной кривой, дающий обратную волну, трансформируется в двойной изгиб, задающий в этом частотном диапазоне три бегущих волны, связанных с одной и той же ветвью дисперсионной кривой (одну обратную и две прямые) [4]. При этом на правом краю диапазона толщинный резонанс трансформируется также в ZGV-моду (кратный или двухпиковый ZGV-резонанс). С увеличением числа слоев в узком частотном диапазоне может появиться несколько соседних ветвей с двойными перегибам, а кривые групповых скоростей соответствующих мод образуют характерные петли, опускающиеся ниже нуля. Тем самым появляется несколько частот, на которых групповая скорость обращается в нуль и возникают резонансные пики частотного спектра (множественный или многопиковый ZGV-резонанс) [5]. В докладе обсуждается возможность использования данного эффекта для резонансной диагностики состояния внутренних слоев многослойной структуры.

В настоящее время в ультразвуковой диагностике бегущими волнами в качестве главного диагностического признака изменения (деградации) упругих свойств материала используется информация об изменении дисперсионных свойств бегущих волн. Действительно, при варьировании входных параметров вид теоретических дисперсионных кривых заметно меняется. Однако, из-за существенного различия реальной возбудимости различных мод, скалограммы суммарного волнового поля не показывают заметных изменений амплитудно-частотных характеристик при вариации свойств внутренних слоев. Они отличаются только разрывами, появляющимися в темных полосах, указывающих в скалограмме на основные поверхностные волны. Эти разрывы появляются на ZGV частотах, которые дают многопиковую картину частотного спектра. Положение резонансных пиков чувствительно к изменению свойств внутренних слоев, и они хорошо регистрируются современными методами измерений, поэтому вместо дисперсионных характеристик или в дополнении к ним можно использовать картину распределения частот резонансного отклика волноводной структуры на широкополосное динамическое воздействие.

В качестве иллюстрации приводятся численные примеры, относящиеся к неразрушающему контролю толщины осадочного слоя в трубопроводах [6] и к УЗ диагностике изменения прочностных свойств костной ткани при развитии остеопороза [7].

Работа выполняется в рамках проекта РНФ 24-11-00140.

Литература

1. C. Prada, D. Clorennec, D. Royer // Local vibration of an elastic plate and zero group velocity Lamb modes, J. Acoust. Soc. Am., 124 2008. 203–212
2. C. Grünsteidl, T. W. Murray, T. Berer, I. A. Veres // Inverse characterization of plates using zero group velocity Lamb modes, Ultrasonics 65 2016. 1–4
3. C. Caliendo, M. Hamidullah // Zero-Group-Velocity acoustic waveguides for high-frequency resonators, \Journal of Physics D: Applied Physics, 50:47 2017. 474002
4. V. A. Babeshko, E. V. Glushkov, N. V. Glushkova // Energy vortices and backward fluxes in elastic waveguides, Wave Motion, 16 1992. 183–192
5. E. V. Glushkov, N. V. Glushkova // Multiple zero-group velocity resonances in elastic layered structures, Journal of Sound and Vibration, 500 2021. 116023
6. E. V. Glushkov, N. V. Glushkova, A.A. Eremin // Signs of pipeline fouling in ultrasonic guided wave diagnostics, AIP Conference Proceedings: 30th Russian Conference on Mathematical Modeling in Natural Sciences, Perm, 6-9 October 2021. - Vol. 2627, 070004 (2023), American Institute of Physics Inc., New York, 2023
7. E. V. Glushkov, N. V. Glushkova, O. A. Ermolenko, A. M. Tatarinov // Study of ultrasonic guided wave propagation in bone composite structures for revealing osteoporosis diagnostic indicators, Materials, 16(18) 2023. 6179.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ УПРУГИХ СВОЙСТВ

Глушков Е.В., Глушкова Н.В.

*Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный
университет, Краснодар, Россия
evg@math.kubsu.ru*

Задачи моделирования волновых процессов в материалах с произвольной анизотропией упругих свойств возникают в таких областях науки и техники как ультразвуковой неразрушающий контроль слоистых композитов и изделий из специальных сплавов, в акустоэлектронике при проектировании устройств на поверхностных акустических волнах, в сейсмоакустике, акустооптике и многих других. Для их решения в настоящее время обычно используются пакеты программ, реализующие метод конечных элементов (МКЭ) или другие прямые численные методы, базирующиеся на сеточной аппроксимации рассматриваемой области. Они позволяют получать количественные данные, однако, как правило, с большими вычислительными затратами и без физически наглядного разделения по типам волн. Такое разделение обеспечивают аналитические представления, получаемые методами модального анализа (см., например, обзор в гл. 2 [1]), однако, они дают только собственные решения с точностью до постоянного множителя, не позволяя учесть источник, т.е., получить амплитудно-частотную характеристику возбуждаемых волн.

В случае изотропных слоистых сред хорошо зарекомендовал себя интегральный подход, в рамках которого выводится явное интегральное представление решения в виде контурных интегралов обратного преобразования Фурье через матрицу Грина рассматриваемой структуры и параметры источника [2]. Численное интегрирование позволяет получать здесь такие же количественные результаты как МКЭ, но со значительно меньшими затратами, а применение к этим интегралам асимптотических методов и техники разложения по вычетах дает явные физически наглядные представления для возбуждаемых объемных и бегущих волн.

В случае произвольно-анизотропных слоистых сред реализация такого подхода усложняется. Тем не менее, на основе разработанных полуаналитических алгоритмов построения Фурье-символа матрицы Грина [3,4] получены явные интегральные и асимптотические представления волновых полей, возбуждаемых заданным источником в многослойном упругом полупространстве или пакете слоев. В докладе предполагается представить общую схему их вывода, обсудить особенности ее компьютерной реализации и проиллюстрировать примерами определения параметров возбуждения высокоскоростных псевдоповерхностных акустических волн (ППАВ) в пьезоструктурах на алмазной подложке, примерами решения обратной задачи определения эффективных упругих модулей композитов по данным измерения поверхностных волн, а также примерами анализа диаграмм направленности объемных волн, возбуждаемых поверхностным источником в материалах с различными видами анизотропии. Планируется также уделить внимание эффекту появления нескольких фронтов объемных или поверхностных волн, соответствующих одному корню характеристического уравнения, но распространяющихся с различными скоростями.

Работа выполняется в рамках проекта РНФ 24-11-00140.

Литература

1. C. Lane // The Development of a 2D Ultrasonic Array Inspection for Single Crystal Turbine Blades. Springer Theses Recognizing Outstanding Ph.D. Research. 2014. DOI 10.1007/978-3-319-02517-9.
2. И. И. Ворович, В. А. Бабешко // Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.: Наука. 1979. 320с.
3. Е. В. Глушков, Н. В. Глушкова, А. С. Кривонос // Возбуждение и распространение упругих волн в многослойных анизотропных композитах, Прикладная математика и механика, 74: 3 2010. 419-432
4. E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin // Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites, J. Acoust. Soc. Am., 129:5 2011. 2923-2934

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В СЛОИСТЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Фоменко С.И., Голуб М.В.

*Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный
университет, Краснодар, Россия
sfom@yandex.ru*

Фононные кристаллы, как представители класса акустических метаматериалов, относятся к новым видам искусственных материалов (композитов) с периодической структурой. Такие композитные структуры обладают улучшенными акустическими свойствами, благодаря специальному образом подобранной периодической структуре с возможным локальным нарушением периодичности (дефекты). Современные устройства нередко используют особенности волновых колебаний периодических композитных структур. Ключевой чертой фононных кристаллов и упругих метаматериалов является присутствие в спектре их собственных колебаний полос пропускания и непропускания (запрещённых и разрешённых частотных диапазонов), что даёт возможность управления волновой энергией, например, для фильтрации, конвертации или селективного возбуждения [1], а использование связанных электромеханических полей имеет огромный потенциал в практической реализации новых устройств для волнового мониторинга.

Рассматривается задача о распространении упругих волн через периодический слоистый пакет конечной толщины с множественными периодическими массивами разрезов и электродов. Обсуждаются вопросы применения метода граничных интегральных уравнений (МГИУ) для описания волновых колебаний и последующего параметрического анализа. С помощью МГИУ моделируются колебания слоистого волновода с многослойной ячейкой из упругих и пьезоэлектрических слоёв. В одной из ячеек рассматриваемой периодической структуры вводятся тонкие электроды, замкнутые через внешнюю электрическую сеть, параметры которой (совокупный электрический импеданс) считаются регулируемыми. МГИУ предполагает введение неизвестных скачков для электрических перемещений, после подстановки которых в граничные условия на электроде формируются системы граничных интегральных уравнений [2,3]. Для построения ядер интегральных уравнений используется полуаналитический подход, основанный на применении интегрального преобразования Фурье и построении матриц Грина многослойной среды. Для численного расчёта матрицы Грина для ячейки слоистой среды фононного кристалла разработан оригинальный итерационный алгоритм [3].

На основе этих методов был проведён численный анализ сходимости алгоритмов, а также влияния характеристик периодических структур и электрических параметров на коэффициенты прохождения/отражения, ширину и положение модовых и полных запрещённых зон слоистых фононных кристаллов различных конфигураций. Исследуются также резонансные эффекты в рассматриваемых структурах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № № 22-11-00261.

Литература

1. G. Liao, C. Luan, Z. Wang, J. Liu, X. Yao, J.; Fu, J. // Acoustic metamaterials: A review of theories, structures, fabrication approaches, and applications, *Advanced Materials Technologies*. 6 2021. 2000787.
2. M.V. Golub, O.V. Doroshenko, S.I. Fomenko, Y. Wang, C. Zhang. // Elastic wave propagation, scattering and localization in layered phononic crystals with arrays of strip-like cracks, *International Journal of Solids and Structures*. 212 2021. 1–22.
3. S. I. Fomenko, M.V. Golub, O.V. Doroshenko, Y. Wang, Ch. Zhang. An advanced boundary integral equation method for wave propagation analysis in a layered piezoelectric phononic crystal with a crack or an electrode // *Journal of Computational Physics*, 2021, V. 447, 110669

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ НА МЕЖФАЗНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ»

Голых Р.Н.¹, Карра Ж.-Б.², Маняхин И.А.¹, Минаков В.Д.¹, Генне Д.В.¹, Барсуков А.Р.¹

1 - Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Россия

2 - Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Россия

romang190@gmail.com

Массообменные процессы газа, растворённого в жидкости, являются медленными диффузионными процессами по сравнению с массообменом газа, растворённого в газе, или жидкости, растворённой в другой жидкости. Это связано с малым коэффициентом диффузии газа в жидкости [1], который в 5000...10000 раз меньше, чем коэффициент диффузии газа в газе [2].

Из-за данного физического ограничения необходимо повышать совокупную скорость массопереноса за счёт увеличения межфазной поверхности.

Один из наиболее эффективных способов реализации увеличенной межфазной поверхности – формирование ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме в ходе барботажного процесса [3]. Формируемые кавитационные пузырьки приводят к образованию волн на поверхности барботажных пузырьков.

Для выявления оптимальных режимов ультразвуковых колебаний разработан стенд для экспериментальных исследований структуры и размеров межфазной поверхности «газ-жидкость» при ультразвуковом воздействии в ходе барботажного процесса. Принцип работы стенда основан на скоростной киносъёмке и цифровой обработке изображений ортогональных проекций пузырьков на плоскость, параллельную оси симметрии ультразвукового излучателя. Стенд позволяет отслеживать изменение формы и размеров межфазной поверхности в течение каждого отдельного периода ультразвуковых колебаний. Предложенный алгоритм обработки результатов экспериментальных исследований позволил определить изменение межфазной поверхности при различных интенсивностях ультразвуковых колебаний для случая введения ультразвука в объём жидкости. Данный способ введения ультразвука отличается увеличенной долей энергии, преобразуемой из колебаний излучателя в кавитацию в жидкости по сравнению с, например, ультразвуковым распылением в тонкой плёнке.

Выявлено, что ультразвуковое воздействие способно увеличивать межфазную поверхность при аэрации до 1,5 раз и более в фиксированной плоскости разреза. Установлено существование оптимальной интенсивности, равной $4,5 \pm 0,5$ Вт/см², обеспечивающей максимальную долю энергии ультразвуковых колебаний, затрачиваемую на увеличение межфазной поверхности (КПД ультразвука).

Установлено наличие критической интенсивности, начиная с которой проявляется дополнительный механизм влияния кавитации на межфазную поверхность, связанный со шлихтинговскими течениями. Это свидетельствует о необходимости учёта комплекса влияющих факторов при теоретическом описании воздействия кавитации на межфазную поверхность при принудительной аэрации.

Полученные результаты доказывают один из механизмов повышения скорости массопереноса в системах «газ-жидкость» со сплошной жидкой фазой, основанный на увеличении межфазной поверхности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00278. <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>

Литература

1. Новосёлов А.Г., Дужий А.Б., Голикова Е.Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. №2.
2. Подрыга В.О., Вихров Е.В., Поляков С.В. Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 96. 24 с. doi:10.20948/prepr-2019-96
3. Семёнов И.А., Ульянов Б.А., Свиридов Д.П., Камаев А.С. Влияние ультразвука на массоотдачу в жидкой фазе при свободном всплытии пузырька газа // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. №2(5). С. 57–61.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ТОРСИОННОГО ПРИВОДА С РАБОЧИМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Горбаченко Д.Ф.¹, Беляев Ф.С.^{1,2}, Волков А.Е.¹, Евард М.Е.¹

1 - СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

*2 - Институт Проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
daniilgorbachenko@gmail.com*

Особые механические свойства сплавов с памятью формы (СПФ) могут использоваться при проектировании и изготовлении приводов. В этом смысле особый интерес представляют приводы с элементами из СПФ, работающими на кручение, что позволяет избежать влияния теплового расширения на функциональное поведение. В данной работе представлены результаты исследования рабочего цикла такого привода в рамках микроструктурной модели, а также результаты оптимизации параметров, позволяющих добиться максимума работы в цикле.

Мы проанализировали рабочий цикл торсионного привода с рабочим элементом из сплава с памятью формы. Цикл был реализован по принципу: модельный образец предварительно деформируется либо путем активного деформирования в мартенситном состоянии, либо путем охлаждения из аустенитного состояния под постоянной нагрузкой, и разгрузке в мартенситном. Далее, исходя из предположения, что один из торцов абсолютно жестко заделан, а для другого задана некоторая жесткость заделки, мы осуществляли термоциклирование через интервал температур мартенситного превращения. Была рассчитана работа, совершенная в цикле, при разных фиксированных жесткостях. Таким образом, мы пришли к выводу, что зависимость работы от жесткости заделки является нелинейной: существует определенное оптимальное значение жесткости. Полученные результаты коррелируются с имеющимися экспериментальными данными. Изучено влияние активной предварительной деформации на работоспособность при постоянной жесткости, найдено значение предварительной деформации, обеспечивающее максимальную эффективность привода в работе. В ходе исследования определена корреляция между эффективностью работы привода и количеством выполненных циклов, а также выявлено оптимальное число циклов, после которого использование данного привода остается целесообразным.

При работе реальных устройств возможны следующие ситуации: перегрев рабочего элемента; рабочий элемент не успевает остыть до температуры завершения прямого превращения; рабочий элемент не успевает нагреться до температуры завершения обратного превращения. Мы исследовали связь предельных температур цикла с возникновением той или иной ситуации. Как показали расчеты, перегревы не сказываются на работоспособности. В случае учета эффекта стабилизации мартенсита при определенных значениях жесткости возникают ситуации, когда именно перегрев приводит к увеличению удельной работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 23-29-01006).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОГО КОНУСА В ТРУБЕ ЛЮДВИГА

**Глазков С.А., Горбушин А.Р., Грибкова М.С., Дугин Д.И., Епихин А.Д., Козик А.Е.,
Мошаров В.Е., Радченко В.Н.**

*Центральный аэрогидродинамический институт, Россия
gorbushin@tsagi.ru*

В аэродинамической трубе ЦАГИ УТ-1М в диапазоне числа $Re=(7-26)\cdot 10^6$ проведены экспериментальные исследования канонического тела – конуса с углом раствора 10° и длиной 0.96 м (Рис. 1) при больших сверхзвуковых скоростях. Предварительно выполнены расчеты обтекания конуса в трубе с помощью пакета EWT-ЦАГИ для определения его оптимального положения в рабочей части. Одновременно измерялись нестационарные аэродинамические нагрузки с помощью внутримодельных шестикомпонентных тензометрических весов, динамическое поведение конуса и тензометрических весов с помощью трехосевых акселерометров Dyrpan, нестационарные давления на поверхности конуса и приемника типа Пито-Прандтля датчиками Kulite, температура поверхности конуса с помощью термочувствительной краски [1], пульсации температуры с помощью термоанемометра постоянного напряжения с пленочным датчиком и визуализация обтекания теньевым методом. Положение ламинарно-турбулентного перехода и его фиксация с помощью

цилиндрических турбулизаторов определялись с помощью термочувствительной краски (Рис. 2). По распределению температуры определялось число Стэнтона.

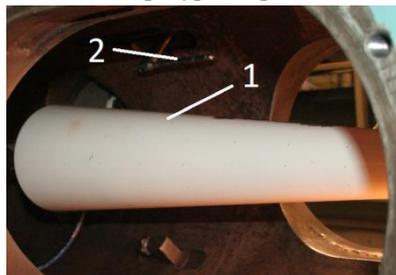


Рис. 1. Конус в рабочей части аэродинамической трубы УТ-1М. 1 – конус, 2 – приемник Пито-Прандтля.

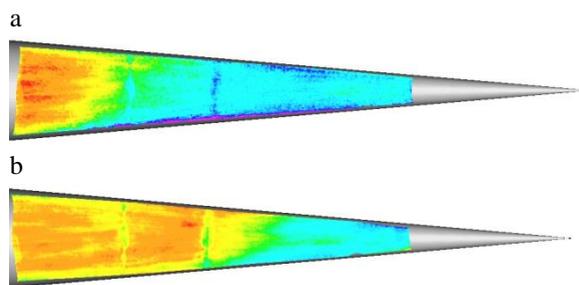


Рис. 2. Распределение числа Стэнтона по поверхности конуса при $Re=8.1 \cdot 10^6$ (a) и $12.2 \cdot 10^6$ (b).

Повышенные пульсации полного давления, измеренные приемником Пито, обусловлены колебаниями в приемном отверстии приемника, составляющим совместно с внутренней полостью резонатор Гельмгольца [2] с собственной частотой резонатора 5.03 кГц. К показаниям приемника полного давления вводилась поправка на влияние собственных колебаний резонатора [2]. Резонансная частота и коэффициент демпфирования определялись по результатам свободных затухающих колебаний, образующихся при разрыве резинового шарика, расположенного рядом с приемником полного давления. Поправка на влияние инерциальных сил к показаниям продольной компоненты силы тензометрических весов вводилась согласно работе [3]. Коэффициенты демпфирования β_{AF} и жесткости k определялись по результатам свободных затухающих колебаний, образующихся при приложении ступенчатой силы [3]. Показания акселерометров использовались для определения траектории движения конуса в процессе пуска установки.

Результаты проведенных исследований представляют собой тестовый случай и могут быть использованы для валидации вычислительных программ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-19-00041.

Литература

1. Borovoy V, Mosharov V, Noev A, Radchenko V. // Temperature sensitive paint application for investigation of boundary layer transition in short-duration wind tunnels. EUCASS Proceedings Series – Advances in AeroSpace Sciences. 2012. 3, 15-24.
2. Gorbushin A, Anokhina E, Stolyarov E. Unsteady pressure measurement in the presence of a cavity between the sensor and the flow // Sensors and Actuators A: Physical. 2023. 349, 114095. doi.org/10.1016/j.sna.2022.114095.
3. A.R. Gorbushin, A.E. Kozik, E.N. Anokhina. Non-stationary load measurement using six-component strain-gauge balances // Measurement. 2024. Volume 226, 114176, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114176.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ. АКТУАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ ПРОФ. ЖИЛИНА П.А.

Горынин Г.Л.¹, Горынин А.Г.²

1 - Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

2 - Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ggorynin@list.ru

На основе применения метода асимптотического расщепления [1, 2] к пространственной задаче теории упругости построена теория деформирования слоистых композитных стержней без введения каких-либо гипотез о характере их напряженно-деформированного состояния. Получена система из четырех обычных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на три неизвестные функции макродисplacements и неизвестную функцию угла закручивания поперечного сечения стержня. Вид этих уравнений зависит от номера асимптотического приближения. Коэффициенты указанной системы являются интегральными характеристиками вспомогательных краевых задач в поперечном сечении стержня.

Полученная теория включает в себя как частный случай следующие получившие признание теории: 1) классическая теория изгиба балки Бернулли-Эйлера, 2) уточненная теория изгиба балки Тимошенко, 3) теория

свободного кручения Сен-Венана, 4) теория стесненного кручения тонкостенных стержней открытого профиля Власова.

Все указанные теории (за исключением теории Сен-Венана) были в свое время разработаны для однородных стержней на основе введения специальных гипотез. В отличие от них представленная теория свободна от гипотез, справедлива и для однородных и для слоистых стержней, слои которых обладают произвольной анизотропией.

Кроме того, указанные теории описывают явления по отдельности, отдельно изгиб и отдельно кручение (исключением является теория Власова для тонкостенных конструкций). Представленная же теория содержит четыре существенно взаимосвязанных уравнения, т.е. в общем случае процессы изгиба в двух плоскостях, растяжения-сжатия и кручения являются взаимосвязанными. И только в частных случаях, при наличии симметрий поперечного сечения, часть коэффициентов системы уравнений зануляется, и указанные процессы деформирования становятся независимыми. В рамках предложенного подхода и тонкостенные стержни и стержни с произвольными поперечными сечениями рассматриваются с единых позиций.

В общем случае вблизи торцов стержня возникают два типа пограничных слоев, один вызван стесненным кручением стержня, а другой изгибом стержня.

Интересно отметить, что представленная теория хорошо описывает пограничные слои возникающие вследствие эффекта стесненного кручения и плохо описывает пограничные слои, возникающие из-за изгиба стержней.

Расхождение примеров расчета конкретных конструкций стержней по представленной теории и трехмерного конечномерного расчета возникает только в тех случаях, когда размеры пограничных слоев, вызванных изгибом, становятся соизмеримыми с длиной всего стержня. Во всех остальных случаях имеется совпадение в расчетах с хорошей точностью.

Следует отметить, что первые три уравнения представленной теории были получены более пятнадцати лет назад [1, 2], четвертое же уравнение получалось только в частных случаях отдельного кручения, без его связи с изгибом. И только после того, как задача была поставлена более широко, в рамках эйлеровой механики, в духе подхода, предложенного проф. Жилиным П.А. [3], было получено полноценное четвертое уравнение, которое замкнуло указанную выше систему уравнений деформирования слоистого композитного стержня.

Литература

1. Горынин Г.Л., Немировский Ю.В. // Пространственные задачи изгиба и кручения слоистых конструкций. Метод асимптотического расщепления. 2004. 407 с.
2. Горынин Г.Л., Немировский Ю.В. // Механика композитных материалов, 45, 3, 2009. С. 379–410.
3. Жилин П.А. // Рациональная механика сплошных сред. 2012. 587 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР SiC/Si И ТОНКИХ ПЛЕНОК AlN, AlGaN, GaN, Ga₂O₃ НА НАНО-SiC/Si МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Гращенко А.С., Кукушкин С.А.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
gas@ipme.ru

В работе приведены уникальные эксперименты по НИ гибридных подложек нового поколения нано-SiC/Si и тонких пленок AlN, AlGaN, GaN и Ga₂O₃, выращенных на нано-SiC/Si. В рамках настоящего исследования экспериментально были определены параметры твердости и модуля упругости гетероструктур нано-SiC/Si, AlN/SiC/Si, AlGaN/AlN/SiC/Si, AlGaN/SiC/Si и Ga₂O₃/SiC/Si. Представлена методика анализа данных НИ жестких наномасштабных пленок толщиной несколько десятков нанометров и состоящих из нескольких слоев, которые сформированы на более мягком основании. Разработан способ визуализации остаточной полсе НИ деформации в исследуемых материалах с помощью Рамановской микроскопии. Изучены структурные и механические характеристики слоев AlGaN, выращенных на гибридных пластинах нано-SiC/Si и гетероструктуре AlN/SiC/Si, сформированных на кристаллах Si трех основных ориентаций. Измерены параметры твердости и модуля упругости эпитаксиальных слоев Ga₂O₃ на нано-SiC на Si с ориентациями (001), (011) и (111).

О ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ В СИСТЕМАХ С КОНЕЧНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ

Грекова Е.Ф.^{1,2}

1 - ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

elgreco@pdmi.ras.ru

Как известно, в средах без поглощения понятие групповой скорости можно ввести как производную частоты по волновому числу. Метод стационарной фазы позволяет заключить, что при распространении возмущения общего вида в точке, движущейся с такой скоростью, на больших временах будет преобладать вклад от волнового пакета с данной частотой. На достаточно больших временах “локальные волновые числа распространяются с групповой скоростью” (Дж. Уизем, [1]). В средах без поглощения данная скорость также соответствует скорости распространения энергии возмущения.

Асимптотику возмущения легко вычислить и для случая постоянного поглощения, к ней добавится экспоненциально убывающий множитель. Для малой диссипации вышеприведенные свойства считаются также справедливыми (без строгого доказательства). Эти факты приведены в классической литературе по волнам [1,2].

В диссипативных системах и акустических метаматериалах поглощение может быть существенным и зависеть от частоты. С.А. Тау [2] утверждает: “...групповая скорость может потерять свой физический смысл, если диссипация перестает быть малой”. Аналогичного мнения придерживается У. Хейес [2]. В более поздних работах различные авторы вводят понятие комплексной групповой скорости [3,4]. Скорость переноса энергии не совпадает со скоростью движения группы волн, определение последней в диссипативных системах также не вполне однозначно [5].

В работе показано, какой смысл имеет производная частоты по вещественной части волнового числа в случае распространения узкого пуга волн в системах с существенным частотно-зависимым поглощением.

Литература

1. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. – М.: Мир, 1977. – 638 с.
2. Нелинейные волны: сб. статей, под ред. С. Лейбовича и А. Сибасса. – М.: Мир, 1977. 162 с.
3. Muschietti L., Dum C. T. Real group velocity in a medium with dissipation //Physics of Fluids B: Plasma Physics. – 1993. – Т. 5. – №. 5. – С. 1383-1397.
4. Gerasik V., Stastna M. Complex group velocity and energy transport in absorbing media //Physical Review E. – 2010. – Т. 81. – №. 5. – С. 056602.
5. Микаэлян М. А. О скорости переноса энергии поля в диссипативной среде //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2017. – Т. 44. – №. 3. – С. 46-57.

ДИНАМИКА СПАЙКОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ВНУТРИСЛОЙНЫМИ СВЯЗЯМИ ПРИ ОБУЧЕНИИ

Гречкин Б.В.¹, **Шепелев И.А.**¹, **Артамонов Д.И.**²

1 - *Альметьевский государственный технологический университет Высшая школа нефти, Альметьевск, Россия*

2 - *Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук, Москва, Россия*

bgre4kin@yandex.ru

В данной работе исследуется динамика трехслойной спайковой нейронной сети при обучении набором MNIST. При этом топология исследуемой сети отличается от классической, когда имеет место только связь между слоями. В нашем случае помимо межслойных связей присутствуют также и связи между нейронами в скрытом слое. При активности нейронов этого слоя, индуцированной внешними обучающими сигналами в скрытом слое будет возникать различные явления самоорганизации, обусловленные внутрислойным взаимодействием нейронов. Мы исследуем изменения в динамике сети на протяжении всего процесса обучения на классификацию образов. Определяются эффекты самоорганизации, такие как кластеризация, частичная синхронизация и др., с которыми ассоциируется способность спайковой нейронной сети классифицировать

визуальные объекты. Это позволяет нам лучше понять причины того, что сеть в процессе обучения становится способной к классификации и какие процессы ответственны за это.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ СПЕЧЕННЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Григорьев А.С.¹, Шилько Е.В.¹, Дмитриев А.И.¹, Заболотский А.В.², Андреев К.³

1 - Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

2 - ООО «Группа «Магнезит», Сатка, Россия

3 - Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, China

grigoriev@ispms.ru

Огнеупорные материалы являются теплоизолирующими материалами, предназначенными для работы при высоких температурах и температурных градиентах. В условиях эксплуатации огнеупорных изделий (в том числе при наличии механического стеснения) термические напряжения могут достигать значительных величин, превышающих предел прочности огнеупора, и приводить к развитию внутренних трещин. Поэтому не только теплофизические свойства (в первую очередь, теплопроводность), но и прочностные свойства (включая термостойкость) являются ключевыми эксплуатационными характеристиками огнеупоров. Макроскопические свойства спеченных огнеупоров в значительной степени определяются микроструктурой, в том числе пористостью, адгезией частиц и наличием плоскостных несплошностей различной протяженности и апертуры. Соответственно, дизайн и оптимизация характеристик огнеупорных материалов должны базироваться на анализе вкладов различных структурных элементов в эффективные свойства и взаимовлияния этих вкладов. Эффективным инструментом для проведения таких исследований является компьютерное моделирование, которое позволяет проводить параметрический анализ и выявлять влияние состава и свойств компонентов, а также поровой структуры, на макроскопические механические свойства и разрушение. Настоящая работа посвящена разработке подхода к построению мезоскопических механических моделей спеченных керамических материалов со сложной иерархической структурой на примере огнеупорной керамики на основе магнезиальной шпинели.

Развита термомеханическая мезомасштабная модель спеченной огнеупорной керамики на основе магнезиальной шпинели, учитывающая сложную гетерогенную структуру материала. Развита модель базируется на представлении спеченного огнеупора в виде дисперсно-упрочненного композиционного материала с пористой матрицей, состоящей из мелкозернистых фракций шпинели, механические свойства которой моделируются эффективно. Явным образом моделируются крупные фракции зерен шпинели («включения»), поры и дефекты структуры. Дефекты меньшего масштаба, а также мелкозернистые области материала учитываются эффективно посредством задания стохастического распределения локальных значений прочности и жесткости матрицы в соответствии с заданной функцией распределения свойств. Механическое поведение каркаса пористой матрицы и крупных зерен описывается как упруго-хрупкое. В качестве условия локального разрушения применяется трехпараметрический комбинированный критерий Друкера-Прагера-Ранкина.

Разработана численная реализация развитой модели спеченного керамического огнеупора на основе шпинели в методе однородно деформируемых дискретных элементов. С использованием компьютерного моделирования получены зависимости эффективных упругих и прочностных характеристик, а также эффективного (макроскопического) коэффициента теплопроводности огнеупора от характеристик зеренной и дефектной структуры, которые хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований. Показано, что определяющее влияние на упругие константы, прочность и теплопроводность оказывает не столько объемная доля дефектов (она мала), сколько их удельное число. Другими словами, определяющее значение имеет отношение площади поверхности дефектов к объему, в котором они заключены. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию влияния особенностей мезомасштабной дефектной структуры, определяемой, как пористостью, так и протяженными плоскостными дефектами, на макроскопические механические и теплофизические свойства огнеупорных керамических материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00688, <https://rscf.ru/project/22-19-00688>.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ТЕКУЧЕСТИ

Груздков А.А.

СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, Россия
gruzdkov@mail.ru

Традиционный подход к анализу свойств материалов в условиях кратковременного интенсивного воздействия базируется на концепции скоростной зависимости. Такие характеристики материала как предел прочности или предел текучести рассматриваются функциями скорости деформации. Целью испытаний материалов в этом случае считается определение параметров таких зависимостей, которые в дальнейшем предполагается использовать в компьютерных расчётах динамики конструкций. Во многих случаях, однако, предположение о постоянстве скорости деформации не выполнено даже приближённо. В рамках традиционного подхода оказывается невозможным моделировать такое явление как «запаздывание текучести», экспериментальному изучению которого был посвящен целый ряд работ ещё в 1940-60-е годы.

Анализ результатов ударных испытаний материалов, например, при определении динамического предела текучести ударом стержня о жёсткую преграду (метод Тейлора), показывает, что во многих случаях не удаётся получить устойчивых скоростных зависимостей. В то же время применение моделей, основанных на представлении о наличии запаздывания текучести, даёт хорошее соответствие экспериментальным данным.

Работа выполнена при поддержке мега гранта 075-15-2022-1114.

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕЧЕНИЯ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Гузей Д.В., Минаков А.В., Гаврилов А.А.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
dguzey@sfu-kras.ru

В работе проведено систематическое тестирование разрабатываемого программного обеспечения для расчетов течения несмешивающихся жидкостей в моделях пористой среды и трехмерных моделях горной породы, полученных с помощью микротомографии. Важной особенностью разработанного программного обеспечения является построение расчетной сетки в воксельной модели горной породы. Математическая модель описания нестационарного процесса течения несмешивающихся жидкостей с разрешением межфазной границы на основе модели Навье-Стокса для несжимаемой жидкости и метода объёма жидкости (Volume of fluid method, VOF) [1]. В рамках VOF метода реализован конвективно-диффузионный механизм переноса модифицирующей добавки в пределах водной фазы с учетом влияния локальной концентрации добавки на вязкость, межфазное натяжение и краевой угол смачивания. Для описания процессов вытеснения нефти с помощью растворов полимеров, поверхностно активных веществ и наносuspензий. Поверхностное натяжение параметризуется объемными силами согласно неразрывной модели силы поверхностного натяжения CSF (continuum surface force) [2]. Особенностью модели является выделение из полного давления капиллярной составляющей, уравнение на которое имеет вид уравнения Пуассона, и гидродинамической составляющей.

Тестирование выполнено на ряде модельных задач конвективно-диффузионного переноса, задачах несмешивающегося течения в микрофлюидных чипах и задачах вытеснения нефти из цифровых моделей ядра, полученных с помощью томографии. Помимо эксперимента полученные результаты расчетов на разрабатываемом программном обеспечении сопоставлялись с результатами расчетов, проведенных нами на известных коммерческих программных продуктах зарубежного производства Ansys Fluent 2021R2, также с результатами расчетов других авторов, а также проведенных нами микрофлюидных экспериментов по вытеснению нефти из моделей трещиноватой среды.

Рассмотрена задача несмешивающегося течения жидкостей при вытеснении нефти в микрофлюидном чипе, имитирующем трещиноватую структуру. Для сравнения использованы данные собственных микрофлюидных экспериментов. Было показано, что максимальное отличие значения коэффициента вытеснения нефти от экспериментальных значений для различных расходов не превышает 3 %, при

сопоставлении с результатами Ansys Fluent расхождение не превышает 4 %. Проведено сравнение скорости расчетов разрабатываемого программного обеспечения с Ansys Fluent, разрабатываемый программный продукт оказывается в среднем в 3 раза быстрее.

Проведено тестирование разрабатываемого программного продукта на задаче вытеснения модельной нефти из образца реального образца ядра. Использовалась воксельная модель с размерами 600×600×600 вокселей. Показано хорошее согласование результатов с Ansys Fluent, максимальное отличие для зависимости доли водной фазы от времени не превышает 3 %. Показано, что разрабатываемый программный продукт в 3,5 раза быстрее по времени расчета, чем Ansys Fluent. Это связано с более эффективной процедурой определения адаптивной величины временного шага в разрабатываемом решателе. Расчеты в обоих пакетах проводились на 32 ядрах с частотой ядра 4 ГГц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

Литература

1. C.W. Hirt, B.D. Nichols // Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J Comput Phys., 39:1 1981. 201–225
2. J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach // A continuum method for modeling surface tension, J. Comput Phys., 100:2 1992. 335-354

АНАЛИЗ ВОДОРОДНОЙ АНИЗОТРОПИИ НОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ

Гуркина Н.Ю.¹, Нечаева А.В.¹, Шалагаев В.В.^{1,2}, Полянский В.А.²

*1 - АО «Научно-диагностический центр «Научно-производственная фирма
«Русская лаборатория», Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
nadezhda.gurkina@ruslab.org*

В настоящей работе для исследования выбраны стальные бесшовные горячедеформированные трубы из стали 20, которые в процессе изготовления трубного изделия проходят длинную и сложную технологическую цепь термомеханических операций. В результате структура металла стенки приобретает индивидуальные особенности, заключающиеся в неоднородном распределении остаточного водорода по окружности труб. Спрогнозировать степень износа при эксплуатации паровых котлов в таком случае оказывается проблематично. Общие соображения о гомогенной структуре таких труб привели к тому, что испытания, которые позволили бы выявить неоднородность или анизотропию свойств металла трубы, полностью исключены из руководящих документов. Такой вид контроля не предусмотрен как на этапе приемочных испытаний новой трубной продукции на соответствие ТУ, так и на этапе диагностических испытаний, необходимых для определения остаточного ресурса и для продления ресурса работы котельного оборудования.

Проведены полные комплексы испытаний новых экранных труб от разных изготовителей (100 образцов). Для анализа концентрации водорода и его распределения по трубам, а также для металлографического анализа все исследуемые трубы были разделены на 5 участков длиной по 0,5 м, из каждого участка был вырезан кольцевой сегмент, в котором анализ проводился по 12 равноудаленным сечениям. По результатам анализа получено крайне неравномерное распределение концентрации водорода по окружностям и по длинам труб. Концентрация водорода варьируется от 0,0518 ppm до 0,4210 ppm, и отличается в 8 раз между всеми исследованными образцами и в 6 раз в пределах одного образца трубы. По результатам анализа определены области максимальной ($\approx 0,40$ ppm), средней ($\approx 0,20$ ppm) и минимальной ($\approx 0,10$ ppm) концентрации водорода. Из указанных областей проведены вырезки стандартных продольных образцов по ГОСТ 10006-80, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9651-84 и нестандартных кольцевых образцов для последующих испытаний на растяжение при комнатной и рабочей температурах.

По результатам испытаний стандартных образцов на растяжение зафиксирована анизотропия свойств по периметру и протяженности труб, зависящая от концентрации водорода (рисунок 1). Важным результатом является то, что неравномерное распределение водорода характеризует неравномерное распределение механических характеристик в пределах одной трубы поверхности нагрева, даже на «остаточном водороде». Отличия в уровне свойств наиболее сильно проявляются при испытании при рабочей температуре эксплуатации, где разница достигает 15% против 7% при комнатной температуре.

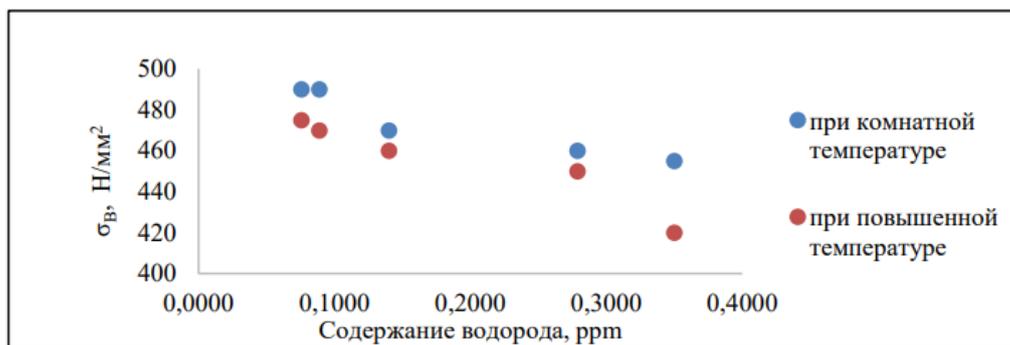


Рис. 1 – Зависимость временного сопротивления продольных (плоских) образцов от концентрации водорода

Показано, что в случае неравномерного распределения механических характеристик по окружностям труб или наличия анизотропии механических характеристик, эффективно применение нестандартных кольцевых образцов.

Из проведенных исследований следует вывод о необходимости водородного контроля готовой трубной продукции. При этом уровни критических концентраций водорода оказываются примерно на порядок меньшими, чем при стандартном для сталей измерении концентраций в пробах из расплавленного металла. Необходима разработка соответствующих стандартов на проведение измерений.

МИКРОМЕХАНИКА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ НЕСООТВЕТСТВИЯ В ТРУБЧАТЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Гуткин М.Ю.^{1,2,3}, Мордасова Е.А.¹, Колесникова А.Л.^{1,2}, Романов А.Е.²

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*3 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
m.y.gutkin@gmail.com*

Впервые построена упругая модель трубчатого дилатационного включения конечной длины в бесконечной упруго-однородной изотропной матрице. Подобные включения привлекают большое внимание в различных областях физического материаловедения, от наноразмерных квантовых колец в полупроводниковых наногетероструктурах до микроскопических трубчатых симплектических включений в минерале оливине метеоритного происхождения.

Образование таких включений вызывает появление упругих полей из-за несоответствия кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения включения и матрицы. Эти упругие поля и их релаксация, которая происходит за счет формирования дефектов несоответствия, существенно сказываются на свойствах подобных композитных систем, что вызывает большой интерес к изучению напряжений несоответствия и механизмов их релаксации.

В работе показано, что внутри включения, в полости, заполненной матрицей, уровень нормальных радиальных и окружных напряжений намного (в исследованном случае – на порядок) ниже, чем в стенке включения. При увеличении радиуса внутренней полости окружные напряжения в стенке возрастают, а снаружи от нее – убывают.

Предложен механизм релаксации этих напряжений за счет образования в разных местах прямоугольного сечения включения малых прямоугольных призматических дислокационных петель (ПДП). Ранее этот механизм исследовался применительно к наночастицам и нанопроволокам типа «ядро-оболочка». Получены и исследованы изменения полной энергии системы, вызванные образованием ПДП разной формы в разных точках прямоугольного сечения включения.

Показано, что наиболее предпочтительное место образования ПДП – это область в середине сечения стенки включения у ее внутренней границы. При этом наиболее предпочтительны ПДП, вытянутые вдоль этой границы. Критическое несоответствие, при котором образование этих ПДП становится энергетически выгодным, уменьшается с увеличением внешнего радиуса трубчатого включения и отношения его внутреннего и внешнего радиусов, и с уменьшением длины включения. Таким образом, оказалось, что включения в виде

плоских колец относительно больших радиусов с более тонкими стенками наименее устойчивы к рассмотренному способу релаксации напряжений несоответствия.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Рабинский Л.Н.¹, Дедова Д.В.^{1,2}, Мартиросов М.И.^{1,2}

1 - Московский авиационный институт, Москва, Россия

2 - ПАО "Яковлев", Москва, Россия

darina.dedova98@gmail.com

В настоящее время в различных областях техники нашли широкое применение трехслойные панели с сотовым наполнителем. Так в авиации из сотовых панелей изготавливают следующие элементы планера самолета: киль и форкиль, закрылки, предкрылки, руль направления, стабилизатор, элероны, рули высоты и т.д. Сотовые панели представляют собой пространственную конструкцию, состоящую из двух тонких прочных облицовочных пластин (обшивок) и толстой легкой сердцевины – наполнителя, разделяющего обшивки и обеспечивающего их устойчивость.

В результате причин различного характера, связанных с производством, технологией и эксплуатацией, в трехслойных панелях могут возникать дефекты (повреждения), которые оказывают влияние на прочность и несущую способность конструкции в целом. Основными повреждениями в конструкциях из сотовых панелей являются: вмятина, волнистость, царапина, пробоина односторонняя, пробоина сквозная, непроклей, межслоевые расслоения, отслоения, деформация сот, смятие торцевых граней, разрыв ячеек наполнителя, утяжка по ячейкам сотового наполнителя. Следует отметить, что единичные дефекты, определяемые современными средствами неразрушающего контроля на основании показаний приборов, на готовых изделиях допускаются.

В работе рассматривается часть сотовой панели корневого закрылка пассажирского самолета. Форма панели – прямоугольная в плане. Размеры панели и радиус кривизны заданы. В различных местах панели (в верхней обшивке) между монослоями и между монослоем и наполнителем присутствуют множественные дефекты произвольной формы.

Рассматриваются различные схемы укладки монослоев, например:

- 1) $+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/\text{Соты}/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ$;
- 2) $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/\text{Соты}/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ$;
- 3) $+45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ/\text{Соты}/-45^\circ/90^\circ/90^\circ/+45^\circ$;
- 4) $+45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/\text{Соты}/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ$.

Исследуются следующие материалы обшивок панелей: клеевые препреги марки КМКУ-2м.120.Р-2009 (углеродная ткань Р-2009 французской фирмы «Porsher Industries» Арт. 2009 и клеевая композиция), КМКУ-2м.120.Р-4510 (углеродная лента Р-4510 фирмы «Porsher Industries» Арт. 4510 и клеевая композиция), а также клеевые препреги марки КМКС-2м.120.Т60 (стеклоткань Т60/2(ВМП)-78 и клеевая композиция), КМКС-2м.120.Т64 (стеклоткань Т64/2(ВМП)14 и клеевая композиция). В качестве материалов сотовых наполнителей рассматриваются: ПСП-1-2,0-48, ПСП-1-2,0-96; ПСП-1К-2,0-48, ПСП-1К-2,0-96; ПСП-1-2,5-48, ПСП-1-2,5-96; ПСП-1К-2,5-48, ПСП-1К-2,5-96; ССП-1-2,5.

В качестве нагрузки, действующей на сотовую панель, рассматривается воздействие от набегающей волны давления заданной интенсивности, имитирующей действие потока струи двигателя пассажирского самолета на панель корневого закрылка, являющуюся трехслойной.

Задача решается численно методом конечных элементов (МКЭ). Создание конечно-элементной модели осуществляется в программном комплексе Simcenter Femap. Каждый монослой моделируется отдельным набором конечных элементов (КЭ). Затем модель импортируется в программный комплекс LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.), где задается нагрузка и граничные условия.

В результате проведенного численного исследования определяется распределение полей напряжений и деформаций в монослоях обшивок панелей в различные моменты времени. Вычисляется распределение индекса разрушения по различным критериям разрушения применительно к ПКМ. Расчет проводится по критериям Puck, Hashin, Puppo-Evcencen, LaRC (Langley Research Center). Считается, что разрушение наступает, когда индекс разрушения становится равным единице.

Приводится сравнение полученных результатов для панелей с различными вариантами исполнения

сотового заполнителя и обшивок, а также сравнение результатов для панелей с дефектами и неповрежденными панелями. Проводится параметрический и сравнительный анализ.

ИЗГИБ ТОЛСТЫХ, ТОНКИХ И УЛЬТРАТОНКИХ КВАДРАТНЫХ ПЛАСТИН

Дигилов А.В.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
avdigilov@gmail.com

В настоящее время в микроэлектромеханических системах (МЭМС) в качестве упругих элементов часто используют различные пластины. Их относительная толщина варьируется в очень широком диапазоне: от толстых пластин акселерометров до ультратонких пластин, используемых в ответственных узлах оборудования для фотолитографии (отношение толщины к радиусу менее 1/1000). В МЭМС разные упругие элементы могут работать в кардинально различающихся условиях, и поэтому оптимальная расчетная модель должна выбираться для каждого элемента индивидуально. На практике при выборе подходящей модели изгиба пластины инженер обычно ориентируется на соотношение толщины пластины и ее характерного размера (радиуса если речь идет о круглой пластине или длины одной из сторон в случае прямоугольной пластины). Этот подход хорошо себя показывает в тех случаях, когда прогибы пластины можно заведомо считать малыми, а погрешности различных моделей обусловлены лишь принимаемыми кинематическими гипотезами. Однако при расчете гибких упругих элементов МЭМС на первый план выходят нелинейные факторы, которые обычно не проявляют себя, например, взаимное влияние натяжения и изгиба пластины. В этой связи представляется актуальным подробное исследование границ применимости классических моделей пластин, с помощью которого можно выбрать оптимальную расчетную модель для каждой конкретной пластины. Ранее подобное исследование было проведено для круговых пластин [1].

В настоящей работе исследуются границы применимости четырех моделей: модель линейной теории упругости, классическая модель пластин Кирхгофа – Лява, модель гибких пластин Феппля – фон Кармана, модель гиперупругой мембраны Грина – Ривлина – Адкинса [2]. Такой выбор моделей обусловлен удачным сочетанием учитываемых факторов и позволяет оценить влияние каждого из них. Сводная характеристика рассмотренных моделей приведена в Таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика моделей

	Линейная теория упругости	Модель Кирхгофа -- Лява	Модель Феппля – фон Кармана	Модель Грина – Ривлина -- Адкинса
Кинематическая гипотеза	Отсутствует	Гипотеза Кирхгофа	Гипотеза Кирхгофа	Не учитывает изгибную жесткость
Учет конечных перемещений	Не учитывает	Не учитывает	Частично учитывает (гипотезы Кармана)	Учитывает
Материал	Линейно-упругий материал	Линейно-упругий материал	Материал Сен-Венана - Кирхгофа	Материал Муни - Ривлина

В работе построена шкала «относительных толщин», которая позволяет по геометрическим параметрам пластины и примерному ожидаемому прогибу рекомендовать одну из четырех моделей для расчета изгиба квадратной пластины.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00866.

Литература

1. С.А. Лычев, А.В. Дигилов, Н.А. Пивоваров. // Изгиб кругового диска: от цилиндра к ультратонкой мембране // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2023. Т. 29. № 4. С. 77-105.
2. А. Грин, Д. Адкинс // Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды. 1965. 456 с.

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ TiAlTaSiN

Дмитриев А.И., Шугуров А.Р.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
dmitr@ispms.ru

Среди большого многообразия защитных покрытий наибольшее распространение получили покрытия на основе нитридов переходных металлов. На сегодняшний день наиболее перспективными являются покрытия TiAlN, легированные дополнительными химическими элементами, а также многослойные композиции, свойства которых эффективно дополняют друг друга. Как показали недавние исследования [1], одним из наиболее перспективных легирующих элементов является Ta, который позволяет не только существенно увеличить трещиностойкость покрытий. Тем не менее, и у таких покрытий есть определенные недостатки, например образование столбчатых кристаллов. Принимая во внимание имеющиеся данные, перспективным направлением улучшения свойств покрытий на основе Ti-Al-N является одновременное введение Ta и Si, что позволит создать покрытия, обладающие комбинацией улучшенных свойств, характерных для композиций TiAlTaN и TiAlSiN.

Наряду с экспериментальными исследованиями задача получения и изучения механических свойств новых многокомпонентных покрытий может быть существенно ускорена путем проведения компьютерного моделирования. В работе на основе теории функционала электронной плотности были рассчитаны парные потенциалы межатомного взаимодействия для систем Si-Ti, Si-Al, Si-Ta и Si-N. С использованием полученных потенциалов была построена молекулярно-динамическая модель многокомпонентного покрытия. С помощью моделирования анализировалась устойчивость разработанной модели к различным механическим воздействиям. Исследовалось влияние концентрации легирующих включений и кристаллографической ориентации зерен многокомпонентного покрытия по отношению к прикладываемой нагрузке на его прочностные и деформационные свойства. Получено качественное согласие результатов моделирования с данными экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-19-00441.

Литература

1. Yang Y., Xu Y.X., Chen L., Mayrhofer P.H. Improved Ti-Al-N coatings through Ta alloying and multilayer architecture. Surf. Coat. Technol. 2017. V. 328. P.428-435.

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКА НА МОРФОЛОГИЮ ВАННЫ РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Добрянский В.Н.¹, Соляев Ю.О.^{1,2}

1 - Московский авиационный институт, Москва, Россия

2 - Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

dobryanskijvn@mai.ru

В работе исследовано влияние гранулометрического состава порошка сплава AlSi10Mg на морфологию ванны расплава в экспериментах на уровне единичных треков, получаемых методом селективного лазерного плавления (СЛП). Известные классические решения для моделирования лазерной сварки, построенные в безразмерном виде, обобщены для решения задач анализа процесса СЛП. На основе аналитического и численного моделирования даются оценки морфологии ванны расплава и качества получаемых при различных технологических параметрах единичных треков.

Введение

Формирование ванны расплава является основным этапом селективного лазерного плавления. Получаемый в процессе остывания ванны единичный трек является элементарной строительной единицей, к исследованию которой часто прибегают для более глубокого понимания физических процессов, протекающих

при СЛП металлических порошков, и влияния на них технологических параметров процесса [1-3]. В настоящей работе оценивалась возможность прогноза морфологии ванны расплава, морфологии единичного трека и его качества.

Экспериментальные исследования

Эксперимент по сплавлению единичных треков проводился на 3D-принтере AddSol D50. В исследовании использовался порошок различного гранулометрического состава (D50: 20 мкм, 26 мкм, 37 мкм, 50 мкм, 73 мкм и 35 мкм (стандартный порошок)). Для каждого порошка были получены единичные треки при различных комбинациях мощности и скорости источника. Мощность источника варьировалась в диапазоне 40-400 Вт с шагом 36 Вт. Скорость источника варьировалась от 100 до 1980 мм/с с шагом 235 мм/с. Толщина порошкового слоя – 60 мкм.

Модели подвижного источника для моделирования процесса СЛП

Для описания процесса СЛП часто используются модели точечных и распределенных подвижных источников [4-5]. Рассматриваемые в исследовании задачи сводятся к решению задачи о полупространстве, по поверхности которого движется точечный или распределенный источник тепла. В настоящей работе обсуждается возможность применения различных моделей подвижного источника (точечного, распределенного, линейного) в безразмерном виде для описания процесса СЛП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2023-0004).

Литература

1. Yadroitsev I., Smurov I. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape //Physics Procedia. – 2010. – Т. 5. – С. 551-560.
2. Aversa A. et al. Single scan track analyses on aluminium based powders //Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Т. 255. – С. 17-25.
3. Aboulkhair N. T. et al. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties //Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Т. 230. – С. 88-98.
4. Ramos-Grez J. A., Sen M. Analytical, quasi-stationary Wilson-Rosenthal solution for moving heat sources //International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Т. 140. – С. 455-465.
5. Solyaev Y., Lurie S. Gradient models of moving heat sources for powder bed fusion applications //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Т. 196. – С. 123221.

МЕТОДЫ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ТЕЧЕНИЯ В КВАДРАТНОЙ ЯЧЕЙКЕ ДЛЯ ЗАДАЧИ КОЛМОГорова

Гузев М.А.¹, Долуденко А.Н.², Посудневская А.О.^{3,4}, Ермаков А.Д.⁴, Фортгова С.В.⁴

1 - *Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия*

2 - *Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

3 - *Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Москва, Россия*

4 - *Институт автоматизации проектирования РАН, Москва, Россия*

adoludenko@gmail.com

Основной особенностью двумерного турбулентного течения, возбуждаемого стационарной внешней силой (задача Колмогорова), является возникновение обратного каскада энергии [1]. За счет нелинейных эффектов пространственный масштаб вихрей, создаваемых силой, увеличивается до тех пор, пока рост не будет остановлен размером ячейки, приводя к накоплению энергии на этом масштабе. При такой локализации энергии в определенных условиях формируются системы когерентных вихрей [2]. Дальнейшая диссипация энергии происходит за счет наличия трения о дно. В зависимости от величин коэффициента трения о дно α , амплитуды силы накачки G и числа Рейнольдса Re могут возникать различные типы течения (рис. 1): ламинарный, хаотический, переходный и вихревой [2, 3].

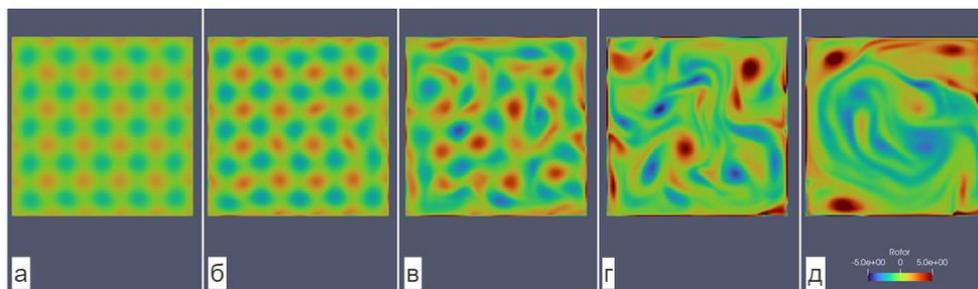


Рис. 1. Поля завихренности при фиксированных параметрах $G=0,05, \mu=0,01$, и различных α в ламинарном (а) ($\alpha=0,3, Re=1,5 \cdot 10^4$), переходных (б) ($\alpha=0,2, Re=2,2 \cdot 10^3$), (в) ($\alpha=0,01, Re=7,8 \cdot 10^3$), турбулентном (г) ($\alpha=0,001, Re=1,0 \cdot 10^4$) и вихревом (д) ($\alpha=0,0001, Re=1,3 \cdot 10^4$) режимах течения.

Существуют разные способы классификации режимов возникающих течений. Построенные в [3] фазовые диаграммы течений на плоскости (G, α) позволяют по значениям величин коэффициента трения о дно и силы накачки определять его тип. Анализ поведения завихренности и исследование коэффициентов Фурье скорости и энергии дополняет информацию о типах течения.

В данной работе для классификации различных типов течений, характеристики которых получены при численном моделировании, кроме выше перечисленных способов анализа, применяется метод ранговых распределений Маслова [4]. Показано, что различным типам течений задачи Колмогорова соответствуют различные функциональные ранговые распределения, построенные для завихренности и частот ее встречаемости. Это позволяет использовать ранг и завихренность (частота встречаемости) в качестве новых фазовых переменных для классификации течений.

Литература

1. Kolmogorov A. N., Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 30, 299303 (1941).
2. Doludenko, A.N., Fortova, S.V., Kolokolov, I.V., Lebedev, V.V. Coherent vortex in a spatially restricted two-dimensional turbulent flow in absence of bottom friction // Physics of Fluids. – 2021. – V. 33. – Paper 011704.
3. Doludenko, A.N., Fortova, S.V., Kolokolov, I.V., Lebedev, V.V. Coherent vortex versus chaotic state in two-dimension turbulence // Annals of Physics 2022 Vol. 447 part 2, 169072
4. Guzev M.A., Nikitina E.Y., Chernysh E.V. V.P. Maslov's Approach to the Analysis of Rank Distributions // Russian Journal of Mathematical Physics. 2021. V. 28, N 1. P. 56-65.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ИЗГИБ ШАРНИРНО ОПЕРТОЙ МОМЕНТНОЙ УПРУГОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

До Н.Д.¹, Тарлаковский Д.В.^{1,2}

1 - Московский авиационный институт, Москва, Россия

2 - МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ngocdatkts@mail.ru

Рассматривается нестационарный изгиб шарнирно опертой моментной упругой прямоугольной пластины. Используется прямоугольная декартова система координат. К уравнениям движения в усилиях добавляются физические соотношения – выражения внутренних силовых факторов через кинематические параметры. Полагается, что на границах пластины выполняются условия обобщенного шарнирного опирания – равенство нулю прогиба, а также моментов от тензоров напряжений и моментов напряжений. Начальные условия нулевые.

В общем случае получены из общей системы уравнений [1] система уравнений в «перемещениях» (кинематических параметрах) содержит шесть уравнений. Для снижения размерности задачи применяются три варианта дополнительных гипотез: первая из них не учитывает обжатие поперечного волокна, вторая использует гипотезу Кирхгофа-Лява и третья объединяет эти два предположения. Им соответствуют системы из пяти, четырех и трех уравнений относительно пяти, четырех и трех кинематических параметров.

Для решения задач прогиба представляются в виде двойных тригонометрических по собственным функциям оператора Лапласа, а углы поворота раскладываются в ряды по производным этих функций.

Показано, что при этом граничные условия удовлетворяются. Построены начальные задачи для систем линейных обыкновенных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов этих рядов. Их интегрирование осуществляется численно. Суммирование рядов проводится с заданной точностью по непрерывной норме.

В качестве примера рассматривается нагрузка в виде сосредоточенной нормальной силы, изменяющейся по времени как функция Хевисайда. Расчеты проводятся для нагрузки в центре квадратной пластины, материалом которой является композит из алюминиевой дроби в эпоксидной матрице [2,3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-19-00217).

Литература

1. Тарлаковский Д. В., Май Куок Чиен Начально-краевые задачи для моментных упругих пластин // Проблемы безопасности на транспорте: матер. XII Междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д.: в 2 ч., Гомель, 24–25 ноябр. 2022 г. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 262–263.
2. Ерофеев В.И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 328с.
3. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Солдатов И.Н. Волновые процессы в сплошных средах. Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2012. 260 с.

БАЛАНС ПОТОКА ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Дроздов С.О.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
Санкт-Петербург, Россия
so.drozдов@gmail.com*

В механике уравнение баланса импульса является основополагающим уравнением, позволяющим описывать движение тел. Известно, что при анализе распространения энергии аналогичную роль играет уравнение баланса потока энергии. Так, в частности, при описании распространения энергии в электромагнитном поле вводится вектор Пойнтинга [1], представляющий собой плотность потока энергии. Уравнение баланса энергии в электромагнитном поле аналогично уравнению баланса массы в механике сплошной среды. А уравнение баланса потока энергии в электромагнитном поле аналогично уравнению баланса импульса в механике сплошной среды. Уравнение баланса потока энергии в однородной среде известно и представлено, например, в работе [2]. Аналогия между уравнением баланса импульса в механике сплошной среды и уравнением баланса потока энергии подчеркивается используемой терминологией: в уравнении баланса потока энергии вводится тензор напряжений Максвелла.

В данной работе получено уравнение баланса потока энергии в случае неоднородной среды без токов и зарядов. Заметим, что с точки зрения теории относительности реализуется закон баланса суммарного импульса вещества и электромагнитного поля [1,2,3]. Роль импульса электромагнитного поля как раз играет плотность потока энергии деленная на квадрат скорости света. Поправки, связанные с неоднородностью среды, как раз указывают на то, что электромагнитный импульс переходит в импульс среды в которой распространяется электромагнитное поле и наоборот.

Также в данной работе рассматривается понятие энергетического центра возмущения в электромагнитном поле, которое вводится по аналогии с понятием центра масс. Данный подход к описанию движения энергии представлен в статье [4], в котором он применен для описания движения энергетического центра возмущения в цепочке точечных масс. Положение энергетического центра возмущения в электромагнитном поле задается выражением (1).

$$\vec{r}_c \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{W} \int w \vec{r} dV. \quad (1)$$

Здесь w – плотность энергии электромагнитного поля, W – полная энергия электромагнитного поля.

Для описания движения энергетического центра записывается уравнение (2), аналогичное второму закону Ньютона.

$$W \ddot{\vec{r}}_c = \Phi. \quad (2)$$

В этом выражении величина Φ называется энергетической силой. Энергетическая сила позволяет

описать движение энергетического центра аналогично тому, как сила позволяет описать движение центра масс. В данной работе используются различные приближения, позволяющие получать выражения для энергетической силы в частных случаях, что позволяет записать уравнение динамики энергетического центра возмущения в электромагнитном поле.

Литература

1. Сивухин Д.В. 2020 Общий курс физики. Том 3. Электричество М.: ФИЗМАТЛИТ.
2. С. В. Измайлов. 1962. Курс электродинамики. М.: Гос. уч.-пед. изд. минпросв. РСФСР.
3. А.Г. Куликовский, Г. А. Любимов. 1962. Магнитная гидродинамика. Гос. изд. физ.-мат. лит.
4. Krivtsov A.M. Dynamics of matter and energy. Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik, 2022.

УЧЕТ ВРЕМЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Евард М.Е.¹, Волков А.Е.¹, Беляев Ф.С.^{1,2}, Стародубова М.С.¹, Вуколов Е.А.¹

1 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

2 - Институт Проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

m.evard@spbu.ru

Во многих случаях при разработке приложений из сплавов с памятью формы (СПФ) требуется учет зависимости их функционально-механических свойств от времени (скорости) термомеханического воздействия: деформирования или нагружения, нагрева или охлаждения. Несмотря на широкие описательные возможности современных моделей СПФ, существует очень небольшое число моделей, позволяющих рассчитать зависящие от времени свойства этих сплавов. Основными факторами, влияющими на чувствительность свойств СПФ к длительности воздействия, являются выделение скрытой теплоты при прямом мартенситном превращении и ее поглощение при обратном, условия теплообмена с окружающей средой, изменение во времени плотностей дефектов кристаллической структуры.

В настоящей работе в рамках микроструктурной модели, включающей внутренние переменные и уравнения, описывающие протекание фазовых превращений и эволюцию дефектов с учетом зависимости этих процессов от времени, для ряда режимов термомеханического нагружения (изотермическое деформирование в псевдоупругом состоянии и изобарные охлаждение и нагрев), найдены решения определяющих соотношений микроструктурной модели при различных условиях теплообмена. Эти решения позволили выявить влияние скорости приложения нагрузки и условий теплообмена с окружающей средой на развитие псевдоупругой деформации, рассчитать изменения количества мартенсита и деформации за счет изотермического превращения при выдержке образца в изобарных и изотермических условиях, а также выполнить моделирование работы виброзащитного устройства с элементом из СПФ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-21-00167.

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА НА ТРАНСПОРТ ПРИМЕСИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Евграфова А.В., Марышев Б.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

eav@icmm.ru

Не смотря на несомненный интерес исследователей к транспорту примеси в пористой среде, большинство работ посвящено стационарному фильтрационному потоку и процессу смешивания на границе раздела. При этом естественные системы редко находятся в стационарном состоянии. Временные колебания фильтрационного потока приводят к изменениям поля скоростей, что может способствовать наиболее эффективному вытеснению примеси. При этом повышение эффективности выноса загрязняющих веществ из пористой среды является одной из ключевых задач, не только в природных, но и в промышленных приложениях.

Насколько известно авторам, экспериментальных работ по анализу эффективности процесса

фильтрации в сочетании с изменяющимся горизонтальным гидравлическим градиентом, на сегодняшний день, очень мало. Так в [1, 2] проведено исследование влияния временных флуктуаций интенсивности потока на распространение шлейфов растворенных веществ в однородных и неоднородных водоносных горизонтах. Было показано, что колебания потока имеют существенное влияние на перенос загрязняющих веществ только в том случае, если амплитуда и период колебаний относительно велики.

В данной работе проведен анализ эффективности транспорта примеси в горизонтальной пористой колонне. В качестве механизма управления использовано воздействие переменного фильтрационного потока. В качестве пористой среды использован кварцевый песок с размером фракций 0.8 – 1.2 мм. В качестве примеси использованы водные растворы $NaCl$ массовой концентрации от 1 до 10 %. Амплитуда пульсаций расхода варьировалась в пределах от 10 до 50 % от стационарного значения, период колебаний расхода выбирался соответственно параметрам эксперимента. Показано, что в определенном диапазоне параметров пульсаций расхода возможно увеличение эффективности выноса примеси на 10 %. Однако, этот показатель может быть увеличен путем изменения проницаемости среды. Обнаружено, что пульсации способны ослаблять влияние возникающих в системе конвективных течений на процессы переноса примеси..

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-11-20125.

Литература

1. M. Elfeki, G. J. Uffink, S. Lebreton // Simulation of solute transport under oscillating groundwater flow in homogeneous aquifers, Journal of Hydraulic research, 45.2 2007. 254-260
2. M. Elfeki, G. J. Uffink, S. Lebreton // Influence of temporal fluctuations and spatial heterogeneity on pollution transport in porous media, Hydrogeology Journal, 20(2) 2012. 283-297

О НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТОВ В ЧЕТВЕРТИ ПЛОСКОСТИ

**Евдокимова О.В.¹, Бабешко В.А.², Уафа С.Б.², Евдокимов В.С.², Бабешко О.М.²,
Лозовой В.В.¹**

1 - Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

2 - Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

evdokimova.olga@mail.ru

В работе впервые дается точное решение трехмерного интегрального уравнения Винера-Хопфа, одномерные и двумерные варианты которого широко применяемого в смешанных, в том числе, контактных задачах.

Основание, на который действует жесткий штамп в форме четверти плоскости, может быть многослойным анизотропным материалом, для которого можно построить функцию Грина и вывести интегральное уравнение контактной задачи.

В данном докладе, наряду с геометрическими координатами, описывающими расположение штампа в первом квадранте не границе многослойной среды, введена третья координата, описывающая изменение времени. Предполагается, что время в рассматриваемой граничной задаче идет из бесконечности, пересекает нулевую отметку и продолжает расти.

Таким образом, исключено требование в постановке задачи Коше, когда необходимо задание начальных условий.

Попытки аналитического или численного решения этой задачи авторам не известны. Результаты могут оказаться полезными в областях использования уравнения Винера-Хопфа в материаловедении, где применяются одномерные варианты, а также в сейсмологии. Как и в двумерном случае, при исследовании применяется универсальный метод моделирования на базе блочных элементов.

Постановка задачи

Рассматривается интегральное уравнение Винера-Хопфа, заданное в первом квадранте [1]. Оно имеет вид

$$\mathbf{K}q = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty k(x-\xi, y-\eta, z-\zeta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta d\zeta = f(x, y, z),$$

$$k(x, y, z) = \frac{1}{8\pi^3} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} \int_{\Gamma_3} K(\alpha, \beta, \gamma) e^{-i(\alpha x + \beta y + \gamma z)} d\alpha d\beta d\gamma, \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad 0 \leq y \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty$$

$$Q(\alpha, \beta, \gamma) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q(\xi, \eta, \zeta) e^{i(\alpha\xi + \beta\eta + \gamma\zeta)} d\xi d\eta d\zeta$$

$$F(\alpha, \beta, \gamma) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty f(\xi, \eta, \zeta) e^{i(\alpha\xi + \beta\eta + \gamma\zeta)} d\xi d\eta d\zeta$$

$$K(\alpha, \beta, \gamma) = O(\alpha^{-1}), \quad \beta = const; \quad \gamma = const, \quad K(\alpha, \beta, \gamma) = O(\beta^{-1}), \quad \alpha = const, \quad \gamma = const$$

$$K(\alpha, \beta, \gamma) = O(\gamma^{-1}) \quad \alpha = const \quad \beta = const \quad |\alpha|, |\beta|, |\gamma| \rightarrow \infty$$

Отдельные фрагменты работы выполнены в рамках реализации Госзадания на 2024 г. Минобрнауки, проект (FZEN-2023-0006) и ЮНЦ РАН тема 01201354241-0.

Литература

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М Точное решение универсальным методом моделирования контактной задачи в четверти плоскости многослойной среды. // Прикладная математика и механика, 2022, том 86, № 5, С. 628–637

РАЗРАБОТКА ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Егоров Д.К., Чугунов С.С., Коломенский Д.С.

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия
daniil.egorov@skoltech.ru

Керамические материалы представляют большой практический и научный интерес в связи с их уникальными физико-химическими свойствами, такими как высокая прочность, термическая и химическая стабильность и биосовместимость. В последние годы, ввиду стремительного развития аддитивного производства, стало возможным создание керамических деталей самых сложных форм. Управление качеством таких деталей является актуальной проблемой из-за возникающих нежелательных деформаций зеленых образцов (заготовок перед термической обработкой, содержащих керамический наполнитель и органическое связующее) в процессе изготовления. Причина таких деформаций скрывается в возникновении внутренних напряжений и их накоплении в процессе послойной печати, эти напряжения вызваны сложным механическим поведением материала при полимеризации под воздействием ультрафиолетового излучения.

В представленной работе рассматриваются методы 3D-печати на основе фотополимеризации суспензии с использованием жидких или полужидких систем в форме чернил или паст, диспергированных с мелкими керамическими частицами в качестве сырья, а именно стереолитография и ее производные.

Математическая модель основывается на уравнениях для распространения излучения через гетерогенную среду с учетом эффекта рассеяния, поглощения этого излучения и вызванного излучением процесса полимеризации. Уровень полимеризации позволяет определить упругие характеристики образца (модули Юнга и сдвига), которые затем используются для нахождения полей деформаций и внутренних напряжений путем решения уравнений механики деформируемого твердого тела. Применение данной модели поможет предотвратить появление таких дефектов, как нежелательные деформации, расслоения и трещины зеленых керамических образцов.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТПМП

Еленская Н.В.¹, Ташкинов М.А.¹, Виндокуров И.В.¹, Келлер И.Э.², Адамов А.А.²

*1 - Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

*2 - Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
n.elenskaya@pstu.ru*

Тканевая инженерия является перспективной стратегией восстановления или замещения поврежденных костных тканей. Несмотря на то, что кости обладают способностью самовосстанавливаться, длительность реабилитации может оказывать значительное влияние на качество жизни пациента. В связи с этим особо актуален вопрос проектирования искусственного объекта, способного эффективно заместить поврежденный участок и ускорить таким образом процесс восстановления целостности тканей. Механические свойства костных скаффолдов играют ключевую роль в регенерации, поскольку необходимо обеспечить не только структурную поддержку окружающим тканям, но и соответствие механических характеристик скаффолда свойствам костной ткани. При этом, поскольку проектируемый имплантат должен взаимодействовать с окружающей его биологической средой, при проектировании необходимо также учитывать морфометрические характеристики костной ткани, влияющие на прикрепление, миграцию, пролиферацию и дифференцировку клеток.

Один из подходов к проектированию скаффолдов заключается в применении трижды периодически минимальных поверхностей (ТПМП). Конечная морфология структуры зависит от выбора базовой ТПМП, её начальной ориентации, подхода к проектированию, а также выбора начальных параметров масштабирования и пористости. Полученный таким образом геометрический объект описывается аналитическим выражением с различными параметрами, варьирование которых позволяет получить структуру с оптимальным механическим откликом и приблизить морфометрические характеристики скаффолда к структуре костной ткани. Анизотропия, свойственная костной ткани, может быть получена за счет функционального градиента. Такие персонализированные объекты могут быть изготовлены из полимерных материалов с применением методов 3д-печати. Механические свойства полимерных структур в значительной степени зависят как от технологических параметров изготовления, так и от условий нагружения: в зависимости от скорости деформирования структура может вести себя как упругий или как упругопластический материал, при этом отдельные элементы скаффолда будут деформироваться с разной скоростью. В связи с этим становится актуальным вопрос прогнозирования механического поведения таких аддитивно-изготовленных объектов.

Данное исследование направлено на изучение упругопластического поведения полимерных решетчатых структур на основе ТПМП. Все исследуемые модели были спроектированы с учетом морфометрических особенностей костной ткани. Свойства материала моделей соответствуют свойствам полилактида (PLA), которые были определены из серии испытаний на сжатие сплошных цилиндрических образцов. Для учета влияния скорости пластических деформаций была использована модель Джонсона-Кука, параметры которой определены на основе экспериментальных данных модели. Анализируется влияние типа поверхности, а также варьирования морфометрических параметров ТПМП на механический отклик при различных режимах нагружения. Исследования проводятся численно с применением метода конечных элементов, валидация численной модели проводится за счет сопоставления эффективного упругого отклика и деформационной картины с экспериментальными исследованиями. Оценивается влияние скорости деформации на локализацию пластических деформаций в структуре. Предложенный подход может применяться для прогнозирования механического поведения разрабатываемых новых биомедицинских продуктов для замещения костной ткани.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0003).

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТТРАКТОРОВ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫМ К ПРИРОДНЫМ БАССЕЙНАМ

Елистратов С.А.^{1,2,3}, Бут И.И.², Сибгатуллин И.Н.^{1,2}

1 - Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия

2 - Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Россия

3 - Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Россия

sa.elist-ratov@yandex.ru

Волновой аттрактор – явление самофокусировки пучков внутренних/инерционных волн в стратифицированной/вращающейся среде в специфической геометрии. До сих пор исследования аттракторов внутренних волн было сосредоточено на модельной постановке в достаточно простой геометрии с монохроматическим внешним воздействием и линейным профилем стратификации. Настоящее исследование посвящено влиянию таких аспектов, как геометрия области, профиль стратификации и внешнее воздействие, на режим течения с аттрактором, причем указанные условия выбираются с учетом физических условий в природных бассейнах.

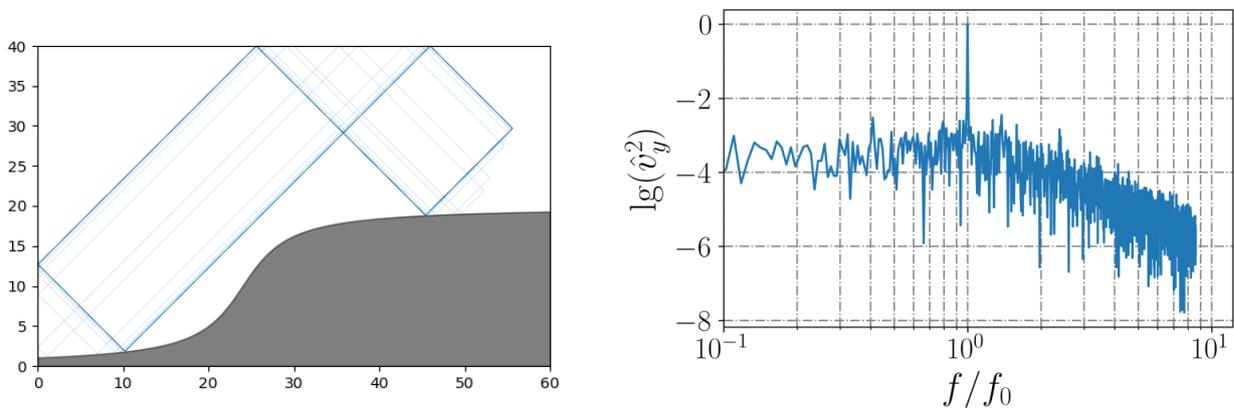


Рис.1. Аттрактор в области с подводным плато: трассировка лучей (слева) и нетипичный спектр без триадных резонансов (справа)

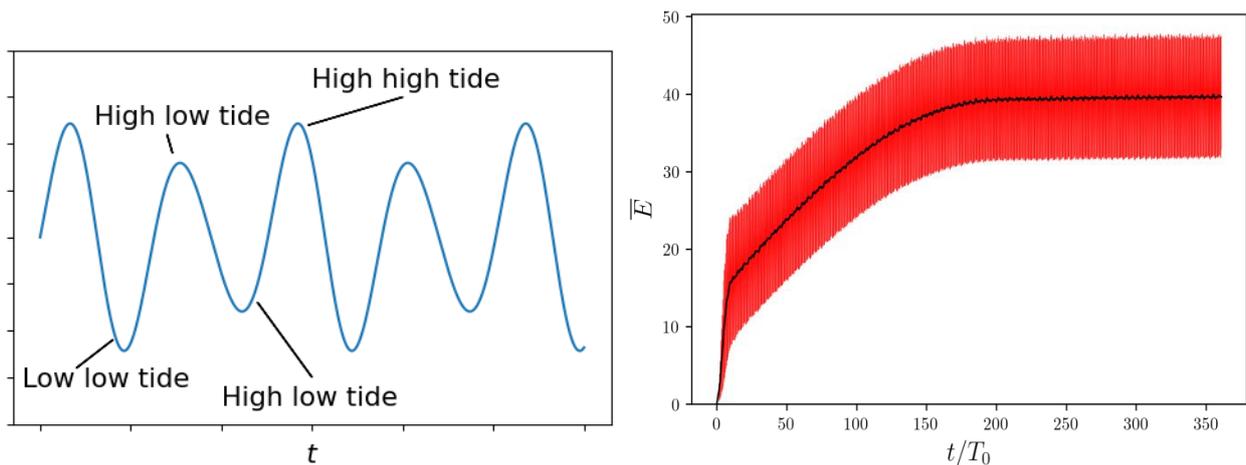


Рис.2. Аттрактор с возмущением смешанного прилива: профиль воздействия (слева) и эволюция кинетической энергии (справа)

Показано, что изменение указанных параметров может существенно влиять на такие характеристики течения, как аккумуляция кинетической энергии, время формирования когерентной структуры и развитие турбулентности, а также приводить к качественно новым эффектам.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ «ПЬЕЗОАКТУАТОР - СЛОИСТЫЙ АНИЗОТРОПНЫЙ ВОЛНОВОД»

Еремин А.А., Варелджан М.В., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.

Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия
eremin_a_87@mail.ru

Важным этапом в проектировании систем неразрушающего контроля и мониторинга состояния конструкций из анизотропных композитных материалов, использующих в качестве физической основы бегущие упругие волны, является компьютерное моделирование функционирования пленочных пьезопреобразователей в качестве источников ультразвуковых колебаний. Распространенным подходом к решению данной задачи является использование метода конечных элементов (МКЭ) и его модификаций. Однако применение МКЭ по-прежнему требует значительных вычислительных ресурсов, в особенности в случае моделирования волновой динамики протяженных трехмерных композитных конструкций. Поэтому актуальным является развитие альтернативных численных схем на основе полуаналитических методов или сочетания сеточной дискретизации с аналитическими представлениями для бегущих упругих волн, позволяющих сократить вычислительные затраты и эффективно проводить параметрический анализ соответствующих волновых процессов.

Для бегущих волн, возбуждаемых заданной поверхностной нагрузкой в слоистой анизотропной подложке, имеются явные интегральные и асимптотические представления [1]. Вся информация об источнике колебаний входит в них через вектор-функцию контактных напряжений, поэтому, если она известна, то становятся доступными все преимущества полуаналитического подхода, такие как быстрое определение амплитудно-частотных характеристик возбуждаемых волн и распределение между ними волновой энергии, поступающей от источника с учетом его собственной деформации, а также влияния таких сопутствующих факторов, как наличие клеевой прослойки между пьезоэлементом и волноводом, сложной геометрии электродирования пьезоэлемента и т.п. Для определения амплитудных коэффициентов, входящих в явные асимптотические представления для возбуждаемых пленочным пьезоактуатором бегущих волн, была разработана и реализована двухэтапная вычислительная схема. На первом этапе пространственная контактная задача о динамическом взаимодействии пьезопреобразователя с анизотропной подложкой решается с помощью МКЭ. Далее, ввиду негладкости конечноэлементной аппроксимации напряжений, они находятся из решения системы граничных интегральных уравнений (ГИУ), в которых полученные с помощью МКЭ смещения входят в правую часть, а ядро определяется матрицей Грина подложки. Для преобразователя произвольной в плане формы численное решение двумерных ГИУ строится вариационно-разностным методом, причем более устойчивые результаты получаются, если в качестве правой части берутся смещения на противоположной стороне волновода [2].

Возможность применения разработанной методики в случае моделирования процессов возбуждения бегущих упругих волн пленочными пьезоэлементами подтверждается сопоставлением получаемых на ее основе результатов с полными МКЭ-моделями, а также с экспериментальными данными для образцов из слоистых углепластиков. В качестве примера использования предложенной двухэтапной схемы для параметрического анализа волновых процессов изучается распределение волновой энергии по отдельным нормальным модам, возбуждаемым пленочным пьезоэлементом в анизотропной подложке, в зависимости от геометрических характеристик актуатора и упругих свойств материала волновода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZEN-2024-0003.

Литература

1. E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin // Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites, *J. Acoust. Soc. Am.*, 129:5 2011. 2923-2934
2. М. В. Варелджан // Двухэтапная вычислительная схема для моделирования возбуждения упругих колебаний в изотропном слое поверхностным пьезопреобразователем, *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 21:1 2024. 57-69

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЕГМЕНТ ПОЗВОНОЧНИКА, ПОРАЖЕННОГО ОСТЕОСАРКОМОЙ

Еремина Г.М., Смолин А.Ю.

Институт физики прочности и материаловедения, Томск, Россия
anikeeva@ispms.ru

Остеосаркома считается одним из видов рака наиболее способным к активному развитию вторичных опухолевых процессов. Недавние исследования показали, что к росту и миграции раковых клеток приводит относительно небольшие величины сжимающего напряжения более 40 кПа, а большая амплитуда может привести к остановке роста опухоли. В то же время большие величины внешнего механического воздействия могут приводить к деградации костных тканей. Поэтому актуальным является исследование влияния уровня механической стимуляции (УВТ) на поражённые неопластическими процессами костные ткани с целью регенерации тканей скелета и деактивации раковых областей [1]. В связи с вышесказанным целью данной работы является разработка численной модели механического поведения остеосаркомы при ударно-волновом нагружении.

В данной работе была разработана модель сегмента грудного отдела позвоночника, пораженного остеосаркомой. Сегмент позвоночника состоял из кортикальной оболочки и губчатого вещества позвонка, а также межпозвоночного диска, включающего в себя хрящевые пластины (ХП), фиброзные кольца (ФК) и пульпозное ядро (ПЯ) (рис.1). Моделировалось инвазивное ударно-волновое нагружение. Медный аппликатор располагался в области верхнего суставного отростка Т4. Исследовалось влияние УВ в диапазоне от 0.02 до 0.2 мДж/мм².

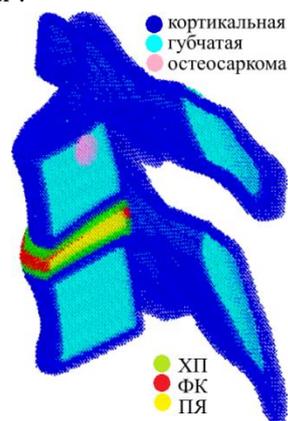


Рис. 1. Модель сегмента грудного отдела позвоночника, пораженного остеосаркомой

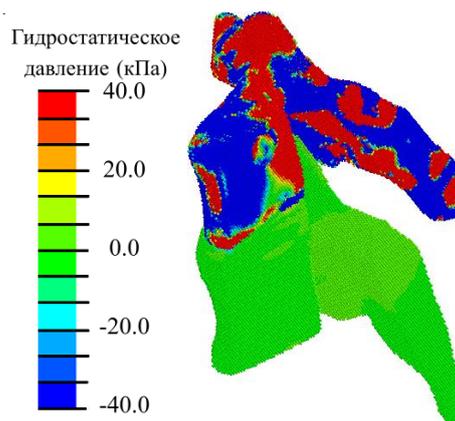


Рис. 2. Распределение гидростатического давления в грудном отделе позвоночника при УВВ 0.1 мДж/мм²

На основе анализа полей распределения параметра гидростатического давления с учетом критерия деактивации (40кПа) было установлено, что при малоинтенсивном УВ воздействии 0.02 мДж/мм² до 0.05 мДж/мм² в раковой опухоли не наблюдаются условия для деактивации раковых клеток. При воздействии 0.05 мДж/мм² до 0.2 мДж/мм² наблюдаются условия для прекращения дифференцировки клеток раковой опухоли (рис. 2).

Полученные результаты показывают, что при ударно-волновом воздействии средне и высокоинтенсивном возможна остановка роста и разрушения раковой опухоли при расположении аппликатора непосредственно к сегменту позвоночника.

Полученные результаты также демонстрируют, что ударно-волновое воздействие различной интенсивности при инвазивной методике является безопасным для окружающих пораженный участок, сегментов позвоночника.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-79-01107.

Литература

1. S.W. Verbruggen, J. Nolan, M.P. Duffy, O.M.T. Pearce, C.R. Jacobs, M.M. Knigh// Osteocytes Regulate Metastatic Behavior of Both Breast and Prostate Cancer Cells. Advanced science 11:2 2024 e2305842.

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ БЕГУЩИХ И ОБЪЕМНЫХ ВОЛН В СВЯЗАННОЙ СИСТЕМЕ ИСТОЧНИК – АНИЗОТРОПНАЯ КОМПОЗИТНАЯ ПЛАСТИНА – АКУСТИЧЕСКАЯ СРЕДА

Ермоленко О.А., Глушков Е.В., Глушкова Н.В.

Институт математики, механики и информатики КубГУ, Краснодар, Россия
o.ermolenko.a@gmail.com

Необходимость решения задач взаимодействия акустических волн с упругими телами возникает в таких практических областях, как виброизоляция и акустическая скрытность, бесконтактное определение свойств материалов, неразрушающий контроль, акустоэлектроника, акустическая микроскопия и многих других. Анизотропия упругих свойств материала по сравнению со случаем изотропного материала существенно усложняет интерпретацию получаемых результатов. Анизотропия приводит к зависимости характеристик возбуждаемых волн не только от частоты колебания, но и от направления распространения.

В настоящей работе представлена математическая и компьютерная модель взаимодействия акустического волнового поля заданного источника с многослойной анизотропной пластиной, погруженной в акустическую среду, например, воздух или воду. Целью работы является проведение на этой основе анализа влияния анизотропии на дисперсионные свойства бегущих волн, их угловую направленность и направленность отраженных и прошедших объемных акустических волн. Разработанная модель основана на явных интегральных представлениях как отраженного и прошедшего волнового поля, так и бегущих волн, распространяющихся вдоль анизотропной пластины, которые получены в форме контурных интегралов обратного преобразования Фурье. На их основе выводятся асимптотические представления волновых полей в дальней от источника зоне, которые строятся с помощью метода стационарной фазы и теории вычетов. Проведена численная верификация на основе сопоставления с результатами конечно-элементного моделирования (Comsol Multiphysics 5.6).

На примере трехслойной трансверсально-изотропной пластины, погруженной в воду, исследуется влияние анизотропии на направленность возбуждаемых волновых полей. Численные примеры иллюстрируют угловую зависимость дисперсионных характеристик поверхностных и вытекающих волн, их затухания и амплитудных коэффициентов. Для объемных акустических волн, отраженных от композитной пластины и прошедших через нее, также обсуждаются и анализируются угловые и частотные зависимости амплитудных коэффициентов отражения и прохождения. Приводятся результаты сопоставления интегральных и асимптотических представлений волновых полей в дальней и средней зоне.

Работа выполнена при поддержке РФФ № 23-71-01110.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ

Ерофеева И.В.^{1,2}, Родюшкин В.М.²

1 - ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ), Россия

2 - Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук", Нижний Новгород, Россия
erofeewa.ira2014@yandex.ru

Работа посвящена определению изгибных напряжений в стальных образцах методом акустоупругости с использованием поверхностной волны Рэлея. Эффект акустоупругости заключается в зависимости скорости распространения упругой волны в материале от напряжений [1, 2]. С помощью волн расширения-сжатия и сдвига объемные напряжения, вызванные эффектами растяжения или сжатия, хорошо измеряются, но напряжения, вызванные изгибом образца, не могут отслеживаться этими волнами. Волны показывают напряженное состояние, усредненное по толщине образца. Но если образец материала был согнут, то все его продольные волокна, которые находятся выше срединной линии поперечного сечения, будут растягиваться, и все продольные волокна, которые находятся ниже срединной линии, будут сжиматься. В этом случае объемные

волны покажут, что в образце нет напряжений, но это не так. Поэтому для определения напряжений, вызванных изгибом, необходимо использовать такие волны, которые показывают не среднее значение по сечению, а максимальные значения напряжений. Максимальные значения изгибающих напряжений будут на поверхности образца, и такие напряжения должна позволить измерять поверхностная волна Рэлея.

Образец был зафиксирован в рукоятках испытательной машины Tinius Olsen, которая допускает ударную силу до 100 кН (приблизительно 10 тонн). Но сначала нужно было определить механические характеристики материала. Напряженное состояние создавалось в калибровочном образце из стали 20 с размерами 370 * 8 * 30 мм. Образец был зафиксирован в рукоятках испытательной машины, это позволяло задавать нагрузку до 100 кН (примерно 10 тонн). На испытательной машине была получена диаграмма растяжения образца, из которой следует: предел прочности при растяжении составляет 463 МПа, модуль упругости составляет 211,0 ГПа. Поверхностная волна Рэлея создавалась пьезоэлектрическими преобразователями (ПП) с частотой колебаний 2 МГц. Длина волны при скорости распространения приблизительно 3000 м / с равна 1,5 мм, что позволяет использовать ее для контроля изгибных напряжений на образце 8 мм, поскольку глубина проникновения поверхностной волны в материал составляет 1,5–2 длины волны. Излучающий и приемный ПП устанавливались на фиксированном расстоянии друг от друга с помощью специального механического устройства. Возбуждение излучающего ПП производилось с помощью дефектоскопа, и от приемного ПП сигнал поступал на измеритель временных интервалов, для которых использовался осциллограф с временным разрешением в одну наносекунду.

Была установлена связь между временем распространения волны Рэлея и изгибным напряжением, которое должно было быть определено. Таким образом, удалось показать, что метод акустоупругости обладает большим потенциалом, чем принято считать, то есть, если использовать не объемные, а поверхностные волны, метод позволяет определять не только растягивающие и сжимающие напряжения, но и изгибные напряжения.

Сегодня метод акустоупругости успешно применяется при диагностике ракетной и авиационной техники, надводных и подводных кораблей, нефте- и газопроводов. Совершенствование этого перспективного метода очень важно.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00613.

Литература

1. Н. Е. Никитина // Акустоупругость: Опыт практического применения. Нижний Новгород: Изд-во «Талам», 2005. 208 с.
2. А. Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. 280 с

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАНИЙ ОДНОМЕРНОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ

Ерофеев В.И.¹, Лисенкова Е.Е.¹, Герасимов С.И.^{1,2}

1 - Институт проблем машиностроения РАН - филиал ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова - Грехова Российской академии наук", Россия

*2 - Российский Федеральный ядерный центр - ВНИИЭФ, Россия
erof.vi@yandex.ru*

Рассматривается задача о колебаниях одномерной упругой направляющей с движущейся вдоль нее со скоростью w_0 распределенной нагрузкой. В качестве направляющей используется балка, лежащая на упругом основании. Уравнение, описывающее динамическое поведение балки с учетом движущейся нагрузки (в пренебрежении инерцией вращения элемента балки при изгибе), которое приведено в монографии [1] в эйлеровых координатах и безразмерной форме записи, имеет вид

$$(1 + n_{11}) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + (1 - J_0 w_0^2) \frac{\partial^4 u}{\partial \varepsilon^4} + 2w_0 n_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau \partial \varepsilon} - 2w_0 J_0 \frac{\partial^4 u}{\partial \tau \partial \varepsilon^3} - J_0 \frac{\partial^4 u}{\partial \tau^2 \partial \varepsilon^2} + n_{11} w_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \varepsilon^2} + ku = 0 \quad (1)$$

Здесь используются принятые в [1] обозначения безразмерных переменных соответствующих времени τ , пространственной координате ε , поперечному смещению срединной линии стержня $u(\tau, \varepsilon)$, массе n_{11} и моменту инерции нагрузки J_0 , ее скорости w_0 , коэффициенту жесткости упругого основания k .

В отличие от монографии [1], где рассматриваются, в основном, структуры конечной длины, которые применяются, в частности, при анализе железнодорожных мостов, в данной работе проводится исследование динамики бесконечно длинной структуры такой, как, например, обычное железнодорожное полотно или контактная подвеска. Отождествляя возмущения с бегущими гармоническими волнами, т.е. полагая $u \sim \exp(i\Omega t - iKx)$, где Ω и K безразмерные циклическая частота и волновое число, из (1) получено дисперсионное уравнение. Наличие конвективных слагаемых в уравнении динамики распределенной системы (1), описывающего рельсовую направляющую, повлекло за собой зависимость дисперсионного уравнения еще и от скорости движения нагрузки w_0 . Построены дисперсионные кривые при различных скоростях движения нагрузки. Определена область частот, для которой в направляющей не возбуждаются бегущие волны. Значение верхней границы этой области при наличии инерционной нагрузки меньше, чем при отсутствии одной.

Выявлены условия неустойчивости. Найдено минимальное значение скорости движения распределенной нагрузки, при котором частота Ω имеет отличную от нуля мнимую часть $\text{Im}(\Omega)$, поскольку именно отрицательное значение мнимой части частоты ассоциируются с неустойчивостью – возможностью экспоненциального роста амплитуды возмущения во времени. Отмечается, что поскольку линейная теория работает только вблизи порога возникновения неустойчивости, то рост изгибных колебаний балки может привести к тому, что они перестанут удовлетворять линейному уравнению (1).

Рассматриваемая задача кинематики волн позволяет не только определить частоты и волновые числа возбуждаемых волн, но и построить в пространстве ее параметров области с качественно различными режимами генерации волн. Границами этих областей являются найденные в работе критические скорости движения нагрузки, которые зависят от ее параметров, физико-механических свойств направляющей и упругого основания. Установлена возможность возбуждения волн с противоположно направленными фазовыми и групповыми скоростями (так называемых "обратных волн"). Кроме того, на основе анализа задачи кинематики можно строить прогнозы возможных режимов устойчивости и/или неустойчивости вибраций рельсовой направляющей и подвески токосяема при движении высокоскоростных объектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00613.

Литература

1. В. А. Светлицкий // Строительная механика машин. Механика стержней. В 2 т. Т. 2. Динамика. М.: Физматлит, 2009. 384 с

N-СТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕХОД МЕЖДУ ДВУМЯ ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫМИ ОДНОМЕРНЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

Ершов А.Д.¹, Кузькин В.А.^{2,1}

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
totamonik@gmail.com*

При нынешнем развитии электроники основной проблемой, мешающей дальнейшему росту технологий, является отвод тепла. На микро- и наноуровнях может нарушаться закон Фурье, описывающий перенос тепла, и в силу вступает баллистическое распространение тепловых волн [1]. Большой интерес вызывает место стыка двух материалов при отводе тепла. Изучение распространения волн через такие переходы позволяет узнать эффективность теплопередачи между материалами. В работе [2] для изучения процесса рассматривалась модель двух одномерных полубесконечных гармонических кристаллов на подложке, соединенных пружиной, которая выступала в качестве интерфейса. Переход такого вида представляет собой простейший случай – резкая смена материала. В данной постановке были получены выражения для коэффициентов прохождения и отражения, показывающие «эффективность» интерфейса при прохождении через него волнового пакета.

Данное исследование ставило целью рассмотрение более сложного N-ступенчатого интерфейса.

Модель. В качестве модели в настоящей работе рассматривается система из двух полубесконечных гармонических кристалла на подложке, соединенных ступенчатым интерфейсом. В левом полубесконечном кристалле задается волновой пакет с энергией E_0 , движущийся направо.

Коэффициенты прохождения и отражения. Для данной модели удалось аналитически получить

общую формулу для расчета коэффициентов в N-ступенчатом случае. Формула также была подтверждена численными экспериментами.

Частные случаи. Интерес также представляют несколько частных случаев: при коэффициентах близких к 1 и 0. Для данных случаев получены формулы для расчета общего коэффициента прохождения.

Сравнение с одноступенчатым интерфейсом. В данной задаче был рассмотрен частный случай, где массы частиц и жесткости подложки были равны во всей цепочке. В таком случае выражение для коэффициента прохождения примет более простую форму:

$$T = \frac{4g_1g_2}{(g_1 + g_2)^2}, \quad (1)$$

где g_1 и g_2 – групповые скорости слева и справа от перехода соответственно. Такое выражение является аналогом формулы Френеля [3] для прохождения световой волны через границу раздела двух сред. В данной постановке была построена зависимость отношения коэффициентов прохождения для двухступенчатого интерфейса T_{step} и одноступенчатого интерфейса T при варьировании групповой скорости g_3 в ступеньке. Можно выделить три случая влияния добавочной ступени:

1. $g_3 \in (g_1, g_2)$: Введение дополнительной ступени увеличивает коэффициент прохождения;
2. $g_3 = g_1$ и $g_3 = g_2$: Введение такой ступени эквивалентно смещению всей системы вправо или влево, коэффициент остается неизменным;
3. $g_3 \notin [g_1, g_2]$: Введение ступени с групповой скоростью, выходящей за рамки промежутка, уменьшает коэффициент прохождения.

В данном исследовании был рассмотрен в общем виде N-ступенчатый интерфейс, соединяющий одномерные гармонические кристаллы на подложке. Получены выражения для коэффициентов прохождения и отражения, описывающие его пропускающую способность и рассмотрены два частных случая. Также проведено сравнение с более простым вариантом интерфейса. Показано, что при варьировании параметров ступеней интерфейса, можно как увеличить пропускающую способность, так и уменьшить ее.

Литература

1. Kuzkin, V.A., Krivtsov, A.M. Unsteady ballistic heat transport: linking lattice dynamics and kinetic theory // Acta Mech, 232, 1983–1996 (2021)
2. Kuzkin, V.A. Acoustic transparency of the chain-chain interface // Phys. Rev. E 107, Iss. 6 – June 2023
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. // 2-е изд.. — М.: «Наука», 1973. — 720 с.

ЗАВИСИМОСТЬ МНОЖЕСТВА ВСЕХ СОСТОЯНИЙ РАВНОВЕСИЯ ДВУХФАЗНОЙ ТЕРМОУПРУГОЙ СРЕДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ефимов Е.А.^{1,2}

1 - *Институт Проблем Машиноведения РАН, Россия*
2 - *Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*
st067857@student.spbu.ru

Настоящая работа посвящена исследованию множества всех состояний равновесия двухфазной термоупругой среды. Под состоянием равновесия двухфазной упругой среды понимается упорядоченная пара: поле перемещений и распределение фаз, доставляющие глобальный минимум функционалу свободной энергии. Для термоупругих сред плотности свободной энергии получаются добавлением к плотностям энергии деформации слагаемых, связанных с температурными напряжениями каждой из фаз, и слагаемых, связанных с прямой зависимостью плотностей свободной энергии от температуры. При нулевых граничных условиях Дирихле на поле перемещений при некоторых ограничениях на тензоры модулей упругости, тензоры деформаций несоответствия и тензоры объёмного расширения в работе доказана разрешимость задачи о равновесии двухфазной термоупругой среды, найдена и исследована зависимость множества всех состояний равновесия двухфазной термоупругой среды от температуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8). Автор выражает благодарность Кучеру Владиславу Александровичу, Осмоловскому Виктору Георгиевичу и Фрейдину Александру Борисовичу за ценные замечания, повлиявшие на постановку задачи.

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ДОВЫТЭСНЕНИЮ НЕФТИ ИЗ КЕРНА С ПОМОЩЬЮ ТРАДИЦИОННЫХ ВЫТЭСНЯЮЩИХ АГЕНТОВ И НАНОФЛЮИДОВ

Жигарев В.А., Минаков А.В., Пряжников М.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
vzhigarev@sfu-kras.ru

В настоящее время при разработке месторождений применяются различные методы увеличения нефтеотдачи. При использовании традиционной закачки в пласт закачивается вода для поддержания пластового давления, в связи с чем возникает ряд негативных явлений связанных с прорывом воды к добывающей скважине. Альтернативным вытесняющим агентом для закачки в пласт являются полимерные растворы, растворы поверхностно-активных веществ и наносuspензии. Для оценки эффективности нефтевытеснения разных вытесняющих агентов проведены фильтрационные исследования на модельном и реальном крене.

Фильтрационные испытания по определению эффективности заводнения горной породы наносuspензией проведены на фильтрационной установке UFS-200(см. рис.1).



Рис. 1. Фотография фильтрационной установки UFS-200.

UFS-200 система автоматического заводнения керна, которая рассчитана на двухфазное вытеснение жидкостей в неустановившемся и в устойчивом состоянии или однофазные эксперименты с газом в устойчивом состоянии. Методика проведения фильтрационных экспериментов с наносuspензиями основана на ОСТ 39-195-86 [1]. Настоящий стандарт распространяется на нефтесодержащие породы и устанавливает метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. Расход при фильтрации определялся из условия, что линейная скорость фильтрации не превышает значение один метр в сутки.

Проведены систематические фильтрационные эксперименты по вытеснению нефти из модельных и реальных кернов растворами различных полимеров, ПАВ и наносuspензиями. В качестве агентов довытеснения использовались растворы акриловых полимеров с различной молекулярной массой и плотностью заряда, многокомпонентные растворы ПАВ, однокомпонентные растворы ПАВ, а также наносuspензий с различным материалом и размером частиц. Исследования проведены на вязкой нефти (79,3 мПа×с.). Концентрация полимеров и ПАВ в растворах варьировалась от 0,01 до 0,1 масс.%. Концентрация наночастиц в растворах варьировалась от 0,01 до 0,25 масс.%, а их размер – от 10 до 35 нм. На основании полученных результатов фильтрационных экспериментов проведен сравнительный анализ эффективности довытеснения нефти из образцов модельного и реального керна растворами ПАВ, полимеров и наносuspензий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).

Литература

1. ОСТ 39-195-86 Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. – Взамен .ОСТ 39-070-78; введ. 1986 – 07 – 04. – Москва: Министерство нефтяной промышленности СССР; Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 18с.

ОБ УПРУГИХ ВОЛНАХ В ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

Заворохин Г.Л., Мацковский А.А.

*Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
zavorokhin@pdmi.ras.ru*

Существование упругих волн со смещениями, локализованными при вершине с углом раскрытия менее $\pi/2$, в изотропных топографических волноводах было строго доказано В. М. Бабичем в [1]. Это доказательство, основанное на вариационном подходе, распространено на прямоугольные топографические волноводы. Мы дополняем результат В. М. Бабича и доказываем существование локализованных упругих волн на прямоугольной вершине топографических волноводов с различной формой поперечного сечения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-21-00286.

Литература

1. В. М. Бабич // Об одном классе топографических волноводов, Алгебра и Анализ, **22:1** (2010), 98-107

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АТОМОВ: КОНЦЕПЦИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПОЛЯ

Захаров А.Ю.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород,
Россия
anatoly.zakharov@novsu.ru*

Предложен метод описания динамики систем взаимодействующих атомов в терминах вспомогательного поля, которое в состоянии покоя атомов эквивалентно заданным межатомным потенциалам, а в динамическом режиме представляет собой классическое релятивистское поле. В рамках концепции вспомогательного поля получены следующие результаты.

1. Установлено, что для центральных статических межатомных потенциалов, допускающих преобразование Фурье, вспомогательное поле представляет собой суперпозицию **элементарных вспомогательных полей**, каждое из которых удовлетворяет уравнениям типа Клейна-Гордона-Фока с комплексными параметрами массы [1,2].

2. Доказано, что параметры элементарных однозначно определяются особыми точками Фурье-трансформанты статического межатомного потенциала на комплексной плоскости модуля волнового вектора [2,3].

3. Предложена вариационная постановка задачи о динамике системы, состоящей из релятивистских атомов и создаваемого ими релятивистского вспомогательного поля [1].

4. Установлен вид функционала действия и выведена полная система уравнений динамики атомов и вспомогательных полей в двух формах [1,2].

- 4.1. Первая форма содержит уравнения эволюции элементарных вспомогательных полей и динамики атомов. В отсутствие внешних полей эта система уравнений допускает исключение полевых переменных и приводится к системе функционально-дифференциальных уравнений запаздывающего типа. Исследованы качественные свойства решений полученных уравнений. Установлено, что релятивистское запаздывание взаимодействий является динамическим безвероятностным механизмом установления динамического равновесия в одномерном кристалле. Показано, что признаки термодинамического поведения характерны в равной мере как для многочастичных, так и для малочастичных систем [3,4,5].

- 4.2. Вторая форма уравнений динамики системы представляет собой замкнутое функционально-дифференциальное уравнение запаздывающего типа для микроскопической функции распределения атомов. Показано, что конечность параметров “масс” элементарных вспомогательных полей запаздывание взаимодействий, передаваемых полями Клейна-Гордона, может принимать сколь угодно большие значения [2,4].

5. Релятивистский эффект запаздывания взаимодействий приводит к явлению наследственности,

поскольку решение задачи Коши зависит не только начальных условий, но и от предыстории системы.

Таким образом, релятивистская динамика систем взаимодействующих частиц представляется единой основой для исследования разнообразных явлений и процессов, объяснение которых в рамках нерелятивистской теории встречает известные сложности.

Литература

1. A.Yu. Zakharov, V.V. Zubkov // Field-Theoretical Representation of Interactions between Particles: Classical Relativistic Probability-Free Kinetic Theory, Universe, 25:4 2022. 281(1)–281(10)
2. A.Yu. Zakharov // Field Form of the Dynamics of Classical Many- and Few-Body Systems: From Microscopic Dynamics to Kinetics, Thermodynamics and Synergetics, Quantum Reports, 4:4 2022. 533–543
3. А.Ю. Захаров, М.А. Захаров // Релятивистская модель межатомных взаимодействий, Конденсированные среды и межфазные границы, 25:4 2023. 494–504
4. A.Yu. Zakharov, V.V. Zubkov // Toward a relativistic microscopic substantiation of thermodynamics: classical relativistic many-particle dynamics, J. of Physics: Conf. Ser. 2052:1 2021. 012055(1)–012055(10)
5. A.Yu. Zakharov, M. A. Zakharov // Microscopic Dynamic Mechanism of Irreversible Thermodynamic Equilibration of Crystals, Quantum Reports. 3:4 2021. 724–730

НЕЛИНЕЙНАЯ СУПРАТРАНСМИССИЯ В МОДЕЛЬНОМ КРИСТАЛЛЕ СОСТАВА A_3B

Кочкин А.С.¹, Нарсеев А.С.², Захаров П.В.²

1 - Алтайский государственный университет, Россия

2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

zakharovpvl@rambler.ru

Эффект нелинейной супратрансмиссии, открытый чуть более двадцати лет назад, показал свою фундаментальную природу во многих дискретных системах [1]. Суть его заключается в передаче энергии в дискретную среду путем гармонических возбуждений на частотах, не поддерживаемых данной системой [2]. Он обычно проявляется, если в системе возможно возбуждение тех или иных видов солитонов [3]. Так же существует пороговое значение амплитуды для внешнего воздействия, при которой возникает передача энергии в дискретную систему.

В данной работе мы исследуем данный эффект в дискретной структуре на примере кристалла стехиометрии A_3B со сверхструктурой $L1_2$. Проявление его нами уже было описано в ряде работ [4, 5]. Здесь проводится сравнение двух видов супратрансмиссии, а также различия в механизмах передачи энергии в глубь кристалла. Рассматриваем распространение уединенных волн в кристалле, а также последовательное возбуждение дискретных бризеров.

Полученные результаты дают численную оценку параметров эффекта нелинейной супратрансмиссии для в случае возбуждения дискретных бризеров и уединенных волн. Рассчитана энергия передаваемая для обоих типов нелинейных возбуждений, рассмотрены механизмы генерации уединенных волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Договор 075-15-2024-201 от 06.02.2024).

Литература

1. F. Geniet, J. Leon Energy transmission in the forbidden band gap of a nonlinear chain // Physical Review Letters. 2002. Vol. 89, No. 13. 134102. P. 1341021–1341024
2. J. Leon Nonlinear supratransmission as a fundamental instability // Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics. — 2003. — Vol. 319, No. 1–2. — P. 130–136.
3. J. Leon Slow-light solitons in two-level media generated by evanescent fields // Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics. — 2007. — Vol. 75, No. 6. — P. 063811P.
4. P. V. Zakharov, E. A. Korznikova, A. A. Izosimov, A. S. Kochkin The Influence of Crystal Anisotropy on the Characteristics of Solitary Waves in the Nonlinear Supratransmission Effect: Molecular Dynamic Modeling // Computation. 2023; 11(10):193.
5. P.V. Zakharov The effect of nonlinear supratransmission in discrete structures: A review // Comput. Res. Model 15.3 (2023): 599–617.

ДВИЖЕНИЕ И САМОДВИЖЕНИЕ ТОНКИХ ТЕЛ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПРИБЛИЖЕНИИ СТОКСА

Звягин А.В., Шамина А.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru

В представляемой работе рассматриваются задачи движения тонких тел в вязкой несжимаемой жидкости. В приближении Стокса уравнения движения являются линейными. Это позволяет использовать фундаментальные решения для сведения движения тонких тел конечного размера к сингулярным интегральным уравнениям. В работе предложен численный метод решения полученных интегральных уравнений для трёхмерного движения тел в виде набора тонких непроницаемых и проницаемых пластин (не прямой метод граничных элементов). Решение задачи в данном методе получается в виде конечного ряда-разложения по найденным базовым функциям. Несмотря на достаточно жёсткие ограничения применимости модели Стокса (малые числа Рейнольдса), имеются достаточно большие области приложений такого рода задач в аэромеханике разреженных газов, в гидродинамике ползучих течений и в биомеханике.

На основе предложенного численного метода проведено решение ряда задач о движении тонких непроницаемых и проницаемых пластин в безграничной среде и в окрестности неподвижной стенки. Проведено исследование влияния проницаемости и наличия неподвижной плоской границы на силы и моменты, действующие на движущуюся пластину.

Рассмотрен машущий механизм самодвижения в вязкой жидкости системы из двух вращающихся вокруг общей оси прямоугольных пластин. Исследовано влияние зависимости угловой скорости вращения от времени на скорость самодвижения данной системы.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЁННОЙ БАЛКИ БЕРНУЛЛИ-ЭЙЛЕРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ НА СВОБОДНОМ КОНЦЕ

Земсков А.В.^{1,2}, Ле Ван Хао¹, Сердюк Д.О.¹

*1 - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия*

2 - НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
azemskov1975@mail.ru

В работе рассматривается нестационарная задача о плоском термоупругодиффузионном изгибе консольно-закрепленной однородной ортотропной балки Бернулли-Эйлера под действием поперечной нагрузки, приложенной к свободному концу (схема закрепления и приложенных усилий представлена на рисунке 1). Изгибные деформации вызывают нагрев и порождают диффузионные потоки, направленные из зон сжатия в зоны растяжения (эффект Горского). При этом возникающий тепломассоперенос влияет, в свою очередь, на механическое поле и, следовательно, на напряженно-деформированное состояние балки.

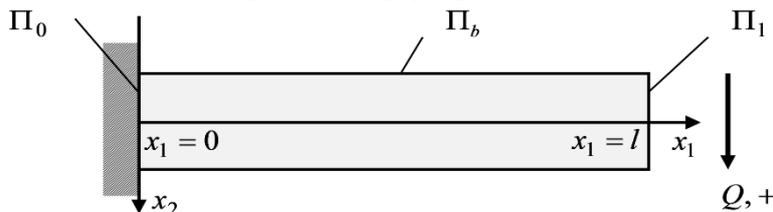


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи.

Математическая постановка представляет собой систему уравнений колебаний балки с учетом термодиффузии, которая получена с помощью обобщенного принципа виртуальных перемещений из общей модели термоупругой диффузии для сплошных сред [1–3] с конечной скоростью распространения тепловых и диффузионных потоков [4]. Уравнения термомеханодиффузионных колебаний балки дополняются краевыми

условиями, соответствующими заданной схеме закрепления и нагружения (рис. 1).

Основная проблема заключается в невозможности построения решения поставленной задачи в виде рядов Фурье, что осложняет обращение преобразования Лапласа, которое также используется при решении этой задачи. Для преодоления указанной проблемы используется метод эквивалентных граничных условий [5], который заключается в том, что вначале рассматривается вспомогательная задача, которая отличается от исходной только краевыми условиями. Эти условия подбираются таким образом, чтобы имелась возможность получить аналитическое решение вспомогательной задачи.

Далее строятся соотношения, связывающие правые части граничных условий обеих задач. В результате приходим к следующей системе интегральных уравнений Вольтерры 1-го рода, которая решается численно с помощью квадратурных формул средних прямоугольников. Таким образом, решение исходной задачи получается путем численного вычисления свертки функций Грина вспомогательной задачи с функциями, полученными в результате решения указанной выше системы уравнений Вольтерры.

Литература

1. Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 182 с.
2. Князева А.Г. Введение в термодинамику необратимых процессов. Лекции о моделях. – Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2014. – 172 С.
3. Келлер И.Э., Дудин И.С. Механика сплошной среды. Законы сохранения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2022. – 142 с.
4. Zemskov A.V., Le Van Hao, Tarlakovskii D.V. Bernoulli-Euler Beam Unsteady Bending Model with Consideration of Heat and Mass Transfer // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2023. – Vol. 9, No 1. – pp. 168–180. DOI: 10.22055/jacm.2022.40752.3649
5. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Файкин Г.М. Нестационарный изгиб консольно-закрепленной балки Бернулли-Эйлера с учетом диффузии // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 40-50.

ДИФРАКЦИЯ ВОЛНЫ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ НА СКАЧКЕ КРИВИЗНЫ. МОДА С БОЛЬШИМ НОМЕРОМ

Злобина Е.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
ezlobina2@yandex.ru

В докладе обсуждаются результаты работы [1], где рассматривается дифракция высокочастотной волны шепчущей галереи, набегающей вдоль вогнутой части границы S_- на точку O , в которой граница переходит в прямую S_+ так, что кривизна испытывает скачок (см. Рис. 1). Поле над границей описывается уравнением Гельмгольца

$$u_{xx} + u_{yy} + k^2 u = 0$$

с большим волновым числом $k \gg 1$. На границе поле удовлетворяет условию Неймана

$$u_n|_S = 0.$$

Целью является асимптотическое описание всех волн справа от точки негладкости O в небольшой ее окрестности. Изучение поля проводится в рамках метода параболического уравнения Леонтовича—Фока.

В отличие от предыдущих исследований дифракции волн шепчущей галереи на скачке кривизны (см. [2] и литературу в ней), в данной работе номер моды предполагается большим (то есть число поперечных осцилляций падающей волны велико), что существенно усложняет асимптотический анализ.

Подробно описан «лучевой скелет» волнового поля. Из точки негладкости O расходится цилиндрическая дифрагированная волна. С падающей волной шепчущей галереи ассоциируется конгруэнция лучей, многократно отражающихся от вогнутой части границы S_- и сосредоточенных в узкой ее окрестности, см. Рис. 1. Справа от O часть лучей отражается от плоской части границы S_+ и уходит на бесконечность, распространяясь при этом ниже предельного (отраженного в точке O) луча l_O . Оставшиеся же лучи уходят на бесконечность после отражения от S_- , и в некоторой области справа от O сохраняют структуру падающей волны, в частности, каустика C продолжается вплоть до точки Q ее касания с лучом l_O .

Лучевое описание поля применимо не везде. Так, возникает четыре пограничных слоя: области вблизи предельного луча левее и правее точки Q , область вблизи каустики BQ и окрестность точки Q касания

предельного луча и каустики (выделены на Рис. 2 зеленым, желтым, синим и красным, соответственно). В каждом пограничном поле описано в терминах подходящих спецфункций. Найденные выражения асимптотически сшиваются друг с другом в пересечении областей их пригодности, см. Рис. 2.

Отметим, что полученное описание структуры поля радикально отличается от результатов работы [2].

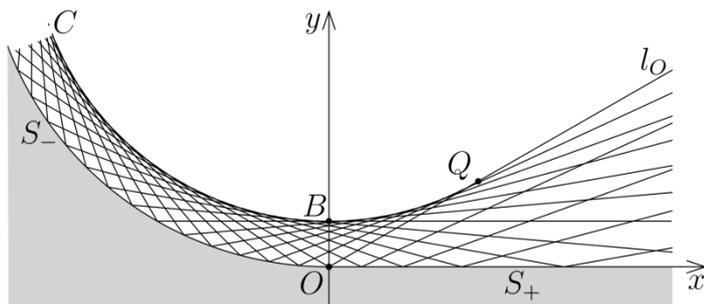


Рис. 1. Лучевая структура поля
(дифрагированная волна не показана).

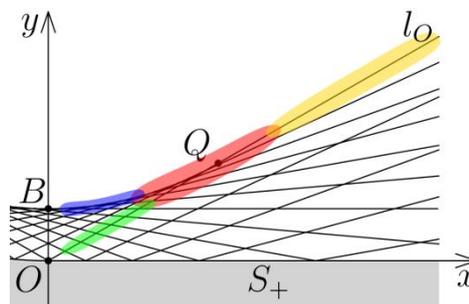


Рис. 2. Схема пограничных слоев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00070.

Литература

1. Е. А. Злобина // Дифракция волны шепчущей галереи на скачке кривизны. Мода с большим номером, Зап. научн. сем. ПОМИ, 521 2023. 95–122
2. Е. А. Злобина, А. П. Киселев // Дифракция волны шепчущей галереи при скачкообразном распрямлении границы. Акуст. Журнал 69:2 2023, 119–128

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ТЕРМОГРАФИИ К АНАЛИЗУ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ГАЗА В КАНАЛАХ

Знаменская И.А.¹, Попович С.С.^{1,2}

1 - МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

2 - НИИ Механики МГУ, Москва, Россия

znamen@phys.msu.ru

Метод панорамной инфракрасной термографии тепловых полей основан на измерении распределения теплового излучения и преобразовании его в карту температуры. Возросший интерес к термографии в экспериментальной механике в последние годы обусловлен как появлением тепловизоров нового поколения, так и возможностями цифровой обработки, анализа, хранения больших объемов данных - термографических изображений и фильмов. С помощью термографии может проводиться экспериментальное исследование теплообмена на плоских и рельефных поверхностях с различной геометрией, обтекаемых потоками газа.

В данной работе представлены результаты термографических исследований тепловых полей, полученных на газодинамических стендах МГУ: 1) физического факультета (УТРО-3) - нестационарных тепловых потоков за плоской ударной волной в рабочей секции ударной трубы прямоугольного сечения; 2) НИИ Механики МГУ (АР) тепловых потоков, при стационарном взаимодействии ударной волны с плоской стенкой при турбулентном режиме ее обтекания сверхзвуковым потоком.

Проведено экспериментальное исследование тепловых полей от нагретых высокоскоростным потоком поверхностей прямого канала ударной трубы прямоугольного сечения и канала с препятствием - после дифракции на нем ударной волны. Исследованы характерные кривые температурного отклика внешней стенки канала на тепловые процессы внутри ударных труб. Процессы нагрева обтекаемых высокоскоростным потоком внутренних стенок рабочей камеры визуализируются при помощи высокоскоростного инфракрасного детектора сквозь прозрачные для инфракрасного излучения кварцевые окна. Результаты визуализации тепловых полей сопоставлены с результатами высокоскоростной теневой съемки, а также с данными двумерного численного моделирования нестационарного газодинамического процесса дифракции ударной волны с числами Маха

падающей волны $M = 2.0 - 4.5$. Показано, что визуализация тепловых полей сложного нестационарного газодинамического течения связана с неоднородным нагревом стенок канала в том числе – внутренней поверхности боковых окон, прозрачных для инфракрасного излучения, регистрируемого тепловизором. Исследовано влияние падающей ударной волны на тепловой поток, при турбулентном режиме обтекания сверхзвуковым потоком плоской стенки в диапазоне чисел Маха набегающего потока 2.0-3.0.

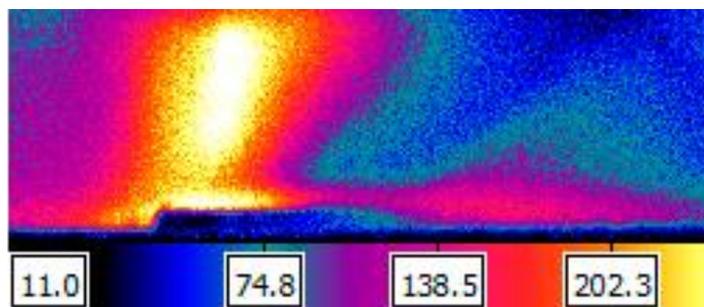


Рис. 1. Тепловое поле окна рабочей камеры в области препятствия после дифракции ударной волны $M = 3$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00096

Литература

1. Куталадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоиздат, 1985.
2. Знаменская И. А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. — 2021. — Т. 13, № 3. — С. 125–158.

СЕЙСМОЗАЩИТА ЗДАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Зотов А.Н.¹, Глебов С.Г.¹, Баландин Д.В.²

1 - Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия
2 - Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Россия
anz21963@yandex.ru

Вопрос сейсмозащиты зданий в настоящее время весьма актуален. Частоты сейсмических воздействий обычно находятся в пределах 0,2 – 40 Гц [1]. В рамках поставленной задачи было проведено численное моделирование многоэтажных зданий, которые рассматривались как цепочка масс известной величины m , связанных пружинами жесткостью c (рис. 1, а). Задавалось кинематическое возбуждение первого этажа в широком диапазоне частот. Результаты численного решения систем дифференциальных уравнений второго порядка показали, что при некоторых характерных параметрах, например, для 12- и 45-этажных зданий получался резонанс. Известны способы сейсмозащиты зданий при помощи выключающихся связей [2]. Идея данной работы заключается в том, чтобы между первым и вторым этажами к существующей системе с положительной жесткостью параллельно добавить систему с отрицательной жесткостью. Тогда результирующая жесткость горизонтальной пружины, соединяющей первый и второй этажи, может быть настолько малой, что резонансные явления возникать не будут. Отрицательную жесткость предполагается получить при помощи системы с направляющими [3] (рис1, б). В ней пружина заданной жесткости перемещается между направляющими расчетной формы. Принята конструкция, в которой пружина растягивается. Формы направляющих рассчитываются таким образом, чтобы получить заданную величину отрицательной жесткости. Моделирование показало, что при полученной малой жесткости пружины, соединяющей первый и вторые этажи ни при каких частотах сейсмозащитных воздействий резонансных явлений не возникает.

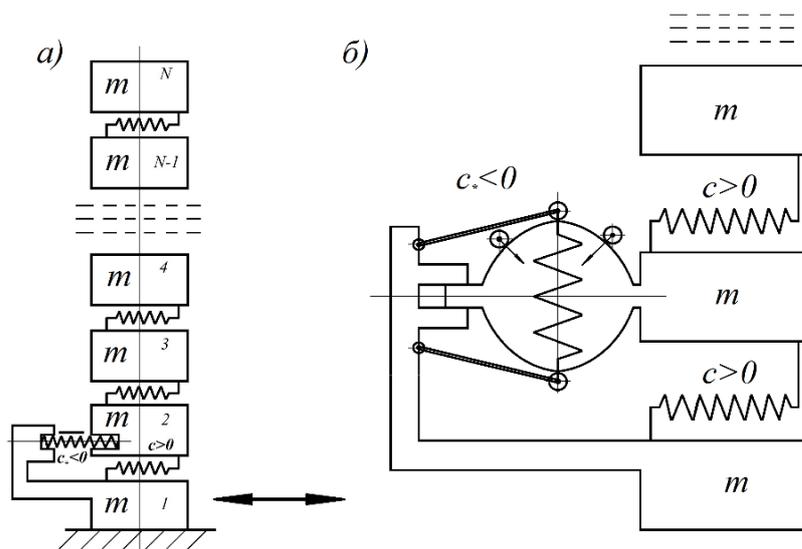


Рис. 1. Сейсмозащита зданий при помощи систем с отрицательной жесткостью

Литература

1. Хазов П.А. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс [Текст]: монография / П.А. Хазов, Д.А. Кожанов, А.М. Анущенко, А.А. Сатанов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2022. - 96 с. ISBN 978-5-528-00475-4
2. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат, 1976. 232 с.
3. Alexey Zotov Systems with quasi-zero stiffness characteristic, ENOC 2008, Saint Petersburg, Russia, June, 30-July, 4 2008.

ГИБРИДНЫЕ ПОДХОДЫ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАСТА

Зырянов Н.А.¹, Юдин Е.В.², Марков Н.С.³

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

2 - Газпромнефть НТЦ, Санкт-Петербург

3 - Недра

zenikich2000@gmail.com

Математическое моделирование физических процессов за последние десятилетия стало неотъемлемой частью работы со сложными системами. Использование математических моделей особенно важно для описания процессов, которые сложно наблюдать в лабораторных условиях. Например, в нефтегазовой отрасли основные процессы происходят на глубине нескольких километров. Моделирование пласта с необходимыми параметрами в лабораторных условиях - трудоемкая задача, которая даже в случае успешной реализации не дает полного понимания происходящих процессов [1, 2]. С другой стороны, в последние десятилетия методы машинного обучения активно развиваются и способны решать задачи различной сложности, такие как распознавание объектов на изображениях или обработка естественного языка. Несмотря на огромные эмпирические перспективы и несомненный успех в решении целого ряда задач, большинство подходов машинного обучения на сегодняшний день не способны извлекать интерпретируемую информацию из большого потока данных. Более того, модели, основанные исключительно на данных, могут точно соответствовать наблюдениям, но давать физически противоречивые и неправдоподобные предсказания (например, из-за ошибок наблюдения), что приводит к низкой эффективности использования таких методов и данных. В этом контексте машинное обучение на основе физики (Physics-Informed Machine Learning, PIML) представляет собой мощный инструмент для моделирования сложных процессов. PIML позволяет интегрировать физические законы в нейросетевые

модели, что повышает точность моделирования и позволяет работать с ограниченными данными.

В данной работе рассматривается применение физически информированных алгоритмов машинного обучения к решению задачи Бакли-Левретта с невыпуклой функцией потока, фильтрации жидкости в пласте, а также задача газонефтяного контакта GORM. Раскрыта основная концепция подхода, показаны различные архитектуры моделей, их преимущества и недостатки. Для ускорения обучения рассматриваются PINO [3, 4, 5, 6], способные предсказывать решения для различных граничных и начальных условий, не включенных в обучающий набор данных. Модель PINN [7] демонстрирует высокую способность адаптироваться к реальным значениям, сохраняя при этом гибкость и стабильность решения, что является важными компонентами гибридных моделей.

Литература

1. Peaceman, D. W. 2000. *Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
2. Guo, C., Xu, J., Wei, M. et al. 2015. Experimental Study and Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing Tight Sandstone Reservoirs. *Fuel* 159: 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.057>.
3. Kissas, G., Seidman, J., Guilloto, L.F., Preciado, V.M., Pappas, G.J., Perdikaris, P., 2022. Learning operators with coupled attention. *J. Mach. Learn. Res.* 23, 1–63 [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2201.01032>.
4. Z. Li, N. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, et al. 2020. Fourier neural operator for parametric partial differential equations. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.08895>.
5. Z. Li, N. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, et al. 2021. Physics-Informed Neural Operator for Learning Partial Differential Equations. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.03794>.
6. N.N, T. Tripura, and S. Chakraborty, 'Physics informed WNO', Feb. 2023, Available: <http://arxiv.org/abs/2302.05925>.
7. M. Raissi, P. Perdikaris, G. E. Karniadakis. 2019. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378: 686–707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В ВЯЗКОУПРУГОМ ТЕЛЕ

Иванова А.Б.^{1,2}, Фрейдин А.Б.¹

1 - *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
2 - *Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*
alezandraivanova@mail.ru

Распространение фронтов химических реакций в твердых телах представляет особый интерес для исследователей из-за междисциплинарности и актуальности для современной промышленности. К таким проблемам, например, относятся образование оксидных слоев в деталях поликристаллического кремния микроэлектромеханических систем (МЭМС) и последующее разрушение, влияющее на срок службы МЭМС [1]; литизация кремния в литий-ионных батареях [2]. Экспериментальные данные показывают, что в таких задачах механические напряжения влияют на кинетику фронта реакции — напряжения могут ускорять, замедлять или даже блокировать распространение фронта химической реакции [3].

Основной причиной появления больших напряжений является то, что протекание химической реакции сопровождается собственными деформациями превращения, кроме того, напряжения возникают из-за внешних нагрузок. Скорость фронта зависит от концентрации диффундирующего компонента и напряжений, которые, в свою очередь, зависят от положения фронта. В случае вязкого продукта реакции на текущее напряженно-деформированное состояние и скорость фронта может влиять история распространения фронта, что приводит к полной взаимосвязи между напряжениями, диффузией и реакцией.

На основе концепции тензора химического сродства моделируется локализованная химическая реакция во взаимосвязи с напряжениями в деформируемом твердом теле с вязкоупругим продуктом реакции и рассматривается влияние внешних деформаций на распространение фронта [4]. Сначала рассматривается одномерная задача. Затем, с помощью метода конечных элементов решается трехмерная связанная задача для прогнозирования распространения фронта реакции и напряженно-деформированного состояния. Модель предсказывает торможение и блокировку химической реакции в зависимости от значений параметра химической энергии, что соответствует экспериментальным наблюдениям. Подробно исследовано

распределение напряжений и их эволюция при распространении фронта реакции. Показано влияние механических напряжений на кинетику фронта реакции. Результаты могут быть полезны в моделировании, основанном на тензоре химического сродства, связанных хемомеханических задач при более сложных внешних нагрузках, различных геометриях, а также при линейной и нелинейной пластичности и вязкости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009–8).

Литература

1. C. L. Muhlstein, R. O. Ritchie // High-cycle fatigue of micron-scale polycrystalline silicon films: fracture mechanics analyses of the role of the silica/silicon interface, *Int. J. Fracture*, 119/120 2003. 449–4745
2. M.T. McDowell, S.W. Lee, J. T. Harris, B. A. Korgel, C. M. Wang, W. D. Nix, Y. Cui // In situ TEM of two-phase lithiation of amorphous silicon nanospheres, *Nano Lett.*, 13 2013a. 758–764
3. K. van Havenbergh, S. Turner, N. Marx, G. van Tendeloo // The mechanical behavior during (de)lithiation of coated silicon nanoparticles as anode material for lithium-ion batteries studied by insitu transmission electron microscopy, *Energy Technol.*, 4(8) 2016. 1005–1012
4. А. Б. Фрейдин // О тензоре химического сродства при химических реакциях в деформируемых телах, *Механика твердого тела*, 50 2015. 260–285

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ И РАСШИРЕННОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Иванова Е.А.^{1,2}, Мюллер В.³, Риккерт В.³, Вильчевская Е.Н.

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

3 - Технический университет Берлина, Германия

elenaivanova239@gmail.com

Мы обсуждаем различные аспекты поведения электромагнитных волн вблизи границы раздела диэлектрической и проводящей сред. Мы акцентируем внимание на нерешенных вопросах, на противоречиях между экспериментальными данными и теоретическими результатами, полученными в рамках классической электродинамики, а также на некоторых выводах, повторяющихся во многих литературных источниках и явно противоречащих здравому смыслу. В частности, мы показываем, что экспериментальное и теоретическое определения плазменной частоты не согласуются друг с другом. Мы обсуждаем проблему экспериментального определения диэлектрической проницаемости металлов, которая до сих пор не решена, и приводим простые асимптотические формулы, выражающие диэлектрическую проницаемость через коэффициент отражения. Мы показываем, что эксперименты с металлами можно описать в рамках классической электродинамики только в том случае, если использовать значения электрической проводимости, очень далекие от известных значений. Мы также показываем, что расширенная электродинамика [1,2,3] позволяет избежать указанного выше противоречия экспериментальным данным.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 23-11-00363, <https://rscf.ru/project/23-11-00363/>.

Литература

1. E. A. Ivanova, Modeling of thermal and electrical conductivities by means of a viscoelastic cosserat continuum // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 34:2 2022. 555–586
2. E. A. Ivanova, A new approach to modeling of thermal and electrical conductivities by means of the cosserat continuum // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 34:5 2022. 1313–1342
3. E. A. Ivanova, Thermo-electrodynamics of conductive media based on the nonlinear viscoelastic cosserat continuum of a special type // *Acta Mechanica* 234:12 2023. 6205–6249

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ПОСЛОЙНО НАРАЩИВАЕМОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТЕНКЕ

Иванов А.М.¹, Беляев С.П.¹, Реснина Н.Н.¹, Рубаник В.В.², Рубаник м.л. В.В.²

1 - Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

2 - Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

a.ivanov@spbu.ru

В настоящее время большой интерес вызывает использование аддитивных технологий для создания деталей сложной формы. Отличительной особенностью образцов, полученных такими методами, является наличие столбчатых зерен, которые образуются при затвердевании расплава. Формирование такой структуры ухудшает механические свойства полученных деталей. Одним из способов подавления роста столбчатых зерен является ультразвуковое воздействие в процессе охлаждения (сонокристаллизация). Ранее было показано, что использование ультразвуковых колебаний (УЗК) при наплавке позволяет существенно улучшить структуру и свойства материалов. В этих работах УЗК были приложены к подложке, на которую наплавляли детали, однако в работе не учитывали распределение амплитуды УЗК вдоль подложки и по высоте наплавляемых слоев. В настоящей работе проведен расчет распространения ультразвуковых колебаний в двух направлениях – вдоль и поперек подложки, на которую наплавляют образец. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами, полученными при наплавке однорядных стенок из Стали 3 методом послойной электродуговой наплавки с ультразвуком.

В экспериментальной установке подложку из Стали 3 размерами 25x10x900 мм жестко фиксировали на волноводе вблизи одного из краев подложки. Расчеты распространения ультразвуковых колебаний проводили с помощью модуля Explicit Dynamics программного комплекса ANSYS. Геометрия подложки и слоев, а также граничные условия были поставлены исходя из реальных условий. Граничные условия на перемещения по гармоническому закону с амплитудой 9 мкм выставлены на поверхность контакта подложки и волновода. Контакт считали жестким, без проскальзывания. В настоящей работе были рассмотрены следующие упрощения: не рассматривались процессы наплавления металла, кристаллизации, изменения температуры в подложке и в наплавленных слоях. Слои рассматривались как прямоугольные параллелепипеды. Расчет был произведен для геометрии образца соответствующей стальной подложке, а также подложке с параллелепипедами с разными высотами. Размеры слоев выбирали равным 10x6x50 мм, которые соответствовали экспериментальным. Тип контакта между различными слоями, а также между 1 слоем и подложкой выбирали Bonded. Максимальное количество слоев: 10.

Для определения времени выхода на стационарный режим колебаний, а также оптимального размера сетки были проведены расчеты колебания подложки без слоев. Было обнаружено, что в первые 10 мс подложка колеблется в нестационарном режиме, после чего наблюдаются стационарные колебания (стоячая волна). На основе экспериментальных данных и аналитического решения колебания балки Эйлера-Бернулли был определен оптимальный размер сетки равный 2 мм. Проведены расчеты при постепенном добавлении слоев, начиная с 1 слоя, заканчивая 10-м слоем. Для каждого расчетного эксперимента были определены распределения амплитуды колебаний в стационарном режиме по длине на разделах между 1 слоем и подложкой, а также между различными слоями. Полученные результаты показали, что вне зависимости от количества добавленных слоев, амплитуда по высоте практически не меняется и совпадает с амплитудой колебаний самой подложки. По мере добавления новых слоев материала, амплитуда колебаний монотонно уменьшается. Более того, было обнаружено что при увеличении количества добавленных слоев уменьшается волновое число. Для каждого расчетного эксперимента были определены узлы и пучности в зависимостях амплитуды от координаты. Было обнаружено, что один узел наблюдается в слоях материала на расстоянии 3 см от места приложения ультразвуковых колебаний.

Работа выполнена в рамках совместного проекта СПбНЦ и БРФФИ (№ 23-РБ-09-43).

МЕХАНИКА ГРАВИТАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФОРМУЛИРОВКЕ ПОТЕНЦИАЛА НЬЮТОНА

Иванов М.Я.^{1,2}, Мизин С.В.³

1 - НИИ Механики МГУ, Москва, Россия

2 - ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия

3 - ФГБУН Физический Институт РАН, Долгопрудный, Россия

mikhivan@yandex.ru

Механика гравитации рассмотрена в формулировке потенциала унифицированного силового поля, моделирующего с единых позиций не только гравитационное, но также кулоновское, слабое и сильное взаимодействия. Данная формулировка в стационарном случае представляет собой унифицированный закон Гаука-Ньютона-Кулона для описания силовых полей [1] и имеет вид уравнения Пуассона-Больцмана

$$D^2 \Delta \phi = 2sh\phi. \quad (1)$$

Здесь величина D - радиус экранирования Дебая-Гюккеля, который имеет место для любого силового поля. Из уравнения (1) за пределами экранирования на расстояниях, превышающих D , следует с любой наперед заданной точностью закон обратных квадратов для далекодействующих и близкодействующих силовых полей. Предложенная классическая модель не содержит традиционных парадоксов ньютоновской гравитации. Методология моделирования основана на подходах механики сплошной среды и всецело опирается на современные экспериментальные достижения [2,3].

Приведем характерный пример решений уравнения (1) при наличии ненулевой правой части и при её равенстве нулю. На рис.1 дано два аккуратных решения уравнения (1) для сферически симметричного случая в интервале $0,1 < r < 1,0$ с заданным безразмерным значением потенциала $\phi = 1$ при $r = 0,1$ и $\phi = 0,1$ при $r = 1,0$ (линия 1) и решение уравнения (1) с нулевой правой частью $\phi = 1/r$ (линия 2). На рис.1 также приведено диагностированное изображение поляризованного пространства иона золота [4], которое моделируется представленным численным решением (в случае сильного взаимодействия) [3].

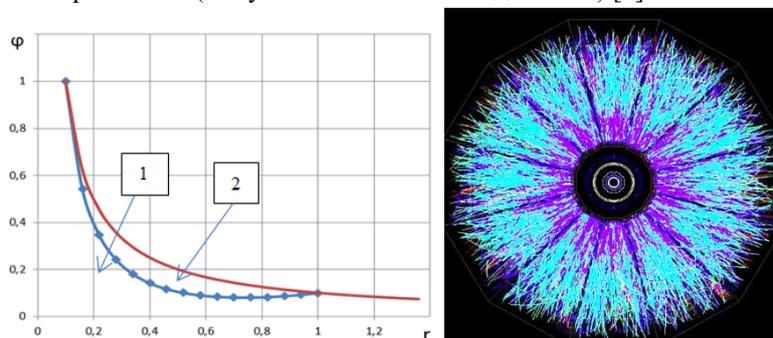


Рис. 1. Два решения уравнения (1) для сферически симметричного случая при $0,1 < r < 1,0$ со значением потенциала $\phi = 1$ при $r = 0,1$ и $\phi = 0,1$ при $r = 1,0$ (линия 1) и с нулевой правой частью $\phi = 1/r$ (линия 2) и диагностированное экспериментально изображение поляризованного пространства иона золота [4].

В докладе приведены характерные численные и аналитические решения для различных силовых полей.

Литература

1. М.Я. Иванов // Унифицированный закон Гаука-Ньютона-Кулона для описания силовых полей и материалов. XXIX Межд. Конф. ЭМПМ, МЭИ, 26-27 ноября 2021. сс. 3-7.
2. М.Я. Иванов // Space energy, "Energy Conservation", INTECH, 2012. pp. 4-56,.
3. М.Я. Иванов // О классической теории единого силового поля с моделированием ближнего и дальнего взаимодействия/ Физ. образов. в вузах.2022, 28, № 1, - сс. 43-61.
4. Tomography of ultrarelativistic nuclei with polarized photon-gluon collisions. // STAR 2023. Collaboration. Sci. Adv. No.9.

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ В СВЕТЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ XXI ВЕКА

Левин В.А., Иванов М.Я., Марков В.В.

НИИ Механики МГУ, Москва, Россия
mikhivan@yandex.ru

Рассматриваются перспективы классической механики сплошной среды в свете экспериментальных достижений XXI века и идей известной научной школы академика Г.Г. Черного. В своей программной лекции, прочитанной в актовом зале Московского политехнического музея 20 марта 2008 года [1], академик Г.Г. Черный говорит: «Ньютоновская механика – непревзойдённое достижение физики (натуральной философии) всей истории человеческой цивилизации. Она вечна. На её могучем древе появляются новые и новые ветви. Среди них – и ветви, выросшие из привитых на это древо черенков саженцев, возвращённых в лоне других естественных наук».

В полном соответствии с основополагающими идеями, изложенными в этой лекции, настоящее сообщение рассматривает характерные решения классической механики и динамики плазмы в свете последних экспериментальных достижений. К выдающимся экспериментальным достижениям XXI века следует отнести публикации по надежной регистрации сверхсветовых движений материи и излучения, уникальные эксперименты на ускорителях, по обнаружению новых элементарных частиц и по исследованию поляризованного пространства атома. Весьма важными для подтверждения выводов работы будут также опубликованные к настоящему времени результаты экспериментов по генерации «странного» излучения и образованию разного рода треков.

Теоретическая часть представленного исследования опирается на законы сохранения механики, классическую теорию электромагнитного поля и зарегистрированные в опытах силовые линии Фарадея. Силовые линии Фарадея определяют, в частности, структурные образования электронных оболочек атомов и молекул. Вибрации силовых линий при наличии внешнего переменного электромагнитного поля сопровождается генерацией «странного» излучения, а разрушение их структуры приводит к образованию отделившихся кусков, оставляющих при распространении вдоль поверхностей разного рода треки. При отсутствии движения зарядов можно наглядно демонстрировать только чисто электрические силовые линии Фарадея, как линии градиента электрического потенциала. Магнитное поле появляется только при движении зарядов и его также можно представить в виде магнитных силовых линий, вводя в рассмотрение свою потенциальную и вихревую части. В стационарном случае теория сводится к унифицированному закону Гау-Ньютона-Кулона, единым образом моделирующего гравитационное, сильное и слабое силовые взаимодействия. В нестационарном случае теория приводит к расширенной системе электромагнитных уравнений Максвелла. С помощью предложенной методологии рассмотрена механика материалов. Затронуты некоторые вопросы, касающиеся теории поля. Работа содержит характерные демонстрационные примеры. В плане технических приложений приведены примеры решения задач механики в двигателях со спиновой детонацией, высокотемпературных зарубежных ВРД и наземных ГТД.

Главная цель доклада состоит в дополнительном обосновании идей классической механики, сформулированных академиком Г.Г. Черным, в перспективных проблемах механики при её практическом применении.

Литература

1. Черный Г.Г. Слово о вечно новой механике. Лекция по программе общества «Знание», Московский политехнический музей, 20 марта 2008 года. Ин-т механики МГУ.

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ СЕКЦИИ ПЛОТИНЫ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

Иванов П.С.¹, Юделевич А.М.¹, Галактионов Д.Е.¹, Вознесенская Н.В.¹, Осеев В.Г.²

1 - АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», Россия

2 - Филиал АО «ЕвроСибЭнерго» «Красноярская ГЭС», Россия
ivanovps@vniig.ru

Калибровка расчетных моделей ГТС — весьма востребованная задача в практике расчетных исследований сооружений. Она решается в ходе разработке детерминированных и смешанных прогнозных моделей при назначении критериев безопасности, а также для построения расчетных моделей ГТС в условиях отсутствия достоверных сведений о значениях и распределении свойств материалов.

В докладе представлен метод калибровки расчетной модели секции бетонной гравитационной плотины Красноярской ГЭС. Рассмотрена типовая водосливная секция. Калибровка проведена на основе данных о горизонтальных перемещениях контрольных точек секции, полученных по показаниям прямого отвеса. Варьировались конструктивные модули деформации бетона плотины и скального основания. Задача решалась *методом планирования эксперимента* в совокупности с *методом конечных элементов*.

Для калибровки использован *ротательный центральный композиционный план*. В качестве переменных выбраны модуль деформации бетона и отношение модулей деформации бетона и основания. При одновременном изменении модулей бетона и основания, т. е. при постоянном их отношении, должна меняться только амплитуда расчётных перемещений. При изменении соотношения модулей должна меняться форма графика расчётных перемещений.

Расчеты выполнялись в три этапа. Сначала решалась задача нестационарной теплопроводности, в которой учитывалось начальное распределение температур, а также температурное воздействие окружающего воздуха и воды в водохранилище (рис. 1). Затем определялись перемещения от воздействия полученного температурного поля и перемещения от гидростатического давления воды. Разделение расчета на «температурную» и «статическую» части позволило снизить время расчета, так как модули деформации варьировались только при решении задачи статики.

На основе полученных результатов строилась *имитационная модель* в виде полинома второго порядка. Коэффициенты полинома определялись *методом наименьших квадратов*. Минимизировалась невязка между рассчитанными перемещениями и натурными данными. В результате получен набор модулей, при которых расчетная модель наиболее адекватно соответствует реальному состоянию сооружения. Проведено сравнение полученного результата с предыдущими работами.

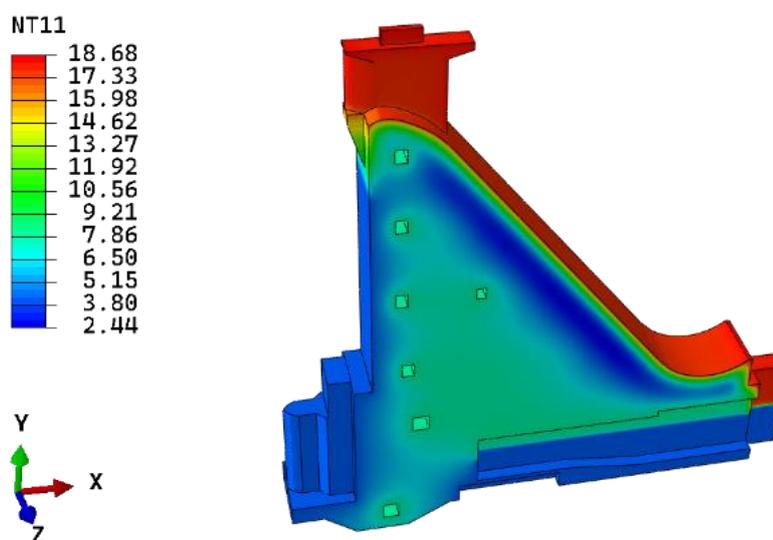


Рис. 1. Температурное поле секции плотины Красноярской ГЭС

ГИДРОДИНАМИКА ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ

Ивановский А.В., Шайхулов Р.М., Долов Т.Р.

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
alivan95@yandex.ru

В 1750-х гг. академик Л. Эйлер вывел уравнение напора, развиваемого идеальным насосом, работающим на однородной несжимаемой жидкости [1]. Данное уравнение вошло во все учебные и научные работы по гидравлическим машинам, насосам и компрессорам [2] в качестве отправной точки для их дальнейшего расчета и конструирования.

Современные условия эксплуатации насосов различного назначения осложняются включением газовой фазы в перекачиваемой среде. Сюда можно отнести горячий водяной пар для циркуляционных насосов в атомной промышленности, воздушные смеси для топливных насосов в авиации, работу лопастных насосов для добычи нефти с газами разной степени растворимости и т.д. Указанные работы показали, что наличие газовой фазы в перекачиваемой насосом среде снижает его характеристики.

Для определения показателей работы насоса на газожидкостных смесях (ГЖС) зачастую используются либо стендовые испытания, либо компьютерные испытания в программных комплексах, основанных на вычислительной механике жидкости и газа [3,4]. Оба варианта являются весьма дорогостоящими и времязатратными.

Авторами данной работы выявлены зависимости параметров напора и расхода ГЖС, что потребовало рассмотреть возможность модификации уравнения Л. Эйлера.

При использовании модифицированного уравнения Эйлера получены зависимости напора от расхода ГЖС (на примере насосов для добычи высокогазированной нефти).

Применение модифицированного уравнения Эйлера позволяет обеспечить базами данных программные комплексы подбора и диагностики установок скважинных электроприводных лопастных насосов для добычи нефти.

Литература

1. L. Euler // Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres à Berlin, 10: 1754. 227-295.
2. В. Н. Ивановский, А. А. Сабиров, А. В. Деговцов и др. // Основы конструирования, расчета и стендовых испытаний рабочих ступеней электроприводных лопастных насосов для добычи нефти. 2020. 243 с.
3. Z. Tan , J. Y. Zhang , Y. X. Zhang et al. Study on transient flow behaviors in a three-stage helico-axial multiphase pump under slug flow condition from wellhead. Physics of Fluids. 1 December 2023; 35 (12): 124112.
4. А. В. Ивановский, Р. М. Шайхулов, Т. Р. Долов // Анализ публикаций по перекачке многофазных смесей электроприводными лопастными насосами, Территория «Нефтегаз», 9-10 2022. 62–72.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОТКЛИКА ЧАСТИЧНО НАСЫЩЕННОГО ПОРОУПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ЗАГЛУБЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЬЮ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Игумнов Л.А., Петров А.Н., Белов А.А.

ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского", Россия
igumnov@mech.unn.ru

При проектировании строительных конструкций, подземных сооружений, а также в машиностроении приходится сталкиваться с расчетными схемами, в которых полупространство, ослаблено цилиндрической полостью [1]. В таких задачах знание смещений на поверхности полупространства в дальнейшем позволяет с использованием той или иной методики определять напряжения, деформаций, смещения во внутренних точках. [2].

В настоящей работе методом граничных элементов выполнен расчет перемещений на поверхности пороупругого полупространства с заглубленной под областью приложения поверхностной нагрузки полостью цилиндрической формы (рис. 1). Материал полупространства описывается линейной моделью частично насыщенной пороупругой сжимаемой среды в $u_i^s - p^w - p^a$ -формулировке, где u_i^s – смещение скелета, p^w и p^a – поровые давления наполнителей.

В качестве метода решения краевой задачи трехмерной динамической теории пороупругости используется прямой вариант метода граничных интегральных уравнений (ГИУ). Для решения ГИУ применяется метод граничных элементов. Возникающие дискретные аналоги решаются методом Гаусса. Организуется шаговый процесс получения значений граничных функций, основанный на шаговом алгоритме численного обращения преобразования Лапласа.

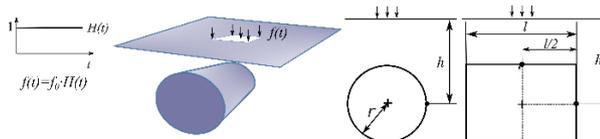


Рис. 1. Схема задачи

Получено гранично-элементное решение задачи о действии динамической нагрузки на деформируемое частично насыщенное пороупругое полупространство с заглубленной цилиндрической полостью. Рассмотрено воздействие силового механического скачка по времени на участке дневной плоскости полупространства в форме квадрата. Дневная плоскость полупространства без нагруженного квадрата задается как свободная от усилий и проницаемая. Полость цилиндрической формы расположена под нагруженным квадратом. Граница полости рассматривается свободной от усилий, а также полагаются нулевые поровые давления смачивающего и несмачивающего наполнителей и нулевые потоки смачивающего и несмачивающего наполнителей на границе полости.

Полученные численные результаты включают анализ влияния: коэффициента насыщенности пороупругого материала на волновые картины в полупространстве при наличии заглубленной полости; величины заглубления полости на волновые картины в полупространстве при фиксированных размерах полости; величины радиуса основания полости и высоты цилиндрической полости на волновые картины в полупространстве фиксированной размерах величине заглубления полости; граничных условий на границе полости для случаев проницаемых и непроницаемых границ на волновые картины в полупространстве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00138).

Литература

1. Мірошніков В. Ю. Визначення напруженого стану композиту у вигляді шару і півпростору з циліндричною порожниною, при заданих на граничних поверхнях переміщеннях // Науковий вісник будівництва. – 2019. – Т. 97. – №. 3. – С. 59-64.
2. Назарова, Л. А. Метод определения параметров очага готовящегося землетрясения на основе данных о смещениях дневной поверхности / Л. А. Назарова, Л. А. Назаров // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 427, № 4. – С. 534-538

К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ОБЛАСТИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГНЕТАЕМОГО ФЛЮИДА

Извеков О.Я.

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия
izvekov_o@inbox.ru

Технология гидроразрыва пласта (ГРП) является важнейшей технологией стимуляции продуктивных пластов. Вовлечение в разработку нетрадиционных месторождений углеводородов закономерно привело к развитию технологии гидроразрыва. Важнейшим условием продуктивности сланцевых пластов, отличающихся высоким содержанием углеводородов, но обладающих низкой или сверхнизкой проницаемостью, является развитая система трещин. Для ее создания в современной модификации ГРП применяется вода со сниженной

вязкостью, так называемая «скользящая вода» (slickwater). Созданная в окрестности магистральной трещины гидроразрыва область, охваченная связанной системой трещин называется «стимулированным объемом» [1].

В настоящей работе будет рассмотрен следующий частный случай: 1) жидкость гидроразрыва с нулевой вязкостью проникает в систему предварительно существующих залеченных естественных трещин, которые делят горную породу на блоки, 2) блоки непроницаемые, 3) новые трещины не образуются, 4) процессы разрушения (активации естественных трещин) сосредоточены в узкой области на границе стимулированного объема (оггибающая поверхность, содержащая кончики трещин). Таким образом, становится возможным трактовать стимулированный объем как растущее включение (неоднородность) с энергоемкой сингулярной границей. В настоящей работе подходы механики конфигурационных сил [2] обобщаются на случай, когда включение, играющее роль стимулированного объема, представляет собой растущее пористое (трещиноватое) насыщенное флюидом тело. Насыщенное пористое тело трактуется в духе механики сплошной среды в виде двух взаимодействующих сплошных сред (флюид и скелет), сосуществующих в одном и том же физическом пространстве [3, 4]. При этом подразумевается, что элементарный объем многофазной среды должен содержать большое число блоков, ограниченных трещинами. Записывая закон сохранения энергии для деформируемого включения в виде принципа возможных перемещений, выводятся условия на скачки физических величин на сингулярных поверхностях [5]. Рассмотрены два случая: 1) на фронте разрушения непрерывна вариация положения частиц скелета (когерентный «фазовый переход»), 2) на фронте разрушения непрерывна только нормальная составляющая вариации положения частиц скелета (условие с проскальзыванием). Полученные условия справедливы для скелета произвольной реологии и анизотропии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-21-00175.

Литература

1. Warpinski N.R., Mayerhofer M.J., Vincent M.C., Cipolla C.L., Lonon E.P. // Stimulating unconventional reservoirs: maximizing network growth while optimizing fracture conductivity, J. Canadian Petroleum Technology, 48:10 2009. 39–51.
2. G.A. Maugin // Configurational forces: thermomechanics, physics, mathematics, and numerics. 2016.
3. O. Coussy // Poromechanics. 2004.
4. В.И. Кондауров // Механика и термодинамика насыщенной пористой среды. 2007. 310 с.
5. Мухамедиев Ш.А. // Тензоры энергии-импульса и универсальные условия равновесия сингулярных поверхностей, Изв. Акад. наук СССР: Механика твердого тела, 2 1990. С. 86.

ТРАЕКТОРИИ ЖИДКИХ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ СОЛИТОНОПОДОБНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР В ЖИДКОСТИ ПОДО ЛЬДОМ

Ильичев А.Т.

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Россия
ilichev@mi-ras.ru

Рассматривается слой жидкости конечной глубины, описываемый двумерными уравнениями Эйлера. Ледяной покров моделируется геометрически нелинейной упругой пластиной Кирхгоффа-Лява. Траектории частиц жидкости под ледяным покровом находятся в поле нелинейных поверхностных бегущих волн малой, но конечной амплитуды. Рассматриваются либо солитоноподобные поверхностные структуры: классическая уединенная волна, обобщенная уединенная волна уединенный волновой пакет (монокроматическая волна под оггибающей, скорость которой равна скорости этой оггибающей), либо так называемый темный солитон (бегущая волна, являющаяся нелинейным продуктом боры и периодической волны). В анализе используются явные асимптотические выражения для решений, описывающих упомянутые волновые структуры на границе раздела вода-лед, а также асимптотические решения для поля скоростей в толще жидкости, генерируемого этими волнами [1,2].

Литература

1. Ильичев А.Т., Савин А.С., Шашков А.Ю. Траектории частиц жидкости под ледяным покровом в поле уединенной изгибно-гравитационной волны // Изв. вузов. Радиофизика. (2023) Т. 66. №10. С. 848-861.
2. Il'ichev A.T., Savin A.S., Shashkov A.Yu. Motion of liquid particles in the field of 1:1 resonance nonlinear wave structures in a fluid beneath an ice cover // Int. J. Non-Linear Mech. (2024) V. 160, 104665.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ В ОКРЕСТНОСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Кабанова П.К., Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
kabanovark@mail.ru

Изучение зарождения и роста области с измененными свойствами вокруг трещины является предметом различных экспериментальных исследований. Такая область, называемая процесс-зоной, распространяется вместе с трещиной и является дополнительным источником диссипации энергии при разрушении. Это приводит к необходимости учета взаимного влияния роста трещины и процесс-зоны. Примерами зон с измененными свойствами является область фазовых переходов вокруг растущей трещины в сплавах с памятью формы [1], сплаве церия и циркония [2], антисегнетоэлектрической керамике [3], а также крейзы в полимерах [4].

Рассматривается связанная задача об эволюции области новой фазы в результате фазового превращения в теле с концентраторами напряжений. Материал фаз принимается линейно-упругим. Фазовый переход сопровождается собственной деформацией превращения и изменением модулей упругости. Распространение межфазной границы описывается с помощью кинетического уравнения, связывающего скорость межфазной границы с конфигурационной (термодинамической) силой, равной скачку нормальной компоненты тензора энергии-импульса Эшелби [5, 6]. Для моделирования эволюции области новой фазы в теле разработана численная процедура, основанная на методе конечных элементов.

Продемонстрированы различные сценарии развития области новой фазы в однородном теле под действием внешней деформации. Показано, что область новой фазы сама может выступать в роли концентратора напряжений, вызывающего фазовое превращение. На основе анализа распределения конфигурационной силы показано, как распространение межфазной границы зависит от расстояния между межфазной границей и концентратором напряжений, а также от формы концентратора напряжений. Рассмотрено, как концентратор напряжений в виде эллиптического отверстия может вызывать распространение межфазной границы даже при внешней деформации, недостаточной для существования новой фазы в отсутствие концентратора напряжений. Изучено, как форма и степень локализации области новой фазы в вершине эллиптического отверстия (прообраз процесс-зоны в окрестности вершины трещины) зависят от параметров материалов фаз. На основе полученных распределений напряжений также показано, как рост области новой фазы вызывает релаксацию напряжений в теле. Исследовано распространение межфазной границы в окрестности трещиноподобных концентраторов напряжений, а также совместная кинетика роста трещиноподобного концентратора напряжений и области новой фазы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

Литература

1. Wilkes K.E., Liaw P.K. // The fatigue behavior of shape-memory alloys JOM. 2000. Vol. 52. P. 45-51.
2. Hannink R.H.J., Swain M.V. // Metastability of the martensitic transformation in a 12 mol% Ceria-Zirconia alloy: I, deformation and fracture observations. J. Am. Ceram. Soc. 1989. Vol. 72. №1. P. 90-98.
3. Tan X., Young S.E., et al. // Transformation toughening in an antiferroelectric ceramic. Acta Mater. 2014. Vol. 62. P. 114-121.
4. Bevis M., Hull D. Craze distribution around cracks in polystyrene. J. Mater. Sci. 1970. 5. P. 983-987.
5. Maugin G. // Configurational Forces. Thermomechanics, Physics, Mathematics, and Numerics. London, New York: Chapman & Hall/CRC Boca Raton. 2011. 527 p.
6. Фрейдин А. Б. // О конфигурационных силах в механике фазовых и химических превращений. ПММ, 86(4). 2022. 571-583.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО РАСТВОРА В КОНФУЗОР-ДИФФУЗОРНОМ КАНАЛЕ

Кадыров А.И., Шведов И.Н., Зарипов Р.Р., Макарушкин Д.В.

*Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ КазНЦ РАН, Россия
aidarik@rambler.ru*

Для повышения коэффициента охвата пласта широкое распространение получила технология полимерного обводнения. Структура пласта представляет собой сложную структуру, включая пористые элементы. Конфузор-диффузорный канал может быть рассмотрен как элемент такой пористой структуры.

В настоящей работе с помощью оптического метода SiV экспериментально исследована структура течения водных растворов полимеров в сужающихся-расширяющихся каналах с осевой симметрией. Реологические свойства растворов характеризуются одинаковой зависимостью сдвиговой вязкости от скорости сдвига, но различными значениями времени релаксации при одноосном растяжении и, следовательно, вязкостью при одноосном растяжении. Время релаксации рассчитано с помощью метода жидкого мостика [1]. Проанализированы профили скорости в поперечных сечениях, а также распределения осевой скорости на оси канала для широкого диапазона чисел Вейссенберга (отношение упругих свойств жидкости к вязким). Для низких чисел Рейнольдса профили скорости в круглой трубе сравнены с разработанным аналитическим решением [2]. Для сравнения рассмотрены различные конфигурации каналов, включающие вариацию длины, на которой происходит сужение, и степени сужения канала. Выявлено влияние времени релаксации раствора при одноосном растяжении на структуру течения и размеры вихревых структур в приграничной области. Предложен способ оценки верхнего предела числа Вейссенберга, начиная с которого происходит переход к неустановившемуся течению.

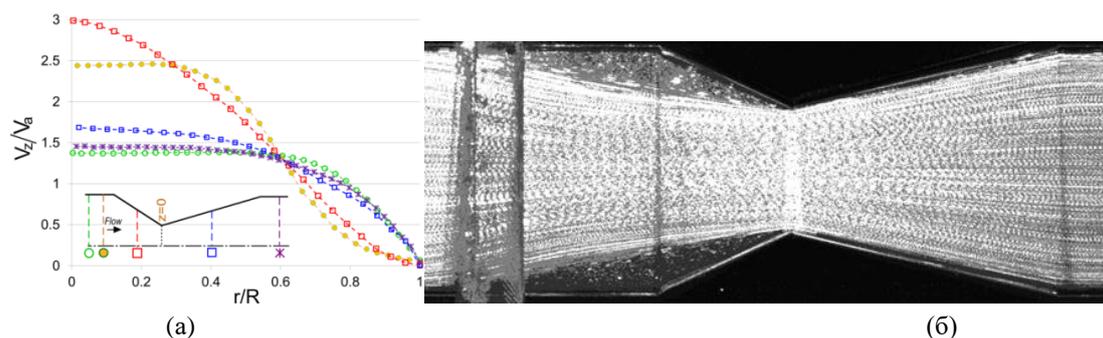


Рис. 1. (а) Безразмерные профили осевой скорости; (б) линии тока.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00166, <https://rscf.ru/project/23-21-00166/>.

Литература

1. А. В. Базилевский, В. М. Битов, М. М. Лернер, А. Н. Рожков. Распад нитей полимерных растворов // ВМС. Серия А. 1997. Т. 39. №3. С.474-482.
2. E. Vachagina, N. Dushin, E. Kutuzova, A. Kadyirov. Exact solution for viscoelastic flow in pipe and experimental validation // Polymers. 2022. 14(2). С. 334.

К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ШУМОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМУ МЕТОДУ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Казачек С.В.¹, Казачек Н.Е.²

1 - ООО «Газпром проектирование», Нижний Новгород, Россия

2 - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
nkazachok@yandex.ru

Из всех методов неразрушающего контроля метод акустической эмиссии (АЭ) один из самых эффективных способов обнаружения дефектов. В качестве оборудования в методе АЭ используется акустико-эмиссионный измерительный комплекс «Лель»/A-Line 32D (DDM). Комплекс «Лель» предназначен для проведения неразрушающего контроля и оценки состояния ответственных объектов. Метод АЭ, это помехозависимый метод и, несмотря на внедрение в инженерную практику прецизионных измерительных усилителей, не находит должного использования в объеме РФ. Одной из важнейших проблем акустико-эмиссионного контроля является снижение шумов в акустическом сигнале. Шумы разделяют на естественные и технические, аддитивные и мультипликативные. К техническим шумам относят шумы, вызванные несовершенством изготовления приборов. Рассматривается фликкерный шум, именно данный шум вносит наиболее весомый вклад в помехи при регистрации сигнала АЭ. В работе установлена связь между плотностью напряжения $1/f$ -шума при низких частотах и пределом выносливости исследуемого объекта. Как характеристики шумов, так и кривой усталости отражают состояние структуры объекта.

1. Естественной представляется идея связать низкочастотный шум, а конкретно $1/f$ -шум, с релаксационными явлениями в твердых телах.

2. Изучение шумов, в большей степени фликкерного шума, является важной задачей специалистов, осуществляющих контроль работы магистральных газопроводов, в частности широкого использования методов АЭ, как надежного, информативного варианта.

Литература

1. Н.Е. Казачек, С.В. Казачек Кластеризация данных акустической эмиссии в прогнозировании разрушений на трубопроводах газа // Обзорные прикладной и промышленной математики. М.: Редакция журнала "ОП и ПМ", том 22, выпуск 5. 2. 2015. С. 585 -586.
2. А.В. Якимов Физика шумов и флуктуация параметров. Электронное учебное пособие. Нижний Новгород. 2013.108с.
3. F.N/Hooge "1/f Noise Sources." IEEE Transactions on Electron Devices Vol. 41, 11.
4. Н.Е.Казачек Оценка усталостной долговечности рессор автомобиля с учетом фреттинг-износа: дис. ... канд. техн. наук. /Н.Е.Казачек - Н.Новгород, 2000. – 163 с.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА В ПРИЕМНИКЕ С СУБДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ ДЛЯ БПЛА

Астафьев И.А., Калинин Д.А., Бондарев Д.В.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина), Россия
dimk.a.a@inbox.ru

В средствах радиомониторинга для анализа сигналов в широкой мгновенной полосе применяют технологию субдискретизации сигнала. Использование этой технологии обеспечивает расширение мгновенной полосы анализа, устраняя тем самым пропуски одновременно присутствующих в радиоэфире сигналов, а также позволяет смягчить высокие требования, предъявляемые к частоте дискретизации. Установка приемника средства радиомониторинга на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА) позволяет повысить дальность обнаружения источников радиоизлучения, однако накладывает дополнительные ограничения на массогабаритные характеристики и условия эксплуатации.

В данной статье рассмотрены основные тенденции развития современных средств радиомониторинга и связанные с ними сложности их разработки. Представлены основные методы восстановления несущей частоты

сигнала в приёмнике с субдискретизацией [1-4], приведены их достоинства и недостатки. Произведено сравнение приведённых методов и даны рекомендации по использованию этих методов в приёмнике, установленном на борту БПЛА.

Литература

1. Подстригаев А.С., Смоляков А.В., Лихачёв В.П. Программно-определяемые средства широкополосного анализа сигналов на основе технологии субдискретизации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021, 184 с.
2. Смоляков А.В., Подстригаев А.С. Характеристики обнаружения цифрового приемника с субдискретизацией // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 95–107.
3. Huang X, Bai R, Jin X, Fu H (2016) Robust and Efficient Frequency Estimator for Undersampled Waveforms Based on Frequency Offset Recognition, PLoS ONE, 2016, vol. 11, № 10.
4. Frequency estimation by 1-bit quantization and table look-up processing Tomas Andersson, Mikael Skoglund and Peter Handel, Department of Signals, Sensors and Systems Royal Institute of Technology 100 44 Stockholm, Sweden.

РАДИАЦИОННО- КОНВЕКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА В ТРОПОСФЕРЕ И ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ С КАПЛЯМИ ВОДЫ

Канцырев Б.Л.

Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Россия
boris.kantsyrev@mail.ru

Представлена радиационно- конвективная расчётная модель тропосферного и приподного атмосферного слоя с характерным поперечным размером 100~1000 км, содержащего влажный воздух с каплями воды. Турбулизация воздуха за счёт свободной конвекции и адвекции учитывается соотношением Извекова-Дородницына. Влияние солнечной радиации учтено в рамках двух-поточковой модели с коэффициентами поглощения, зависящими от массовой доли водяного пара и CO_2 . Атмосферный воздух представлен, как дисперсная смесь влажного воздуха и водяных капель. Водяные капли в атмосфере сферические, не взаимодействующие между собой. Температура капель, массовая доля водяных паров на поверхности капель и поток испарения- конденсации в воздух с их поверхности определяются из решения уравнений теплопроводности, баланса массы и диффузии водяных паров. Моделируются процессы тепло- и массообмена в атмосферном столбе, взаимодействующем с приповерхностным океанским слоем ветрового перемешивания в радиационно- конвективном приближении. Рассмотрено влияние параметров и конвективных волновых свойств модели на нестационарные решения, которые представляют различные режимы тепло- и массообмена вблизи гладкой водной поверхности.

РЕЛОКАЛИЗАЦИЯ СВОБОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СТЕРЖНЕ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Капшук Л.М., Шелехов Н.Э.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
leokapshukov@mail.ru

В докладе рассматривается линейная задача о распространении начального локального возмущения в стержне, шарнирно закреплённом с двух концов, с заданным начальным отклонением. Исследуется процесс эволюции возмущения. С течением времени наступает делокализация возмущения, и волны распространяются по всему стержню. Затем через некоторый промежуток времени происходит релокализация колебаний.

В данной работе к поставленной задаче применяется теория энергетической динамики [1]. Энергетическая динамика – раздел классической динамики, описывающий волновой перенос энергии по аналогии с законами механического движения материальных тел. Получена зависимость координаты энергетического центра – центра распределения энергии – от времени, демонстрирующая периодическую релокализацию свободных поперечных колебаний. Зависимость представлена на рис. 1. Проведен анализ и найдены зависимости временных промежутков релокализации от начальных параметров задачи.

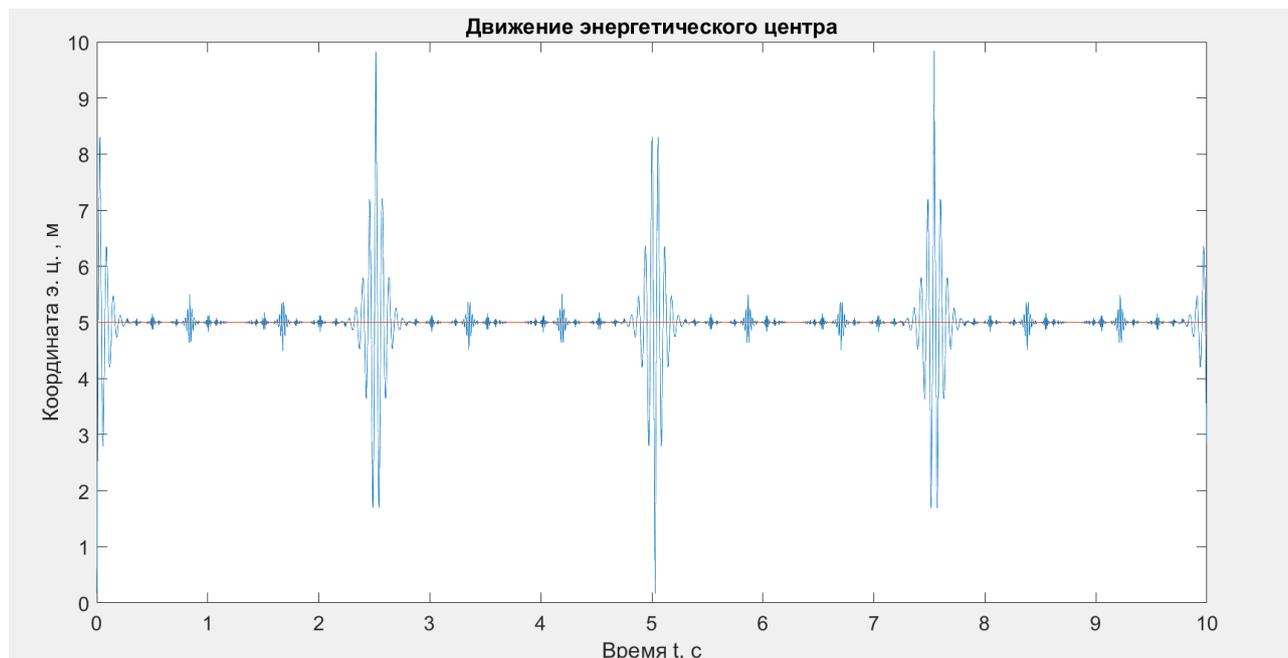


Рис. 1. Зависимость координаты энергетического центра от времени

Также было найдено решение уравнения поперечных колебаний стержня численными методами: неявным методом конечных разностей и методом Рунге. Численные методы позволяют ускорить процесс решения задачи. Полученные результаты сравниваются с аналитическим решением дифференциального уравнения свободных поперечных колебаний.

В будущем мы займемся объяснением природы релокализации энергетического центра и будем стремиться к применению полученных результатов на практике.

Литература

1. А.М. Krivtsov. Dynamics of matter and energy. 2022, Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik, 103, e202100496.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Карамов Р.И.¹, Ломов С.В.², Сволфс Й.², Сергеичев И.В.¹

1 - Центр технологий материалов, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*2 - Department of Materials Engineering, KU Leuven, Лёвен, Бельгия
radmir.karamov@skoltech.ru*

Для численных расчетов механических свойств гетерогенных материалов математически корректно использовать периодические граничные условия (ПГУ), что может быть проблематично при использовании моделей, основанных на реальных данных (цифровых двойников), из-за хаотичной природы материалов. Если геометрия репрезентативных объемных элементов (РОЭ) на противоположных гранях отличается (РОЭ не является периодическим), то структурные несоответствия вблизи границ приводят к искусственным колебаниям напряжений и деформаций, которые влияют на результаты расчета.

Данная работа сфокусирована на численном моделировании (гомогенизация) композиционных материалов, армированных короткими стеклянными волокнами (средняя длина 50 мкм, средний диаметр 10 мкм, 20% массовой доли волокон). Трехмерное изображения внутренней структуры материала были получены с помощью рентгеновской компьютерной томографии (КТ) с разрешением 1.5 мкм/пиксель. Для генерации периодической структуры была разработана и обучена модель глубокого обучения (ГО), основанная на генеративно-сопоставительной архитектуре [1] (generative adversarial network, GAN). Разработанная архитектура

была модифицирована путем добавления функции ошибки периодичности и "критика" периодичности. Для преобразования трехмерных изображений в конечно-элементной модели использовалось программное обеспечение VoxTex [2] и Avizo.

Разработанная модель глубокого обучения позволяет генерировать изображения РОЭ с периодичностью структуры до 95%. При использовании сгенерированных периодических структур гомогенизация с ПГУ дает результаты в пределах экспериментальной погрешности. Анализ результатов моделирования РОЭ различных размеров и граничных условий подтвердил, что с уменьшением размеров РОЭ возрастает влияние искусственных напряжений и деформаций, из-за увеличения отношения поверхности к объему материала. При больших размерах РОЭ использование периодических граничных условий не дает значительного повышения точности расчетов и сравнимы с результатами при использовании граничными условиями Дирихле или Неймана.

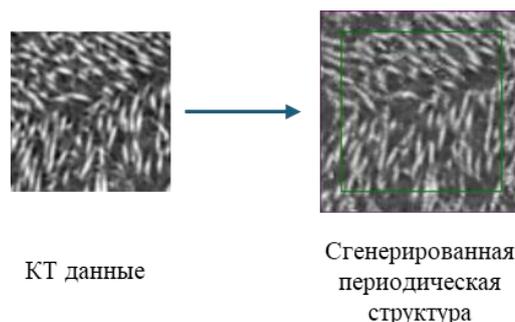


Рис. 1. Генерация периодических репрезентативных объемных элементов на основе КТ данных композиционных материалов

Литература

1. Karamov R, Lomov S V, Sergeichev I, Swolfs Y, Akhatov I. Inpainting micro-CT images of fibrous materials using deep learning. *Comput Mater Sci* 2021;197:110551. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110551>.
2. Straumit I, Lomov S V., Wevers M. Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2015;69:150–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.11.016>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ В ВЯЗКОУПРУГОМ МАТЕРИАЛЕ

Карасева У.П., Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
u.p.karaseva@gmail.com

Обсуждаются два связанных процесса релаксации в вязкоупругом материале. Один процесс порождает релаксацию напряжений, скорость которой определяется коэффициентом вязкости. Второй, более медленный процесс связан с релаксацией структуры к равновесному состоянию, он продолжается и после релаксации напряжений и может быть описан изменением параметров структуры. Оба процесса приводят к изменению коэффициента вязкости. Поэтому применение моделей с изменяющимся коэффициентом вязкости является актуальным способом моделирования поведения материалов. Иногда в расчетах используется прямая зависимость вязкости от времени, однако эта зависимость должна следовать из зависимости вязкости от напряжений и/или релаксирующих параметров структуры. Примерами материалов, вязкость которых зависит от напряжений, являются диоксид кремния [1], возникновение которого исследовалось в химической реакции окисления кремния, и литизированный кремний, возникающий в литий-ионных батареях [2]. В результате возникает новый материал, изменяется реология. С другой стороны, причиной изменения вязкости стеклообразных материалов является неравновесность микроструктуры, которая, релаксируя к равновесному состоянию, изменяет коэффициент вязкости [3]. В этом случае вязкое деформирование материалов может быть описано моделями с изменяющимся коэффициентом вязкости, зависящим от фиктивной температуры,

характеризующей степень неравновесности структуры (см., например, [4–6]). В предыдущих работах авторов была развита модель, учитывающая одновременное влияние напряжений и фиктивной температуры на вязкость (см., например, [7]). Однако, фиктивная температура – это лишь частный случай параметра состояния, описывающего степень неравновесности. Следовательно, фиктивной температуре можно придать механический смысл через концепцию внутренних параметров состояния. В связи с чем, целью данной работы явилось описание процессов релаксации вязкоупругого материала через релаксирующие параметры состояния и их связи с фиктивной температурой. Предлагается простейший сценарий построения соответствующей модели.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

Литература

1. D.-B. Kao, J.P. McVittie, W.D. Nix, K.C. Saraswat // Two-dimensional thermal oxidation of silicon. II. Modeling stress effects in wet oxides, IEEE Trans. Electron Devices. 1988. Vol. 35. No. 1. P. 25–37.
2. M.T. McDowell, S.W. Lee, W.D. Nix, Y. Cui // 25th anniversary article: Understanding the lithiation of silicon and other alloying anodes for lithium-ion batteries, Adv. Mater. 2004. Vol. 25. No. 36. P. 4966–4984.
3. О.В. Мазурин, С.М. Рехсон, Ю.К. Старцев // О роли вязкости при расчете релаксации свойств стекла в интервале стеклования, Физ. хим. стекла. 1975. Т. 1. No. 5. С. 438–442.
4. O.S. Narayanaswamy // A model of structural relaxation in glass, J. Am. Ceram. Soc. 1971. V. 54. No. 10. P. 491–498.
5. O.V. Mazurin, V.P. Kluyev, S.V. Stolyar // Temperature dependences of structural relaxation times at constant fictive temperatures in oxide glasses, Glastechn. Ber. 1983. V. 56. No. 2. P. 1148–1153.
6. J.C. Mauro, D.C. Allan, M. Potuzak // Nonequilibrium viscosity of glass, Phys. Rev. B. 2009. V. 80. No. 9. Art. 094204.
7. У.П. Карасева, А.Б. Фрейдин // О влиянии напряжений на неравновесную вязкость стекол, Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математич. науки. 2023. Т. 165. No. 3. С. 219–235.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ В МЕХАНИКЕ И АКУСТИКЕ

Бобровницкий Ю.И., Карпов И.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
karpov@imash.ac.ru

Большинство механических и акустических задач формулируется и решается с помощью непрерывных по времени моделей, описываемых дифференциальными уравнениями и их решениями в виде непрерывных функций времени. Между тем эти задачи могут быть эквивалентным образом сформулированы и решены с помощью дискретно-временных моделей, описываемых конечно-разностными уравнениями и их решениями в виде временных рядов [1]. В некоторых ситуациях такой подход значительно облегчает решение.

Доклад посвящен созданию теоретических основ дискретно-временного подхода к решению механических и акустических задач. Критерием эквивалентности непрерывных и дискретных моделей принято математически точное равенство соответственных решений во все дискретные моменты времени. Приведены аналитические зависимости, позволяющие по непрерывной модели строить дискретную модель и наоборот. В докладе также рассмотрено одно из самых полезных свойств дискретного моделирования – простота построения дискретных моделей по экспериментально измеренным сигналам. Для нахождения адекватного порядка модели предложен и применен энергетический критерий ЕС (Energy Criterion) – рис. 1. Он количественно характеризует точность модели по мощности сигналов, что выгодно отличает его от других известных критериев (например, АИС) при решении вибрационных и акустических задач [2]. В качестве примера приведено дискретное решение одной известной задачи модального анализа – определения количества демпфирования в колебательных системах по экспериментальным данным.

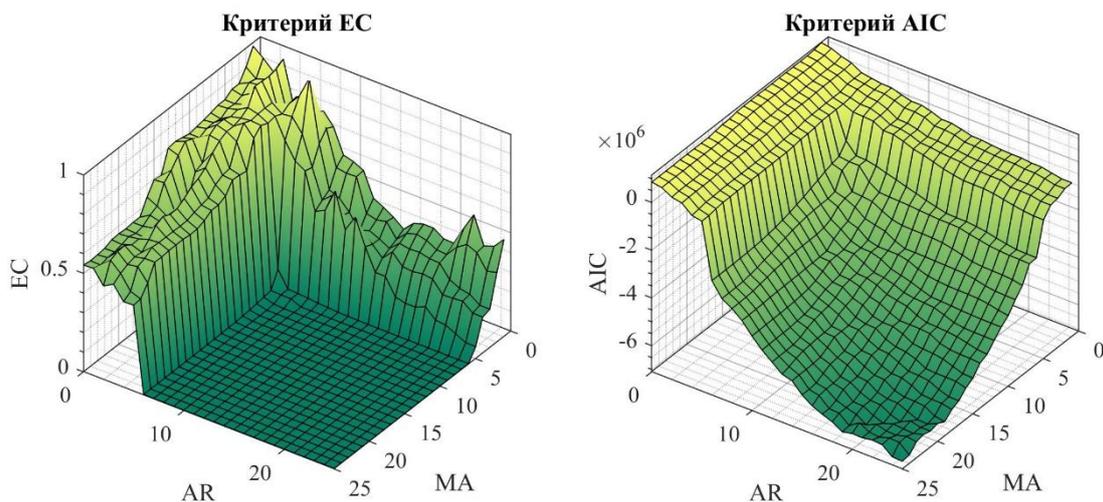


Рис. 1. Критерии ЕС (слева) и АИС (справа) адекватности порядка моделей.

Литература

1. Ljung L. System Identification Theory for the User. 2nd Edition. University of Linkoping, Sweden: Prentice Hall, 1999. 672 p.
2. Бобровницкий Ю.И., Карпов И.А. Дискретная акустика: ARMA-моделирование временных процессов, теория // Акустический журнал. – 2023. – Том 69, № 6. – С. 665–684.

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ С ОТВЕРСТИЕМ

Каштанова С.В.^{1,2}, Ржонсницкий А.В.^{1,3}

*1 - Санкт-Петербургский государственный Технологический институт
(Технический университет), Россия*

2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

*3 - Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, Россия
kastasya@yandex.ru*

В настоящей работе авторы представляют результаты вычислений поля напряжений цилиндрической оболочки, ослабленной круговым отверстием и находящейся под воздействием одноосного растяжения вдоль оси цилиндра. Данная задача была поставлена в 1946 году, к ее решению был оживленный интерес в течение 20 лет как советских, так и западных ученых, однако корректно решить в данной постановке ее так и не удалось. Авторы поняли причину, ввиду которой не удастся реализовать решение и предложили альтернативный подход.

Литература

1. Лурье А.И. Концентрации напряжений в области отверстия на поверхности кругового цилиндра // ПММ АН СССР. 1946 Т.10.№3. с.397–406.
2. Kashtanova S. V., Rzhonsnitskiy A. V., Gruzdkov A. A. On the Issue of Analytical Derivation of Stress State in a Cylindrical Shell with a Circular Hole under Axial Tension // Materials Physics and Mechanics.2021.Т.47, pp.186-195
3. Каштанова С. В., Ржонсницкий А. В. Аналитический подход к выводу поля напряжений цилиндрической оболочки с круговым отверстием при растяжении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.2021.No.2,с.с.64–75. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.2.07>
4. Каштанова С. В., Ржонсницкий А. В. Сравнение аналитического и численного решений задачи о цилиндрической оболочке с круговым отверстием под действием различных нагрузок // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2023 Т. 23, вып. 2 С. 195–206
5. Kashtanova S. V., Rzhonsnitskiy A. V. Investigation of Systems of the Stress Field Problem of a Cylindrical Shell with a Circular Cutout under Various Boundary Conditions // J Braz.Soc.Mech.Sci.Eng.44.259. 2022. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03534-7>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОБРАТИМОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ, ВПЛОТЬ ДО ФРАГМЕНТАЦИИ, ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА ВВ

Киселев А.Б.¹, Логинов Д.П.²

1 - Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

2 - Авиационный комплекс имени С.В. Ильюшина, Москва, Россия

akis2006@yandex.ru

Исследуется задача динамики деформирования и разрушения металлической камеры при взрыве заряда конденсированного ВВ в её полости. Рассматривается конструкция, представляющая собой две полусферы, контактирующих между собой, но не скрепленные по торцам. Внутри и снаружи камеры находится воздух.

Поведение материала оболочки описывается уравнениями модели упругопластического течения типа Прандтля-Рейса [1-3]. Шаровая составляющая тензора напряжений зависит от температуры.

Воздух – идеальный газ. Для давления в продуктах детонации используется уравнение в форме JWL [4].

В качестве критерия начала макроразрушения используется критерий предельной удельной диссипации [2]. Задача решается в адиабатическом приближении; термическая диссипация и диссипация континуального разрушения отсутствуют: $d_T = 0$, $d_F = 0$. Учитывается только механическая диссипация d_M .

Для расчета числа фрагментов и их распределения по массам используется модифицированное распределение типа Вейбулла [5] и предположение о том, что на разрушение расходуется половина накопленной в теле упругой энергии, а другая её половина идёт на кинетическую энергию «доразлета» осколков.

В спектре фрагментов выделяются две морфологические совокупности ([6, 7]): крупные фрагменты A , образованные магистральными трещинами и содержащие обе исходные поверхности оболочки; сопутствующие мелкие фрагменты B , содержащие одну исходную поверхность. Спектр фрагментов B в свою очередь включает в себя два подкласса: B^* - фрагменты контактной зоны со стороны ВВ, образованные поверхностями сдвига; B^{**} – фрагменты зоны, расположенной у внешней поверхности оболочки, образованные в основном отколами радиального направления. Процесс фрагментации рассматривается как двухстадийный. Сначала происходит образование «предварительной» крупной фракции осколков A . Затем в результате отрыва от крупных фрагментов мелких осколков происходит образование мелкой фракции B .

Выписывается система уравнений. Первое означает что суммарная масса крупных осколков задается коэффициентом k_m^A ($0 < k_m^A < 1$), а второе, что накопленная в оболочке упругая энергия на момент разрушения $t = t_*$ расходуется на создание поверхностей разрушения [6, 8, 9]. Аналогично проводятся рассуждения для мелких осколков B . Полное число осколков $N_0 = N_0^A + N_0^B$.

Задача решается численно с использованием лагранжевой и эйлеровой расчетных сеток. Камера моделировалась лагранжевой расчетной сетки, а газовая среда (воздух, продукты взрыва) – эйлеровой сеткой.

Расчет детонации производится с использованием программного комплекса ABAQUS, дополненного разработанными для решения рассматриваемого типа задач расчетными модулями [8, 9].

Расчеты проводились для сферической оболочки [10]. Они согласуются с экспериментами [10]. Так время начала разрушения в эксперименте - 15 мкс, в расчете – 13 мкс. Число осколков: 4970 и 4907 соответственно.

Работа поддержана Междисциплинарной научно-образовательной школой Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса», направление Н5 «Космическое материаловедение».

Литература

1. M.L. Wilkins // Computer simulation of dynamic problems. 1999. 246 p.
2. А.Б. Киселев А.Б., М.В. Юмашев // Деформирование и разрушение при ударном нагружении. Модель повреждаемой термоупругопластической среды, Прикл. механ. и техн. физ., 1990, № 5. 116-123.
3. А.Б. Киселев А.Б. // О численном интегрировании уравнений упругопластической среды, Вестн. МГУ, Сер.: Матем. Механ., 1995, № 4. 71-74.
4. Л.П. Орленко // Физика взрыва. 2004, Т. 1. 772 с.
5. В. Вейбулл // Усталостные испытания и анализ их результатов. 1964. 273 с.
6. А.Б. Киселев // Математическое моделирование фрагментации тонкостенных конструкций и компактных элементов при взрывном и ударном взаимодействии, Математическое моделирование, 2012, Т. 24, № 2. 33-66.

7. В.А. Одинцов // Бимодальное распределение фрагментов цилиндров, Физ. горения и взрыва, 1991, № 5. 118-122.
8. А.Б. Киселев, Д.П. Логинов // Взрывозащитный контейнер: математическое моделирование необратимого деформирования и разрушения, вплоть до фрагментации, разлета осколков, Прикл. физ. и матем., 2021, № 2. 34-45.
9. А.Б. Киселев, Д.П. Логинов // Численное моделирование дробления сферических оболочек при внутреннем взрывном нагружении, Прикл. физ. и матем., 2022, № 2. 30-37.
10. А.И. Иванов, М.А. Сырунин, А.Г. Федоренко, А.П. Цой // Дробление сферической оболочки при внутреннем взрывном нагружении, Проблемы прочности, 2001, № 2. 78-87.

ОДНОНАПРАВЛЕННЫЕ ИМПУЛЬСЫ

Киселев А.П.^{1,2}

1 - *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
2 - *Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова
РАН, Санкт-Петербург, Россия*
aleksei.kiselev@gmail.com

В последние годы возрос интерес к локализованным решениям волнового уравнения

$$u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} - c^{-2}u_{tt} = 0, \quad c = \text{const} > 0, \quad (1)$$

обладающим свойством однонаправленности. Одна из формулировок однонаправленности состоит в требовании, чтобы в разложении решения по плоским волнам присутствовали только однородные плоские волны, бегущие в направлениях, составляющих с некоторым выбранным направлением угол, не превосходящий $\pi/2$. Это свойство выражает естественное с физической точки зрения требование, чтобы математическая модель импульса описывала его распространение строго от источника.

Первые построения таких решений [1] основывались на интегралах Фурье—Бесселя

$$u = u(\rho, z, t) = \int_0^\infty d\omega e^{i\omega t} \int_0^{\omega/c} dk_z A(k_z, \omega) e^{-ik_z z} J_0\left(\rho \sqrt{(\omega/c)^2 - k_z^2}\right), \quad (2)$$

где $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$, с достаточно произвольным весом A [1]. Простейшее однонаправленное решение,

$$u = \frac{1}{S(S - z_*)},$$

однако, было получено на основе других, элементарных, соображений [2]. Здесь

$$S = S(t, \rho) = \sqrt{(ct_*)^2 - \rho^2},$$

причем $z_* = z + i\zeta$, $t_* = t + i\tau$, $\zeta > 0$ и $\tau > 0$ — свободные параметры, а ветвь корня выбрана так, что

$$S|_{x=0, y=0} = ct_*.$$

С другой стороны, отмечено [3], что в этих вопросах важен специальный класс относительно неискажающихся волн, а именно

$$u = \frac{f(S - z)}{S}, \quad (3)$$

где форма волны f — произвольная функция.

Мы устанавливаем эквивалентность представлений осесимметрических импульсов вида (2), относительно неискажающихся волн (3) и суперпозиций плоских волн с волновыми векторами, имеющими положительные проекции на ось z . Подход базируется на восходящей к Благовещенскому, Мозесу и Проссеру [4,5] технике, использующей представление решений уравнения (1) в терминах их асимптотики в дальней зоне при больших временах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124040800009-8).

Литература

1. M. Zamboni-Rached // Unidirectional decomposition method for obtaining exact localized wave solutions totally free of backward components, Phys. Rev. A., 79:1 2009. 013816.
2. I. A. So, A. B. Plachenov, A. P. Kiselev // Simple unidirectional finite-energy pulses, Phys. Rev. A, 120:6 2020. 063529
3. I. Besieris, P. Saari // Energy backow in unidirectional spatiotemporally localized wave packets, Phys. Rev. A, 107:3 2023. 033502

4. А. С. Благовещенский // О некоторых новых корректных задачах для волнового уравнения, В сб.: Тр. V Всес. симп. по дифракции и распространению волн. 1971. 29–35.
5. H. E. Moses, R. T. Prosser // Acoustic and electromagnetic bullets: derivation of new exact solutions of the acoustic and Maxwell's equations, SIAM J. Appl. Math., 50:5 1990. 1325–1340

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОСРЕДНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОУПРУГИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛА С КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Киселев Ф.Б.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
fyodor.kiselyov@math.msu.ru

В работе рассматриваются аналитический и численный подходы к определению нестандартных свойств среды на микро и макроуровнях. В качестве модели среды на микроуровне предложена ячейка [1] в виде термоупругой стержневой конструкции, обладающая свойством связанности осевой деформации и кручения. Анализируется сохранение этого свойства на уровне материала, то есть квазипериодической структуры.

Вычисляется осредненный тензор теплового расширения структуры, обладающей свойством связанности растяжения (сжатия) и кручения. Структура является квазипериодической, что позволяет использовать метод осреднения [2] для качественной оценки меры связанности в зависимости от анизотропии структуры. Кроме того, указанная периодичность позволяет оценить зависимость ее термомеханических свойств от числа ячеек периодичности. На основании проведенной серии вычислений показано, что осредненный тензор теплового расширения не зависит от числа слоев периодичности по радиальному направлению и по высоте. Так же установлено, что для температурных деформаций сохраняется свойство связанности растяжения (сжатия) и кручения. Несмотря на изотропию свойств материала, составляющего структуру, осредненный тензор теплового расширения является анизотропным с ненулевой компонентой $\alpha_{\varphi z}$, отвечающей за температурную деформацию кручения.

Литература

1. S. V. Sheshenin, N. B. Artamonova, F. B. Kiselev et al. Asymptotic homogenization of materials with artificial periodic structures // AIP Conference Proceedings. — 2020. — Vol. 2216, no. 1. — P. 070005–1–070005–8.
2. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах // М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. литературы // – 1984. – 352 с.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ПЛОТНОЙ СУСПЕНЗИИ С МАЛОИНЕРЦИОННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Клименко Ю.Т., Боронин С.А.

Сколковский институт науки и технологий, Россия
Julia.Klimenko@skoltech.ru

Исследование направлено на изучение устойчивости течений плотных суспензий в узких каналах, с особым вниманием к их применению в нефтесервисных технологиях, в частности, к технологии гидроразрыва пласта (ГРП). Научная значимость работы состоит в анализе устойчивости течений двухфазной среды в широком диапазоне изменения объемной концентрации частиц. Сформулирована система уравнений, описывающая изотермическое течение суспензии, содержащей малоинерционные частицы в плоском канале в рамках односкоростной модели взаимопроникающих континуумов. Для описания реологии плотной суспензии с использованы сформулированные в литературе модели, основанные на экспериментальных данных измерений реологии гранулированных сред. Получены профили объемной концентрации частиц и скорости суспензии в поперечном к потоку направлении в установившемся режиме. Полученные результаты хорошо согласуются как с экспериментальными данными, так и с результатами, полученными в более ранних работах других авторов. Сформулирована линейная система уравнений, описывающая распространение малых возмущений к полученному плоскопараллельному течению суспензии в виде бегущих волн (классический метод Фурье). Задача устойчивости сведена к решению задачи на собственные значения для сформулированной системы

обыкновенных дифференциальных уравнений относительно амплитуды возмущения. Обсуждается вопрос применимости теоремы Сквайра для рассматриваемого течения суспензии. Результаты исследования позволят определить зависимость границы области неустойчивости от безразмерных параметров течения плотной суспензии (числа Рейнольдса, средней по сечению канала объемная доля частиц, отношения плотностей фаз). Ожидается, что течение плотной суспензии будет неустойчиво в широком диапазоне области входных параметров из-за пространственной неоднородности объемной доли частиц и сопутствующей переменной в пространстве эффективной вязкости суспензии.

РАЗРАБОТКА СОПРЯЖЕННЫХ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ С УЧЕТОМ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ

Климкович Н.М., Николайчик М.А., Журавков М.А.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
nikita.klimkovitch@yandex.ru

На сегодняшний день, проблема моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород при его отработке по всей глубине является актуальной и до конца не решенной. Существующие аналитические решения рассматриваемой задачи либо не являются универсальными, либо имеют плохие показатели корреляции с данными натурных наблюдений. Данное обстоятельство связано с тем, что при разработке породного массива, по всей его глубине образуются обширные области нарушения сплошности, разрушения, трещинообразования и т.п. Вследствие этого, перспективным подходом для решения данного класса задач является применение сопряжения нескольких численных методов, основанных как на понятиях механики континуальных, так и дискретных сред [1-3].

В разработанных в настоящей работе сопряженных алгоритмах, решение в сплошных областях породного массива определяется на основе алгоритмов МКЭ, а в областях нарушения сплошности массива – при помощи вводимых блочных элементов специального типа, представляющих собой систему упругих и/или вязкоупругих связей [4]. Параметры таких блочных элементов определяются путем «настройки» и верификации модельных расчетов с использованием данных, рассчитанных согласно инженерной методике, применяемой для условий Старобинского месторождения калийных солей, а также анализа данных натурных наблюдений за перемещениями точек породного массива.

При решении серии задач в статической постановке, где параметр времени явно не учитывается, в алгоритме используются специальные блочные элементы первого типа, представляющие собой систему упругих связей, жесткости которых являются переменными для каждого временного промежутка и глубины ведения горных работ. В свою очередь, при решении задач в динамической постановке, где параметр времени учитывается в явном виде, используются специальные блочные элементы второго типа, представляющие собой систему вязкоупругих связей, жесткости упругих связей которых, как и коэффициент демпфирования вязких связей, остаются постоянными вне зависимости от временного промежутка и зависят только от глубины разработки породного массива.

В ходе исследования было установлено, что оба алгоритма численного моделирования позволяют корректно определять максимальное оседание земной поверхности на активной и затухающей стадии сдвижений и оседаний подработанной породной толщи. Помимо этого, алгоритм с введением специальных блочных элементов второго типа также позволяет корректно определять максимальное оседание земной поверхности на начальной стадии рассматриваемого процесса.

Кроме того, получен качественный результат о том, что, начиная с некоторой глубины, размер участка деформированной земной поверхности, образованного вследствие ведения горных работ, начинает уменьшаться при увеличении глубины разработки породного массива. Данное заключение подтверждается результатами натурных замеров оседаний дневной поверхности над подрабатываемым пространством при ведении горных работ на больших глубинах.

Полученные в рамках исследования результаты могут быть использованы при решении прикладных задач по исследованию геомеханического состояния подрабатываемой породной толщи при использовании различных технологических схем ведения горных работ. При этом представленный подход может быть использован как в условиях Старобинского месторождения, так и может быть адаптирован для других горно-геологических условий.

Литература

1. М. А. Журавков // Современные численные методы в механике. 2022. 132 с.
2. Li Sh., Zhao Mh., Wang Yn., and Wang Jg. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process, *Comput. Mech., WCCM VI in conjunction with APCOM'04*, 2004.
3. Y. Ju, Y. Wang, Ch. Su, D. Zhang, Zh. Ren // Numerical analysis of the dynamic evolution of mining-induced stresses and fractures in multilayered rock strata using continuum-based discrete element methods, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019. 191-210.
4. М. А. Журавков, М.А. Николайчик, Н. М. Климкович // Модифицированный алгоритм МКЭ с введением блочных упругих элементов моделирования геомеханического состояния подработанного массива горных пород, *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023. 3-12

МАЯТНИК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ: МЕХАНИЗМЫ ПОБЕГА ИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЫ

Ковалева М.А.^{1,2}, Залевский Н.С.^{1,2}, Гендельман О.В.³

1 - Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова

Российской академии наук, Москва, Россия

2 - Факультет физики НИУ ВШЭ, Москва, Россия

3 - Технион, Хайфа, Израиль

margarita.al.kovaleva@gmail.com

Задачи побега из потенциальной ямы имеют достаточно давнюю историю. Несмотря на существенно переходный характер процесса, пороги выхода обычно предсказывали путем исследования стационарных режимов частицы в яме. Событие выходы из ямы идентифицировалось по потере устойчивости установившегося отклика или по чрезмерно большой амплитуде отклика, не соответствующей глубине ямы. Иногда для нахождения соответствия результатам численных экспериментов использовались поправочные коэффициенты. В целом такой подход представляется разумным в случае относительно большого трения, когда система быстро достигает окрестности стационарного состояния. Однако если трение отсутствует или невелико, переходный режим может быть весьма длительным и сильно отличаться от установившегося режима.

Аналитический подход, трактующий явления побега из ямы с точки зрения нестационарной динамики вынужденной системы, был развит в недавних работах. Подход справедлив в окрестности первичного резонанса и основан на известном приближении изолированного резонанса. Динамика системы описывается уравнениями медленного течения на резонансном многообразии сниженного порядка. Это упрощение позволяет эффективно исследовать динамику переходных процессов.

Целью настоящей работы является распространение изложенного выше подхода на случай вынужденного маятника. Такое исследование требует многочисленных поправок к предлагаемому подходу. Прежде всего, будут рассмотрены различные способы возбуждения. В частности, изучение случая параметрического возбуждения потребует расширения подхода изолированного резонанса за пределы привычного резонанса 1:1. Еще один вопрос, который необходимо разрешить, это критерий выхода из резонансного многообразия. В отличие от ранее рассмотренных примеров, будет показано, что приближение изолированного резонанса в принципе не предсказывает выход из ямы для всех видов внешнего воздействия. Приближение изолированного резонанса становится недействительным вблизи сепаратрисы невынужденного маятника, т. е. вблизи перехода от колебаний к вращениям. Альтернативные критерии выхода из ямы обсуждаются для всех рассматриваемых типов воздействия.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ БРИЗЕРОВ В ДИСКРЕТНЫХ ЦЕПЯХ НА ПОДЛОЖКЕ С ТРЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННО-НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

Посохова С.Д.¹, Ковалева М.А.²

1 - Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*2 - Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия
margarita.al.kovaleva@gmail.com*

Распространение энергии в нелинейных цепях эффективно осуществляется нелинейными волнами – бризерами. Присутствие трения также как и нелинейный характер взаимодействия между элементами существенно влияет на процессы переноса энергии. В настоящей работе исследовано распространение бризеров в колебательной цепи на подложке с нелинейным взаимодействием соседей и трением. В описанной модели, распространение бризера демонстрирует двухстадийный характер поведения. Первый этап характеризуется степенным затуханием амплитуды бризера, распространяющегося через конечное число звеньев цепи. Резкое уменьшение амплитуды бризера к концу этого конечного фрагмента характеризуется его остановкой. На втором этапе бризер обладает очень малой амплитудой со сверхэкспоненциальным затуханием. Описание этого этапа можно провести рассматривая упрощенную модель взаимодействия двух линейных осцилляторов с затуханием, с нелинейным характером взаимодействия. При начальном возбуждении одного из этих осцилляторов, система демонстрирует конечное число циклов биения в системе. Мы проанализировали распространение таких бризеров в цепях с различными потенциалами взаимодействия между цепями, включая переход к существенно-нелинейному случаю, близкому к вибро-ударному пределу. Работа проведена при поддержке гранта РФФИ № 24-23-00435.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗЫ НА ПРИМЕРЕ PLUSICE PCM A95

Кожанова П.А., Лобачев М.И., Новокшенов А.Д.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
polinakozhanova@yandex.ru*

Материалы с фазовым переходом (PCM – Phase Change Material) часто используются для решений в области терморегулирования, например для создания тепловых барьеров или изоляций. Это связано со свойством таких материалов накапливать и высвобождать тепловую энергию в процессе перехода из жидкой фазы в твёрдую или наоборот.

В данной работе представлен обзор материала с фазовым переходом (PlusICE PCM A95), используемый в диагностике HFS-Reflectometry токамака ITER.

При численном моделировании пожара в одном из верхних портов здания ITER (Рис. 2), элемент конструкции, сделанный из материала PlusICE PCM A95, начинает менять свою фазу и ранее производимая методика расчёта пожара является неконсервативной. Сам PCM используется здесь для того, чтобы сохранить целостность расположенных в нём пожарозащитных окон под воздействием высоких температур. Таким образом целью исследования стала разработка методики численного моделирования фазовых переходов (превращения фаз) твёрдого тела в жидкое в задаче теплообмена. Также в работе произведены сравнительные анализы максимальной температуры нагрева пожарозащитных окон, чья целостность с точки зрения допустимого рабочего режима представляет наивысшую ценность для сценария пожара.

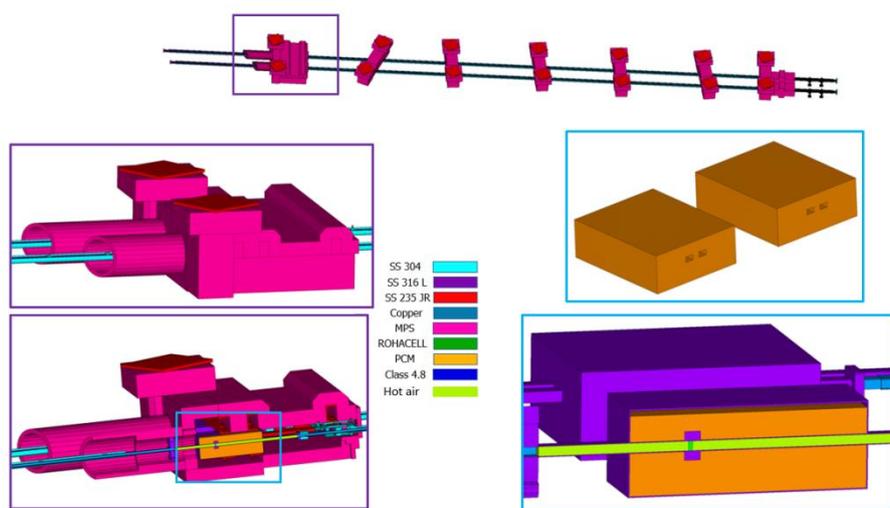


Рис. 2 – Диагностика рассматриваемого 8^{ого} верхнего порта Галереи и расположение в ней материала PCM.

Для решения данной задачи использовался программный комплекс ANSYS Mechanical APDL, который позволяет решать проблемы изменения фаз. Для анализа фазового перехода выполняется нелинейный нестационарный тепловой расчет конечно-элементной модели диагностики. Различием линейного и нелинейного анализов с переходным процессом заключается в том, что при втором необходимо учитывать скрытое тепло, то есть тепловую энергию, которую система накапливает или высвобождает во время фазового перехода. Чтобы учесть скрытое тепло было необходимо определить энтальпию материала как функцию температуры. Более того, при изменении фазы с твердой в жидкую скачком меняются свойства фаз, следовательно, для моделирования данного превращения необходимо в сотни раз увеличивать коэффициент теплопроводности. Для учета влияния пожара на компоненты диагностики учтен конвективный теплообмен с окружающей средой, излучение с элементов пожарозащиты, а также с медных слоев волновода вблизи рассматриваемого материала. С помощью разработанной методики появляется возможность консервативной и более приближенной к реальности оценки распределения температурных полей диагностики HFS-Reflectometry токамака ITER.

ФИЛЬТРАЦИЯ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ И ТРЕЩИНАХ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Турбаков М.С.¹, Рябокони Е.П.¹, Гладких Е.А.¹, Гузев М.А.¹, Голосов А.М.²,
Кожевников Е.В.¹

1 - ФГАОУ ВО ПНИПУ, Пермь, Россия

2 - ФГАОУ ВО ДВФУ, Владивосток, Россия

kozhevnikov_ev@mail.ru

Эксплуатация природных подземных резервуаров происходит с периодическим изменением порового давления и напряженно-деформируемого состояния горных пород, вследствие этого возникают деформации и снижаются фильтрационные свойства пустотного пространства. Оценка снижения проницаемости пластов обычно проводится на основании лабораторных исследований керновых образцов. Однако, не смотря на общую закономерность снижения проницаемости от давления, имеющую степенную зависимость, связь между результатами лабораторных и данных промысловых исследований отсутствует. Это приводит к сложности прогнозирования изменения производительности добывающих и нагнетательных скважин и экономической оценке реализуемых геолого-технических мероприятий.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния циклических нагрузок на

проницаемость естественных пористых и трещиноватых горных пород. По результатам экспериментальных исследований установлены механизмы снижения проницаемости керновых образцов пористых и трещиноватых горных пород. Выполнен анализ полевых исследований скважин по изменению проницаемости при снижении порового давления. На основании сравнительного анализа результатов лабораторных и полевых исследований установлено, что трещиноватые породы имеют наибольшую чувствительность к изменению порового давления, тогда как в пористых породах снижение проницаемости помимо деформации также обусловлено влиянием миграции коллоидов. В работе предложена модель, позволяющая оценивать снижение проницаемости пластов по результатам лабораторных исследований керна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00699, <https://rscf.ru/project/23-19-00699/>.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЛОЕННОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ

Коляйн Ю.М.¹, Зайев Д.К.¹, Кузькин В.А.¹, Самоловов Д.А.²

*1 - Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Группа компаний Газпром нефть, Санкт-Петербург, Россия
yurakolayan@mail.ru*

В настоящее время вводятся в разработку газовые и газоконденсатные месторождения с относительно низким качеством запасов. Рентабельная разработка подобных объектов требует применения протяжённых горизонтальных скважин, в связи с чем возникает проблема накопления и выноса жидкости из подобных конструкций. Накопление жидкости в горизонтальном стволе скважины может привести к возникновению нежелательных нестационарных процессов, снижающих продуктивность, в ряде случаев – к блокировке притока газа. Исследование процесса выноса жидкости из скважины можно проводить с помощью численного моделирования. Для моделирования течений жидкости со свободной поверхностью широко используется метод Volume Of Fluid (VOF). В докладе приводятся результаты численного моделирования расслоенного турбулентного газожидкостного течения в канале при наличии заданного градиента давления. Задача решается в периодической постановке в пакете ANSYS Fluent с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST. Все расчеты проводятся на низкорейнольдсовых сетках. Помимо VOF-моделирования выполняются расчеты по двузонной модели с выделением межфазной границы, на которой обеспечивается равенство касательных напряжений в газе и жидкости. Результаты расчетов представлены для разных значений режимных параметров, в частности варьировались плотность газа, содержание жидкости, градиент давления, а также угол наклона канала, которые при этом объединены в единый безразмерный параметр. Некоторые результаты расчетов сравниваются с данными эксперимента. В работе показано, что для рассмотренной задачи использование классического VOF-подхода дает некорректные результаты, в частности наблюдается увеличение расхода жидкости и существенное занижение расхода газа. Для решения этой проблемы использовалась поправка Егорова, обеспечивающая подавление турбулентной вязкости на границе раздела фаз. В ходе методических расчетов обнаружено, что поправка Егорова чувствительна к расчетной сетке и к величине управляющего параметра. При правильной настройке поправка Егорова обеспечила хорошее совпадение с экспериментальными данными. Расчеты по двузонной модели также обеспечили достаточно хорошее согласование с данными экспериментальных измерений, что позволило использовать такой подход при других значениях режимных параметров. Результаты работы будут применяться в качестве характеристических функций и управляющих зависимостей в дифференциальных уравнениях, описывающих нестационарные процессы, происходящие при выносе и накоплении жидкости в горизонтальных скважинах.

К ВОПРОСУ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКОНА ГИБСОНА-ЭШБИ ДЛЯ ПРИРОДОПОДОБНОЙ СТРУКТУРЫ С ГЕОМЕТРИЕЙ ПРИМИТИВ ШВАРЦА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НАГРУЗОК

Дьяченко С.В.^{1,2}, Колыванов А.Ю.^{1,3}

1 - Институт химии силикатов им. И.В. Гребенищикова РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

3 - Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

svdiachenko@technolog.edu.ru

В работе проведено исследование выполнения закона Гибсона-Эшби [1] в ячеистых материалах с геометрией природоподобных структур – трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) при динамических нагрузках. Испытание материала на сжатие по методу Кольского осуществлялось на экспериментальной установке, созданной на основе разрезного стержня Гопкинсона-Кольского. В качестве образцов были выбраны ТППМЭ с геометрией примитив Шварца, изготовленные из полилактида на 3D-принтере по технологии FDM.

Известно, что механическое поведение ячеистых материалов при статических нагрузках может быть описано законом Гибсона-Эшби. Применяя данный закон для расчета величин модуля Юнга E и предела прочности σ ячеистых материалов можно получить следующую зависимость:

$$\frac{M}{M_s} = C \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n, \quad (1)$$

где M – механическое свойство ячеистого материала (в данной работе σ или E), M_s – механическое свойство исходного твердотельного материала (σ_s или E_s), ρ – плотность ячеистого материала, ρ_s – плотность исходного твердотельного материала.

На основании результатов испытаний на сжатие ячеистых материалов с геометрией ТППМЭ при высокоскоростных нагрузках изучена зависимость в соответствии с уравнением (1) для относительного модуля упругости (E/E_s) и относительной прочности (σ/σ_s) от относительной плотности (ρ/ρ_s), при этом последняя величина, по сути, является степенью заполнения объема материалом ϕ . Моделирование образцов ТППМЭ с различной степенью заполнения ϕ производилось за счет изменения толщины стенки (0,4; 0,8; 1,2 мм) в программе «SpaceClaim», что соответствует величине $\phi = 0,20; 0,32; 0,53$. Зависимости представлены на рисунке 1.

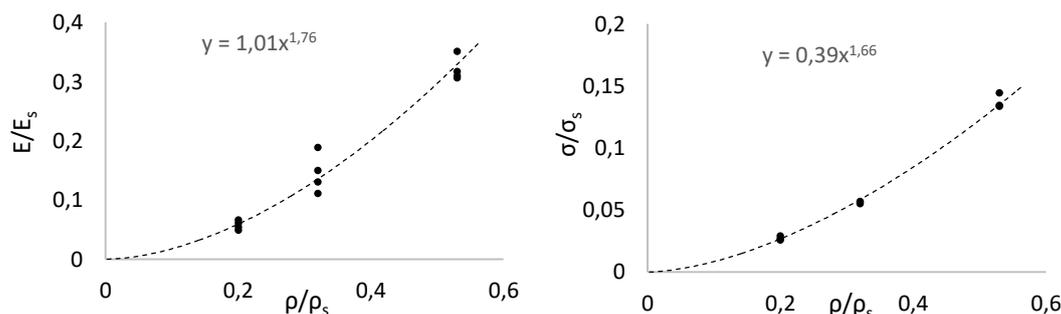


Рис. 1. Зависимости относительного модуля упругости (E/E_s) и относительной прочности (σ/σ_s) от относительной плотности (ρ/ρ_s) ячеистого материала.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 20-73-10171 «Энергопоглощающие материалы нового поколения на основе градиентных ячеистых структур».

Литература

1. L.J. Gibson, M.F. Ashby // The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 382, 1782, The Royal Society, 1982. 43–59.

О МЕХАНИЗМАХ СМЕНЫ МАСШТАБНЫХ УРОВНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Мещеряков Ю.И., Коновалов Г.В., Жигачёва Н.И., Диваков А.К.

ИПМаш РАН, СПб, Россия
goldenten@yandex.ru

Развитие многомасштабной механики деформируемого твердого тела предполагает учет образования промежуточных масштабов между макромасштабом и микромасштабом с последующими переходными неравновесными процессами. На протяжении уже нескольких десятилетий выделяют по крайней мере три масштабных уровня квазистатической деформации: дислокационный, мезомасштабный и макромасштабный.

Важным шагом в получении эффективной картины многомасштабных процессов являются параллельные испытания в двух схемах ударного нагружения. Первая схема – испытание в условиях одноосной деформации, а вторая – высокоскоростное внедрение удлиненного стержня. В первой конфигурации мишень испытывает только лобовое сопротивление. Во второй ударник встречает два механизма сопротивления внедрению: лобовое сопротивление плоской носовой части ударника и сопротивление трения боковой поверхности ударника.

Полученные в двух сериях испытаний зависимости характеризуют процессы, происходящие в материале при первом прохождении ударной волны. В экспериментах по ударному нагружению алюминиевого сплава 1565 выявлены три области скоростей деформации с различным откликом материала на ударное нагружение. Диапазоны скоростей деформации, в которых проявляется специфика материала, одинаковы для обоих типов испытаний как с точки зрения поведения пластического фронта и откольной прочности, так и с точки зрения сопротивления высокоскоростному внедрению удлиненного ударника. При испытаниях в условиях одноосной деформации (плоского соударения ударника с мишенью) обнаружено anomальное поведение фронта пластической волны, приводящее к структурно-неустойчивому состоянию материала и смене масштабного уровня динамического деформирования и разрушения. Показано, что триггерным механизмом смены масштабного уровня динамического деформирования являются осцилляции пластического течения, пространственный период которых совпадает с размером структурного элемента испытываемого материала.

Микроструктурные исследования показывают изменения морфологии структуры алюминиевого сплава 1565 для различных областей скоростного диапазона. Выявлены структурные элементы с пространственными размерами, соотносящиеся периоду осцилляций на пластическом фронте ударной волны.

ГЛУБОКОВОДНЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Коптев А.В.

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия
alex.koptev@mail.ru

Предлагается рассмотрение глубоководных движений на основе 3D уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести. В безразмерных переменных исходные уравнения имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0.\end{aligned}$$

Где u, v, w, p представляют основные неизвестные, соответственно компоненты вектора скорости и

давление; Re – неотрицательный параметр, называемый числом Рейнольдса; g – ускорение свободного давления.

Предлагается рассматривать движения в большом и глубоком резервуаре, когда влиянием ограничивающих поверхностей можно пренебречь. Такая ситуация имеет место при движении в морских глубинах. В работах [1,2] дано описание метода, который позволяет для этого случая построить точные решения с учетом всех членов, включая и нелинейные. Метод основан на интеграле уравнений ранее полученном автором. Два новых решения, полученных с помощью указанного подхода, имеют вид.

Решение 1.

$$u = \frac{1}{2} e^{\frac{261r}{49Re}} \left(\frac{8}{7} A_0 e^{2x + \frac{8y-z}{7}} - \frac{8}{7} B_0 e^{-2x + \frac{y+8z}{7}} \right), \quad v = \frac{1}{2} e^{\frac{261r}{49Re}} \left(-2A_0 e^{2x + \frac{8y-z}{7}} + \frac{8}{7} C_0 e^{2x - \frac{y+8z}{7}} \right),$$

$$w = \frac{1}{2} e^{\frac{261r}{49Re}} \left(2B_0 e^{-2x + \frac{y+8z}{7}} + \frac{1}{7} C_0 e^{2x - \frac{y+8z}{7}} \right), \quad p - p_0 = -\frac{1}{4} e^{\frac{522r}{49Re}} \left(4A_0 B_0 e^{\frac{9y-9z}{7}} + \frac{18}{49} A_0 C_0 e^{4x+y+z} \right) - gz.$$

Решение 2.

$$u = \frac{1}{2} e^{\frac{814r}{3969Re}} \left(\frac{2}{21} A_0 e^{\frac{x+2y+3z}{9} + \frac{3z}{7}} + \frac{2}{21} B_0 e^{-\frac{x+3y+2z}{9} + \frac{2z}{21}} \right), \quad v = -\frac{1}{2} e^{\frac{814r}{3969Re}} \left(\frac{1}{9} A_0 e^{\frac{x+2y+3z}{9} + \frac{3z}{7}} + \frac{2}{21} C_0 e^{\frac{x-3y-2z}{9} - \frac{2z}{21}} \right),$$

$$w = \frac{1}{2} e^{\frac{814r}{3969Re}} \left(\frac{1}{9} B_0 e^{-\frac{x+3y+2z}{9} + \frac{2z}{21}} + \frac{3}{7} C_0 e^{\frac{x-3y-2z}{9} - \frac{2z}{21}} \right), \quad p - p_0 = -\frac{1}{4} e^{\frac{1628r}{3969Re}} \left(\frac{11}{147} A_0 C_0 e^{\frac{2x-y+z}{9} - \frac{z}{3}} - \frac{1}{81} A_0 B_0 e^{\frac{11y+11z}{21}} \right) - gz.$$

В приведенных выражениях A_0 , B_0 , C_0 представляют ненулевые коэффициенты, определяемые начальными условиями, а p_0 – аддитивную постоянную давления.

Данные выражения представляют точные решения 3D уравнений Навье – Стокса, в чем можно убедиться непосредственной проверкой. Рассматривая эти выражения при $z < 0$, появляется возможность исследовать распределения скоростей и давления на глубине в зависимости от значений параметров A_0 , B_0 , C_0 , Re . В частности, можно дать ответ на важный практический вопрос – на какую величину давление отличается от гидростатического в рассматриваемой точке и в заданный момент времени.

Литература

1. A.V. Koptev // Exact solution of 3D Navier – Stokes equations. Journal of Siberian federal university. Math. and Phys. 13(3). 2020. 306-313.
2. A.V. Koptev // Deep water movement. Navier – Stokes equations and their applications, Nova Science Publishers, New York. 2021. 83-102.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН – СТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА С НАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Корнев Ю.В., Муромцев Д.Н., Валиев Х.Х., Власов А.Н., Карнет Ю.Н.

ФГБУН Институт Прикладной механики Российской академии наук, Москва, Россия
yurikornev@mail.ru

В настоящее время актуальны исследования в области разработки новых типов упрочняющих наполнителей с целью расширения возможности контроля комплекса физико-механических характеристик эластомерных композитов [1-2]. В связи с этим, интерес представляет использование в качестве наполнителя частиц аморфного диоксида кремния, полученных из возобновляемого сырья [3]. В данной работе проводится анализ морфологии частиц и исследуется влияние данного наполнителя на деформационно-прочностные характеристики полученных эластомерных композитов. В качестве матрицы использовался промышленный синтетический бутадиен-стирольный каучук СКС -30 АРК. Основные компоненты композитов: СКС-30 АРК-100 масс. частей, наполнитель — 65 масс. частей (порядка 0,18 по объему). В качестве наполнителя использовался аморфный диоксид кремния из рисовой шелухи, обработанный в мельнице в режиме тонкого измельчения с контролем функциональности поверхности частиц. Эластомерные композиты были изготовлены в ИПРИМ РАН в лабораторном смесителе NaakeRheomix 3000 QS. Исследование структуры поверхности полученных образцов эластомерных композитов проведено на атомно-силовом микроскопе (АСМ) EasyScan (Nanosurf, Швейцария), работавшего в полуконтактном режиме на воздухе при комнатной температуре. Для

получения материальных контрастов исследуемых композитов в АСМ использовалась мода модуляции силы. Обработка АСМ изображений проводилась с использованием программного пакета SPIP (Image Metrology, Дания). Исследования упругопрочностных и упруго-гистерезисных свойств вулканизатов проводились на разрывной машине UTS-10 (UTS, Германия), а так же с помощью измерительного комплекса NanoTest 600 [4].

Результаты обработки АСМ изображений показали, что средние размеры агломератов частиц в составе эластомерных композитов находятся в субмикро- диапазоне. Для исследованных эластомерных композитов наполненных субмикрочастицами установлен эффект упрочнения: существенное увеличение модуля упругости, напряжения при удлинении и прочности в сравнении с аналогичными составами с микрочастицами. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования частиц аморфного диоксида кремния, полученных из возобновляемого сырья, для контроля и совершенствования деформационно-прочностных характеристик эластомерных композитов и применения таких композитов на практике.

Литература

1. Яновский Ю.Г. Наномеханика и прочность композиционных материалов. –М: Изд. ИПРИМ РАН, 2008. 179 с.
2. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Яновский Ю.Г. Влияние размера включений на механические свойства эластомерных композитов // ДАН. 2012. Т. 443. №4. С. 435-437.
3. Vilmin F., Bottero I., Travert A. et al. Reactivity of Bis[3-(triethoxysilyl)propyl]Tetrasulfide (TESPT) Silane Coupling Agent over Hydrated Silica: Operando IR Spectroscopy and Chemometrics Study. // J. Phys. Chem. C. 2014. V. 118 (8). P.4056–4071.
4. Garishin O, Shadrin V, Kornev Yu Mechanical studies of rubber micro and nanocomposites promising for the tire industry. Uniaxial and biaxial tests // Materials Physics and Mechanics. 2019. V. 42, № 4. P. 445-454.

КОНТРОЛЬ ПОГРЕШНОСТИ СМЕШАННОГО МКЭ ДЛЯ ЗАДАЧ ИЗГИБА ПЛАСТИН ПРИ ТОЧНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ КУСОЧНО-ГЛАДКИХ ГРАНИЦ

Корнеев В.Г.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
vad.korneev2011@yandex.ru

Смешанный МКЭ (метод конечных элементов) в формулировке Сиарле-Равьяра [1] широко применяется для численного решения задач изгиба тонких пластин. В докладе рассматриваются двусторонние апостериорные оценки погрешности этого метода при решении модельной задачи, описываемой уравнением $\Delta \Delta u + \sigma u = f(x)$, $x \in \Omega$, с первым краевым условием на границе $\partial\Omega$ и поэлементно постоянной $\sigma \geq 0$. Рядом авторов методом невязки были получены точные вычисляемые апостериорные оценки погрешности при несколько ограничительных условиях полигональности области, $\sigma \equiv 0$ и степени ≤ 3 треугольных полиномиальных конечных элементов, см. [2]. Например, аппроксимация в численном методе криволинейной границы $\partial\Omega$ полигональной границей ставит под сомнение целесообразность применения конечных элементов повышенных порядков точности.

В докладе все упомянутые условия снимаются. Граница области предполагается кусочно-гладкой, и рассматриваются МКЭ с точным представлением такой границы. Последнее достигается путем применения вблизи границы криволинейных конечных элементов Лагранжа, предложенных в [3]. Оценки типа доказываемых в докладе называют иногда апостериорными функциональными мажорантами ошибки. Они представляются более гибкими и приспособленными для реализации в адаптивных алгоритмах. В них существенную роль играют тестирующие функции, например, прогибов, которые являются функциями вспомогательного конечно-элементного пространства класса $C1$. Их получают по найденным методом Сиарле-Равьяра прогибам посредством процедур, называемых процедурами восстановления. Выбор вспомогательного конечно-элементного пространства, как правило более сложного по сравнению с пространством $C0$ -МКЭ вычислительной схемы, в значительной степени определяет сложность процедуры восстановления и апостериорной оценки в целом. В отличие от [2], где это пространство строилось на основе составного конечного элемента Сие-Клафа-Точера третьего порядка [1], в докладе используется конечный элемент Зенкевича [4] также третьего порядка, криволинейный аналог которого был получен в [5]. Координатные функции этого конечного элемента в случае треугольника с прямыми сторонами являются дробно-рациональными функциями.

Робастность и точность оценок подтверждаются нижними оценками локальной эффективности.

Литература

1. Ph. Ciarlet // The finite element method for elliptic problems, North-Holland, Amsterdam, 1978.
2. T. Gudi // Residual-based a posteriori error estimator for the mixed finite element approximation of biharmonic equation, Numer. Meth. Part. Different. Eq., 27 2011, 315-328
3. Корнеев В.Г. // О построении вариационно-разностных схем высокого порядка точности, Вестник Ленинградского Университета, 25:19 1970, 28--40.
4. O.C. Zienkiewicz // Finite element method in engineering science, MacGraw Hill, London, 1
5. В.Г. Корнеев К.А. Хусанов // Криволинейные конечные элементы класса S^1 с сингулярными координатными функциями, Дифф. Уравнения, 22:12 1986, 2144-2157

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ

Коробенков М.В.

Балтийский Федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия
korobenkovmv@gmail.com

Современные подходы к созданию керамических композитов аддитивным способом находят все большее применение во многих областях современного материаловедения. Композиты с керамической матрицей, состоящие из одного или нескольких армирующих элементов, таких как волокна, усы, углеродные нанотрубки (УНТ), графен, частицы и вторые полимеры или металлическая фаза в керамической матрице [1], обладают превосходной прочностью и износостойкостью, хорошей вязкостью разрушения, высокотемпературной стабильностью и превосходной термостойкостью. Одним из наиболее известных и активно изучаемых классов функциональных керамических композитов с трансформационным упрочнением являются композиты на основе систем оксида алюминия и диоксида циркония, относятся к классу функциональных материалов, характеризующихся не только прочностными свойствами, но и химической и термической стабильностью. Они используются не только в машиностроении в качестве конструкционных материалов для изготовления режущего инструмента и изнашиваемых деталей, но и в медицине (особенно в ортопедических протезах). Уникальные механические и физические свойства таких композитов делают этот класс материалов крайне необходимым для применения в аэрокосмической и оборонной промышленности, автомобилестроении и энергетике, электронике и электротехнике и химической и биомедицинской промышленности [2].

Целью данной работы явилась разработка подхода прогнозирования динамических свойств композиционных керамических материалов с трансформационно-упрочненной матрицей с позиций вычислительной мезомеханики. Такой подход даст возможность создавать интеллектуальные керамические композиты с использованием аддитивных технологий, работающих в широком диапазоне скоростей нагружения.

Для прогнозирования механического поведения керамических композитов с трансформационно-упрочненной матрицей при интенсивных динамических воздействиях в данном исследовании использован подход вычислительной механики материалов. Численное моделирование в Лагранжевых координатах с использованием явных схем интегрирования является широко используемым инструментом для изучения особенностей динамического механического поведения материалов, включая динамику разрушения. Моделирование проводилось в трехмерной постановке в условиях высокоскоростного нагружения ударными волнами со скоростями нагружения до 1200 м/с.

Результаты моделирования показывают, что нелинейные эффекты механического поведения проявляются при скоростях нагружения близких или превышающих предел упругости Гюгонио. При этом увеличение скорости нагружения приводит к интенсивному зарождению микротрещин, постепенно развивающимися вначале как в объеме армирующих включений, так и в объеме матрицы. При этом значительная часть энергии расходуется на фазовые переходы, что приводит к эффекту упрочнения таких композитов. Формирование фронтов накопления повреждений и разрушения конденсированной фазы рассматривается на мезоскопическом уровне с позиции удельной работы разрушения, связанной с самоорганизацией структурных фрагментов за фронтом волны разрежения и возникновением мартенситных фазовых превращений в объеме матрицы. При этом упрочняющие частицы приводят к изменению формы

локальных повреждений, форма и размер которых особо не изменяется с увеличением гидростатического сжатия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00983.

Литература

1. Binner J. et al. Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review //International Materials Reviews. – 2020. – Т. 65. – №. 7. – С. 389-444. DOI: 10.1080/09506608.2019.1652006
2. Pietrzykowska E. et al. Biodegradable ceramic matrix composites made from nanocrystalline hydroxyapatite and silk fibers via crymilling and uniaxial pressing //Materials Letters. – 2021. – Т. 293. – С. 129672.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОМ НАСОСЕ

Косьянчук В.В.^{1,2}

1 - Научно-исследовательский институт механики МГУ, Москва, Россия

2 - Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

vasiliy_ksnk@mail.ru

Турбомолекулярный насос (ТБН), представляющий собой множество последовательно соединенных вращающихся турбин, получил практическое применение относительно давно [1] и активно используется для создания высокого и сверхвысокого вакуума. При этом известно [2], что эффективность насоса сильно зависит от молекулярной массы рабочего газа. Предыдущие работы автора показывают, что при течении разреженной смеси газов в похожих устройствах может наблюдаться эффект разделения смеси [3-5]. В данной работе с использованием метода прямо статистического моделирования Монте Карло [6] исследовано течение разреженного газа через систему быстро вращающихся лопаток (Рис. 1), представляющую собой упрощенную версию турбомолекулярного насоса.

Численное моделирование показало, что работа такого устройства приводит к эффективному разделению, но только тогда, когда турбины ТБН работают в противоточном режиме, т.е. турбины качают газ против внешнего перепада давления. Параметрическое исследование показало, что все параметры работы устройства (частота вращения роторов, наклон и длина лопаток, количество ступеней в аппарате, режим разрежения) одинаково влияют на производительность аппарата: их увеличение приводит к увеличению коэффициента разделения и уменьшению расхода газа, и наоборот. Показано, что эффект разделения наблюдается при конечных числах Кнудсена и малых скоростях вращения роторов, что не характерно для классических ТБН.

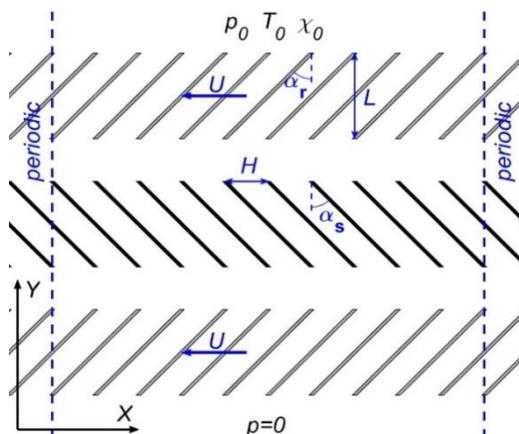


Рис. 1. Постановка задачи

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 23-71-10057).

Литература

1. Becker W. The turbomolecular pump, its design, operation and theory; calculation of the pumping speed for various gases and their dependence on the forepump // Vacuum. 1966. Т. 16. №. 11. С. 625-632.
2. Sharipov F. Numerical simulation of turbomolecular pump over a wide range of gas rarefaction // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2010. Т. 28. №. 6. С. 1312-1315.
3. Kosyanchuk V. Numerical study of microdevice with surface acoustic waves for separation of gas mixtures // Physics of Fluids. 2023. Т. 35. №. 8.
4. Kosyanchuk V. Separation of binary gas mixture in a microchannel with oscillating barriers//Physics of Fluids. 2022. Т. 34. №. 10.
5. Kosyanchuk V., Pozhalostin V. Non-stationary rarefied gas flow in a plane channel with a series of oscillating barriers // European Journal of Mechanics-B/Fluids. 2022. Т. 92. С. 90-99.
6. Берд Г. Молекулярная газовая динамика / Пер. с англ. под ред. ОМ Белоцерковского и МН Когана. – 1981.

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИИ АРМИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ ВЫТЕСНЯЮЩИХ СОСТАВОВ НА КАЧЕСТВО НЕФТЕИЗВЛЕЧЕНИЯ

Кравченко М.Н.^{1,2}, Сафиева Р.З.¹, Ларченко В.П.¹

*1 - Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,
Москва, Россия*

*2 - Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
kravchenko.m@gubkin.ru*

Создание проектов разработки месторождений трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) углеводородов, к которым относят низкопроницаемые коллектора тяжелых высоковязких нефтей, газогидратные месторождения, керогеносодержащие пласты, осложняется отсутствием программных средств моделирования ввиду заточенности имеющихся пластовых симуляторов на традиционные технологии, применяемые на месторождениях, не относящихся к ТРИЗ. При этом опытно-промысловые площадки показывают низкую эффективность традиционных подходов разработки для залежей ТРИЗ, а математические модели, заложенные в основу проектов, как правило, не учитывают, существенные особенности разработки нетрадиционных ресурсов, например, изменение реологических свойств, в том числе, когда вытесняющий агент представляет собой сложный комплексный состав нового поколения.

В последнее время исследователями в области механики и коллоидной химии стали предлагаться технологии, основанные на использовании наноматериалов (наночастиц, наночапул и нанотрубок). Такие подходы уже признаны эффективными в строительной, пищевой и медицинской отраслях. Различные наноструктуры (размер частиц от 3 до 1000 нм) позволяют существенно изменять тепловые и прочностные свойства материалов, выступать основой ингибиторов и катализаторов физико-химических процессов, а инкапсулирование различных материалов (в том числе фазово-переходных) представляет действенный инструмент управления реакциями и процессами фазовых переходов. Такой прием позволяет организовать пролонгированное поступление химического агента в удаленную от скважины зону реакции, снижая его быстрое расходование и обеспечивая постепенность разогрева пласта при термо-газохимическом воздействии. Применение нанотрубок в вытесняющих составах дает возможность адаптировать традиционные методы полимерного заводнения к условиям разработки низкопроницаемых коллекторов тяжелых нефтей, за счет чего можно существенно увеличить вязкость вытесняющих агентов, одновременно снизив их деструкцию, тем самым увеличивая нефтеизвлечение. Авторами ведутся исследования в плане как создания математических моделей с учетом молекулярной структуры «армированных» нанотрубками вытесняющих составов, так и использования методов доставки активных агентов в инкапсулированном виде. Модель включает гидродинамическую и перколяционную часть [1]. Первая часть базируется на уравнениях механики многофазных континуумов с учетом изменяющейся реологии фаз и нелинейности законов фильтрации при использовании сложных комплексных составов, например, при организации процессов вытеснения, иницирования химических реакций (или фазовых переходов) непосредственно в пласте. Вторая часть модели учитывает неравномерность структуры самого порового пространства (в том числе, распределения пор по размерам) и его изменения при взаимодействии активных составов, содержащих наноструктурные компоненты, с минеральной матрицей. В свою очередь, нанообъекты характеризуются своими вероятностными характеристиками в зависимости от размеров частиц.

Численные исследования характеристик вытеснения высоковязкой нефти различными комплексными

составами, в том числе, «армированными» нанотрубками, проведены на основе оригинальной математической модели и собственного численного кода (написанного на языке Python) с использованием в качестве замыкающих соотношений результатов реальных лабораторных исследований [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-77-10081.

Литература

1. М. Н. Кравченко, Р. З. Сафиева, Д. А. Аминев // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов– Санкт-Петербург. 2023. Т.2. 1140-1142.
2. А. О. Макарова, Ю. Ф. Зуев, О. С. Зуева и др. //Патент № 2793821 С1 Российская Федерация, МПК E21B 43/22, E21B 33/138, C09K 8/588. № 2021136263 .2023

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ROM В ОБЛАСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

Кравчинский С.А., Новокшенов А.Д.

Политехнический Университет, Санкт-Петербург, Россия
kravchinskij_sa@spbstu.ru

В настоящей статье освещаются современные методы снижения вычислительной сложности задач механики. Одним из ключевых подходов является использование редуцированных моделей (ROM), которые позволяют уменьшить размерность исходной модели, сохраняя при этом ее ключевые характеристики. В частности, ROM откидывают часть информации о полной модели, что позволяет значительно сократить время вычислений.

В рамках исследования рассматриваются три метода построения ROM для двумерной тепловой задачи: Proper Orthogonal Decomposition (POD), метод сбалансированного усечения (balanced truncation) и метод сопоставления моментов (moment matching). Проводится сравнительный анализ этих методов по двум основным параметрам: времени, необходимому для обучения моделей, и точности, достигаемой с помощью полученных ROM. Результаты исследования позволяют оценить эффективность и применимость каждого из рассматриваемых методов в практических вычислительных задачах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Крайнов А.Ю.

Томский государственный университет, Россия
akrainov@ftf.tsu.ru

Ставится задача на основе сопряженной модели горения смесового твердого топлива (СТТ) исследовать нестационарное горение при изменении давления в камере сгорания модельной твердотопливной регулируемой установки (ТРДУ) с учетом обратного влияния изменения скорости горения на давление в камере сгорания. Провести моделирование регулирования тяги двигателя за счет изменения площади критического сечения сопла (ПКС) по заданному закону во времени. Для моделирования используется модель, представленная в [1]. Для расчета параметров состояния продуктов сгорания в камере сгорания используется термодинамический подход, в котором не учитывается распределение параметров состояния продуктов сгорания по объему камеры сгорания, как в [1]. Циклограмма изменения ПКС задавалась в виде ступенчатой функции.

Результаты расчетов представлены на рис. 1, где черными линиями представлены результаты расчета по нестационарной модели горения СТТ, серыми линиями расчеты по термодинамической модели с использованием эмпирического закона скорости горения СТТ.

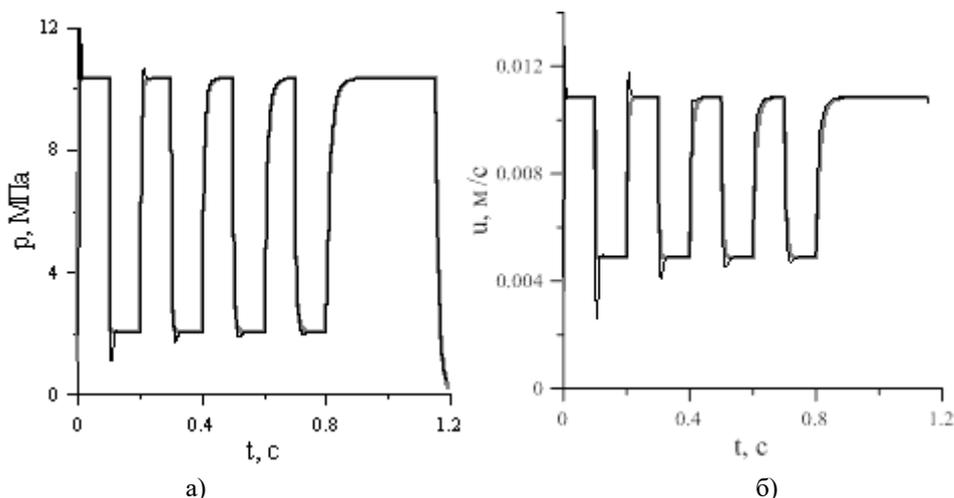


Рис. 1. Зависимость давления (а), скорости горения (б) от времени при изменении величины ПКС.

Получено, что при резком уменьшении давления скорость горения уменьшается до величины, меньшей чем квазистационарное при соответствующем давлении, уменьшение скорости горения приводит к уменьшению давления в камере сгорания ниже рассчитанного по квазистационарной скорости. При малых величинах характерного времени релаксации камеры сгорания резкое уменьшение давления в камере сгорания может привести к погасанию горения заряда. При резком увеличении давления скорость горения увеличивается выше квазистационарного значения, что приводит к увеличению давления в камере сгорания выше рассчитанного по квазистационарной скорости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 24-21-00071.

Литература

1. А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, В. А. Порязов // Численное моделирование нестационарного горения высокоэнергетического материала в закрытом объеме на основе сопряженной модели горения, Химическая физика и мезоскопия, 25:3 2023. 310–320

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПОЕЗДОВ В ХОЛОДНОЕ ВРЕМЯ ГОДА В СЕВЕРОМУЙСКОМ ТОННЕЛЕ

Оберемок А.А., Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л.

Томский государственный университет, Россия
akrainov@ftf.tsu.ru

Северомуйский железнодорожный тоннель Байкало-Амурской железной дороги длиной 16000 м находится в местности с суровыми климатическими условиями. В холодный период года температура атмосферного воздуха опускается до минус 43°C. Поэтому исследования тепловентиляционного и температурного режима подземного комплекса является актуальной задачей для обоснования увеличения пропускной способности тоннеля.

Цель проводимых исследований является получение зависимостей теплопотерь в тоннеле в холодный период года при движении поездов по заданному графику для обоснования требований к тепловентиляционному и отопительному оборудованию.

В железнодорожных тоннелях, сооружаемых в суровых климатических условиях, допускается сооружать вентиляционные ворота или другие устройства для ограничения поступления наружного воздуха. Средняя по сечению скорость движения воздуха в транспортной зоне тоннеля при эксплуатационных режимах без учета влияния транспортных средств должна быть не выше 6 м/с, в зоне воздуховыпускных сооружений местное увеличение скорости не регламентируется. Тепловое состояние воздушной атмосферы тоннеля не должно допускать образования наледей на стенках тоннеля и образования тумана. При проведении в тоннеле ремонтных и других работ концентрация вредных веществ в воздухе тоннеля и в обслуживаемых зонах не должна превышать предельно допустимых концентраций, установленных ГОСТ 12.1.0. Категория железнодорожной линии – особогрузонапряженная с учетом перспективы увеличения объема перевозок.

Количество путей — 1 путь. Вид тяги: электровозная. Режим движения – пакетный: два состава с интервалом 5 мин, три состава с интервалом 5 мин. Скорость движения грузового поезда 60-40 км/ч.

Для достижения поставленной цели проводились два вида математического моделирования. Первое - с использованием методов вычислительной аэродинамики, основанных на численном решении дифференциальных уравнений Навье-Стокса, с учетом теплообмена и теплопереноса. Исследования по этой модели проводились путем серий вычислительных экспериментов в программной среде Ansys Fluent. В результате исследований были получены зависимости аэродинамических параметров поршневого действия поездов в протяженных железнодорожных тоннелях и зависимости динамики распределения теплотерь по длине тоннеля в холодный период года при движении по тоннелю холодного поезда. Второе – с использованием подходов технической физики проведено моделирование изменения температуры воздуха в тоннеле при прохождении в нем холодного поезда.

С использованием подходов технической физики и термодинамики определена скорость нагрева стенок вагонов за время их движения в тоннеле, изменение температуры воздуха в тоннеле при прохождении поезда в тоннеле и пакета из 2-х и 3-х поездов, проведены оценки изменения температуры стенок тоннеля при прохождении поезда в тоннеле, определены скорость теплотерь на обогрев стенок поезда при прохождении поезда в тоннеле, теплотери при затягивании холодного атмосферного воздуха при въезде поезда в тоннель и выезде из тоннеля.

Получены зависимости изменения температуры воздуха от времени в поперечных сечениях тоннеля, расположенных на расстоянии 1500 метров друг от друга.

На основании проведенных расчетов определены требования к аэродинамическим параметрам тепловентиляционных установок для компенсации теплотерь в холодный период года.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

ДИСКРЕТНАЯ ДИСКЛИНАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАЛЫХ ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

**Красницкий С.А.¹, Смирнов А.М.¹, Колесникова А.Л.², Гуткин М.Ю.^{1,2,3},
Романов А.Е.^{1,4,5}**

1 - Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

2 - ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

3 - СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

4 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

5 - ТГУ, Тольятти, Россия

krasnitsky@inbox.ru

Интерес к пятиугольным кристаллам, спровоцированный теоретическими работами Пола Стейнхардта [1], возрос после открытия Дэном Шехтманом квазикристаллов в середине 1980-х годов [2], за что он был удостоен Нобелевской премии по химии в 2011 году. Отличаясь от квазикристаллов типом атомного упорядочения, малые икосаэдрические частицы (МИЧ) имеют сходство с первыми – габитус с пятикратной симметрией [3]. В работах [4,5] было предположено, что МИЧ состоит из двадцати кристаллических доменов с ГЦК структурой, соединенных между собой когерентными двойниковыми границами. Такое многократное циклическое двойникование вызывает неоднородную упругую деформацию внутри частицы, которую можно описать в рамках дисклинационного подхода [6,7]. Структурные особенности МИЧ во многом определяют их уникальные функциональные свойства. В частности, именно с наличием двойниковых границ и остаточных деформаций связана более высокая химическая активность МИЧ [8]. Кроме того, специфическая пятиугольная форма частиц способствует увеличению интенсивности пиков плазмонного резонанса, а также может приводить к их расщеплению [9].

В работе [10] была разработана дискретная дисклинационная модель МИЧ, численно определена упругая энергия таких частиц. Согласно этой модели, энергия частицы определяется как суперпозиция энергий шести взаимодействующих клиновых дисклинаций, каждая из которых соединяет противоположные вершины икосаэдра. В данной работе найдено аналитическое выражение для определения упругой энергии МИЧ в рамках дискретной дисклинационной модели. Аналитическое решение получено в приближении изотропной упругости для тела сферической формы. Кроме того, в рамках исследования также рассмотрена модель распределенной

дисклинации, известная как модель Маркса-Иоффе, используемая для расчета запасенной энергии в МИЧ. На основе предложенных моделей исследовано влияние коэффициента Пуассона на запасенную энергию МИЧ. Показано, что при любых положительных значениях коэффициента Пуассона запасенная энергия, рассчитанная в рамках дискретной дисклинационной модели, демонстрирует большие значения, чем энергия, рассчитанная в рамках модели распределенной дисклинации. Различия тем сильнее, чем меньше значение коэффициента Пуассона.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-72-10014.

Литература

1. D. Levine, P. J. Steinhardt // Quasicrystals: a new class of ordered structures, *Physical Review Letters*. 53:26 1984. 2477–2480.
2. D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J.W. Cahn // Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry, *Physical Review Letters*. 53:20 1984. 1951–1963.
3. W. Steurer // Twenty years of structure research on quasicrystals. Part I. Pentagonal, octagonal, decagonal and dodecagonal quasicrystals. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*. 219:7 2004. 391–446.
4. J.M. Galligan // Fivefold symmetry and disclinations. *Scripta Metallurgica*. 6:2 1972. 161–163.
5. V.G. Gryaznov, J. Heydenreich, A.M. Kaprelov, S.A. Nepijko, A.E. Romanov, J. Urban // Pentagonal Symmetry and Disclinations in Small Particles. *Crystal Research and Technology*. 34:9 1999. 1091–1119.
6. L.D. Marks, D.J. Smith // High resolution studies of small particles of gold and silver. *Journal of Crystal Growth*. 54:3 1981. 425–32.
7. A.E. Romanov, A.L. Kolesnikova // Elasticity boundary-value problems for straight wedge disclinations. A review on methodologies. 3:1 2021. 55–95.
8. G. Ji, A. Ji, N. Lu, Z. Cao // Formation and morphology evolution of icosahedral and decahedral silver crystallites from vapor deposition in view of symmetry misfit. *Journal of Crystal Growth*. 518 2019. 89–94.
9. M. Sharma, P.R. Pudasaini, F. Ruiz-Zepeda, E. Vinogradova, A.A. Ayon // Plasmonic effects of Au/Ag bimetallic multispike nanoparticles for photovoltaic applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 6:17 2014. 15472–15479.
10. A.L. Kolesnikova, M.V. Dorogov, S.A. Krasnitckii, A.M. Smirnov, A.E. Romanov // Disclination models in the analysis of stored energy in icosahedral small particles, *Materials Physics and Mechanics*. 51:6 2023. 76–83.

ДВИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ВОЗМУЩЕНИЯ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Кривцова А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
aaakrivtsova11@gmail.com

Многие явления природы сопровождаются процессами волнового переноса энергии. Для их описания ученые используют различные методы, специфика которых зависит от конкретных областей физики и механики, где они применяются. В настоящей работе предлагается рассмотреть общую постановку задачи о распространении локализованного возмущения в двумерной линейно-неоднородной среде. Ход решения строится с использованием методов энергетической динамики, что дает возможность свести задачу о движении возмущения к задаче о движении его энергетического центра. Такой подход позволяет обобщить фундаментальные законы механики (второй закон Ньютона, законы баланса) на волновые процессы, получить закон динамики для энергетического центра и построить траекторию движения.

В рамках доклада обсуждаются способы и допустимость применения полученной модели в таких прикладных задачах, как движение волн на мелкой воде, оптика и сейсморазведка; показывается, как дать наглядное представление рассматриваемому процессу, применяя к нему терминологию, принятую в классической механике. Обсуждается полученная траектория движения энергетического центра возмущения, имеющая вид циклоиды; делаются замечания о том, как такая форма может быть связана с особенностями распространения возмущения в линейно-неоднородной среде. Приведенные результаты для энергетического центра возмущения сравниваются с численным моделированием волнового пакета.

КОМПОЗИТ ГРАФЕН/НИ, КАК УПРОЧНЯЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НИ

Крылова К.А., Сафина Л.Р., Баимова Ю.А.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия
bukreevakarina@gmail.com

Графеновые композиты обладают превосходными механическими, физическими и трибологическими характеристиками и могут использоваться для укрепления металлических поверхностей в качестве защитного нанопокрывтия важных деталей аэрокосмической и других отраслей.

В данном исследовании композитное нанопокрывтие графен/Ни применяется для улучшения механических свойств поверхности монокристалла Ni. Методом молекулярно-динамического моделирования с использованием программы LAMMPS проводится анализ механических свойств и микроструктуры монокристалла Ni с разной толщиной композитного нанопокрывтия (1,0; 1,5; 1,8; 2,4; 3,5 и 5,1 нм). Покрытия представляют собой графеновую сетку, заполненную наночастицами Ni. Оно получено методом высокотемпературного гидростатического сжатия. Данный метод предложен в наших ранних работах [1,2]. Пример исходной структуры Ni с композитным графен/Ни покрытием показан на рис. 1а.

Установлено, что с увеличением толщины композитного нанопокрывтия предел прочности растет, а пластичность снижается (рис. 1б). Механизмы упрочнения монокристалла Ni с разной толщиной покрытия не зависят от его толщины. Прочность поверхности Ni с композитным покрытием определяется прочностью нанопокрывтия и дислокационным упрочнением Ni. В то время как пластичность в основном зависит от текучести Ni, особенно при толщине нанопокрывтия менее 2 нм. Микроструктурный анализ показывает, что упрочнение Ni контролируется зарождением дислокаций на начальных этапах деформации. На границе раздела монокристалла Ni и композитного покрытия образуются первые петли частичных дислокаций Шокли. Скольжение дислокаций под воздействием растягивающей напряженной вызывает образование собственных дефектов упаковки, внешних дефектов упаковки и двойников деформации. Разрушение Ni с композитным покрытием при одноосном растяжении начинается с разрушения композитного покрытия.

Полученные результаты показали, что композитное нанопокрывтие графен/Ни является перспективным материалом для укрепления и защиты металлических поверхностей. Регулируя толщину нанопокрывтия, можно получить материал с требуемыми показателями прочности и пластичности.

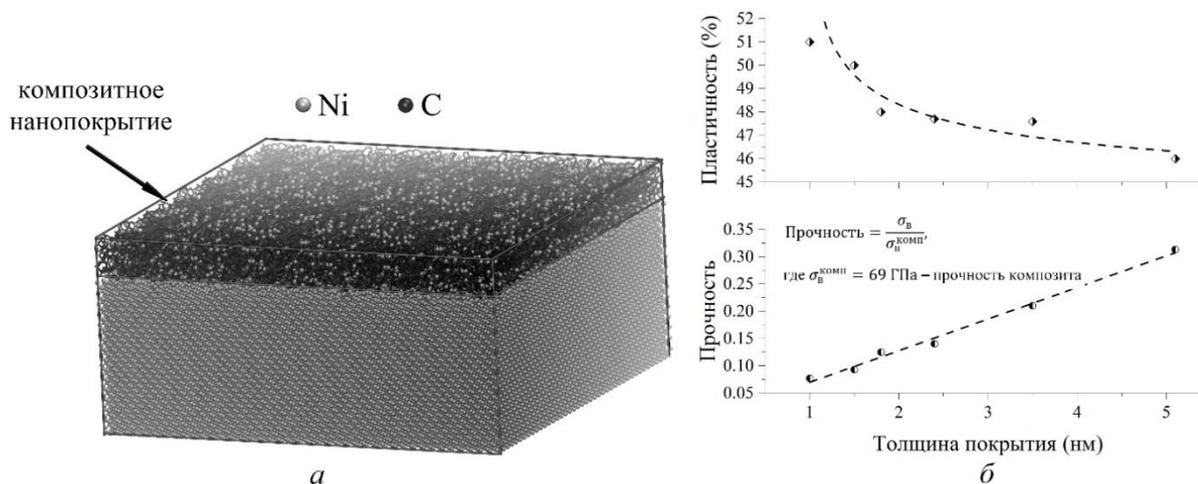


Рис. 1. (а) Начальная структура Ni с композитным графен/Ни покрытием толщиной 1,5 нм. (б) Кривые прочности и пластичности Ni в зависимости от толщины композитного покрытия

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-72-10112-П.

Литература

1. L.R. Safina, J.A. Baimova, K.A. Krylova // Materials Today Physics, 28 2022. 100851
2. K.A. Krylova, J.A. Baimova, R.R. Mulyukov // Letters on Materials, 9:1 2019. 81-85

УПРАВЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОСТЬЮ АЭРОЗОЛЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Кудряшова О.Б.¹, Шалунов А.В.², Абрамов А.Д.²

1 - Томский государственный университет, Томск, Россия

2 - Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. Ползунова, Бийск, Россия
olgakudr@inbox.ru

Распыление аэрозолей является важным технологическим этапом во многих практических приложениях. При этом дисперсность и концентрация частиц являются основными характеристиками аэрозолей, обуславливающими эффективность реализации технологических процессов. Размеры частиц и их концентрация не только определяются способом распыления, но и меняются в течение времени из-за коагуляции, испарения, осаждения частиц. Между тем, технологические требования могут включать поддержание определенных дисперсных и концентрационных характеристик в течение заданного времени, либо быстрое осаждение частиц. Поэтому актуальной является задача разработки методов управления этими характеристиками. Авторы предлагают перспективный способ управления размерами частиц в помощью ультразвукового воздействия. В работе теоретически исследуется такой способ. Задавая интенсивность и частоту воздействия, можно добиться как укрупнения частиц за счет коагуляции, так и дробления капель. Укрупненные капли будут быстро осаждаться за счет гравитации, а раздробленные мелкие капли будут долго оставаться в воздухе, либо быстро испаряться в зависимости от физико-химических свойств распыленного вещества. Быстрое осаждение, быстрое испарение или долгое присутствие в воздухе отвечает отдельным специальным технологическим задачам. В работе предлагается математическая модель, описывающая коагуляцию и дробление аэрозольных капель в ультразвуковом поле. Определены основные закономерности протекающих процессов. Параметрическое исследование модели позволило выявить наиболее значимые характеристики ультразвукового воздействия для управления размерами капель. Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для разработки и совершенствования ультразвуковых систем управления дисперсностью аэрозолей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875/>.

ПЕРЕХОД ОТ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА К ДИФфуЗИОННОМУ В ЦЕПОЧКЕ С РАЗРЫВАМИ СВЯЗЕЙ

Кузькин В.А.^{1,2}, Кривцов А.М.^{1,2}, Цаплин В.А.^{1,2}

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*
kuzkinva@gmail.com

С использованием двух моделей изучается переход от баллистического теплопереноса к диффузионному. Первая модель представляет собой одномерную гармоническую цепочку, в которой связи разрываются, если деформация превышает критическое значение, и восстанавливаются, если деформация падает ниже этого значения. Предлагается кинетическое описание теплопереноса в данной цепочке с использованием второй модели - газа из невзаимодействующих квазичастиц, отражающегося от случайно возникающих барьеров. Движение квазичастиц моделирует перенос тепла (энергии) в цепочке, в то время как барьеры имитируют разрывы связей. Для газа выводится и аналитически решается кинетическое уравнение. Решение демонстрирует переход от баллистического режима на малых временах к диффузионному режиму на больших временах. Показано, что в диффузионном пределе расстояние, проходимое теплом, как и в случае классической диффузии, пропорционально корню из времени. Однако форма фундаментального решения для температуры отличается от кривой Гаусса, и поэтому закон Фурье не выполняется. Рассмотрены два примера, демонстрирующие, что представленная кинетическая модель находится в хорошем качественном согласии с результатами численного решения уравнений динамики цепочки. Представленные результаты показывают, что разрывы связей являются важным механизмом, лежащим в основе перехода от баллистического режима теплопереноса к диффузионному в одномерных системах.

ГЕНЕРАТОР G-КОДА ДЛЯ 3D-БИОПЕЧАТИ ГИДРОГЕЛЕВЫХ СКАФФОЛДОВ МЕТОДОМ FDM

Егоров Д.К., Кузьмин А.А., Вилински-Мазур К.А., Кириллов Б.А., Коломенский Д.С.

Сколковский институт науки и технологий, Россия
kuzminface@gmail.com

В настоящей работе представлен подход к созданию генератора G-кода для 3D-биопечати гидрогелевых скаффолдов методом FDM. Гидрогели широко используются в биомедицинских приложениях, особенно в тканевой инженерии, благодаря свойству биосовместимости. Скаффолды – это сетчатые матрицы, которые служат основой для роста клеточных структур во время инкубации. Гидрогелевый скаффолд выполняет функцию питательной среды для клеток и поддерживает форму тканей инкубируемого объекта. Скаффолды имеют сетчатую структуру для доступа кислорода ко всем засеянным в них клеткам.

В нашем докладе будет представлена математическая модель и её программная реализация для преобразования моделей для печати в сетчатые скаффолды с сохранением первоначальной внешней формы модели. В результате преобразований STL-модели по заданным в программе параметрам внутренней сетки и толщины слоя, программа возвращает G-код (код для программирования 3D-принтера) для печати объекта на 3D-биопринтере.

Разработанный генератор G-кода позволяет разбивать заданный STL файл на слои вдоль выбранного направления, обеспечивая последовательную печать каждого слоя. Его особенность заключается в возможности создания различных типов пространственных решеток для генерации каркасов с разной пористостью. Это дает возможность регулировать количество вещества, которым заполняется скаффолд, что оказывает прямое влияние на его свойства и способность поддерживать живые клетки. Также предлагаемый генератор G-кода позволяет менять ориентацию пространственной решетки каркаса и, тем самым, задавать требуемые упругие модули вдоль различных направлений. Это открывает новые перспективы для тканевой инженерии, позволяя создавать скаффолды с оптимальными свойствами для специфических биомедицинских приложений.

На рисунке 1 мы видим размеченные части печатаемого объекта. Зеленые окружности обозначают вертикальные цилиндры, которые печатаются по частям каждый n -й слой поверх красной сетки, толщина которой 1 слой или h (толщина экструзии). Тогда высота составных цилиндров (или высота ячейки скаффолда) равна $n \cdot h$, что является одним из задаваемых параметров в программе. Синий и зеленый контуры печатаются каждый слой, возможна также печать без них. Пример скаффолда, сгенерированного программой, можно увидеть на рисунке 2. На рисунке изображена нижняя половина модели для демонстрации сгенерированного сетчатого заполнения на поперечном разрезе.

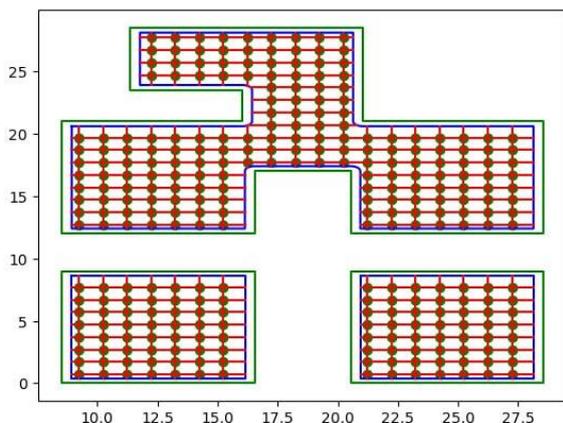


Рисунок 1. Схема послойной 3D-биопечати

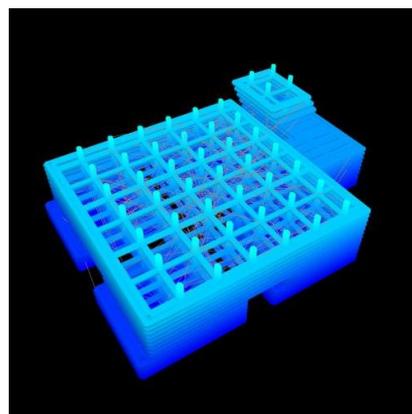


Рисунок 2. Модель скаффолда в поперечном разрезе

МИКРОМЕХАНИКА ГЕТЕРОСТРУКТУР И УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ: НАНОМАСШТАБНЫЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КАРБИД КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ И ЕГО УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА. ОТ ТЕОРИИ ДО ПРОИЗВОДСТВА

Кукушкин С.А., Осипов А.В.

Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), Санкт-Петербург, Россия
sergey.a.kukushkin@gmail.com

В докладе излагаются основные принципы нового метода роста эпитаксиальных пленок SiC на Si, основанного на согласованном замещении части атомов кремния в кристаллической решетке Si на атомы углерода [1-4]. На основе основных положений механики деформируемого твердого тела теоретически предложен и экспериментально реализован принципиально новый метод управляемого синтеза с заданными свойствами и структурой монокристаллических, низкодефектных полупроводниковых пленок на подложках при большом рассогласовании параметров решетки пленки и подложки. Метод основан на открытии нового механизма релаксации упругих механических напряжений при росте эпитаксиальных пленок за счет предварительного внедрения в решетку подложки ансамбля нанообъектов—дилатационных диполей — устойчивых комплексов, состоящих из притягивающихся центров дилатации — атома углерода в межузельной позиции кремния и кремниевой вакансии. По сути дела, впервые в мировой практике реализован метод согласованной замены атомов одного сорта другими прямо внутри исходного кристалла без разрушения его кристаллической структуры. Метод напоминает “генетический синтез” белковых структур в биологии. Метод позволяет решить одну из основных проблем гетероэпитаксии, а именно, осуществить синтез низкодефектных, ненапряженных эпитаксиальных пленок при большом различии между параметрами решетки пленки и подложки [1-4]. Качество структуры слоев, полученных данным методом, значительно превосходит качество пленок карбида кремния, выращенных на кремниевых подложках ведущими мировыми компаниями. Открытие данного метода позволяет прямо на кремниевой подложке синтезировать широкий спектр широкозонных материалов, что открывает беспрецедентные условия для создания нового типа приборов [5]. Приведено сравнение нового метода роста с классическими методами роста тонких пленок. Изложен термодинамический и кинетический анализ процесса замещения атомов в твердой фазе [1-6]. На примере химического взаимодействия газообразного монооксида углерода (CO) с монокристаллической матрицей кремния (Si) вскрыт механизм протекания широкого класса гетерогенных химических реакций между газовой фазой и твердым телом и построена теория фазовых переходов первого рода в системах, где прямое образование зародышей новой фазы по каким-либо причинам затруднено, например, из-за огромной упругой энергии [1-3]. Показано, что в этом случае фазовый переход осуществляется через определенное промежуточное состояние, сильно облегчающее образование зародышей новой фазы. Для фазового перехода кремний – карбид кремния (SiC) таким промежуточным состоянием является «пред-карбидное» состояние кремния, насыщенное дилатационными диполями, т.е. парами атом углерода – кремниевая вакансия, сильно притягивающимися друг к другу [1-3]. Теоретически описан новый вид фазовых переходов, при которых одна из фаз стимулирует появление другой фазы. В данном, конкретном случае, образование зародыша SiC стимулирует зарождение усадочных пор [1]. Зарождение усадочных пор связано с изменением плотности первоначальной твердой фазы кремния в процессе химической обработки газом CO и последующим ее химическим превращением в карбид кремния. Вычислена работа образования и все основные термодинамические и кинетические характеристики двухфазных фазовых переходов с учетом протекающих химических реакций. Вычислена критическая толщина слоя кремния с дилатационными диполями, начиная с которой происходит процесс необратимого превращения слоя кремния в слой карбида кремния. Получено уравнение, описывающее одновременную нуклеацию двух связанных фаз. Это уравнение существенно обобщает известное уравнение Зельдовича в кинетике фазовых переходов первого рода [1]. Оно может быть использована для объяснения и описания широкого круга задач, связанных с взаимодействием химически активных сред с поверхностью твердых тел, в которых одновременно с химическим превращением происходят фазовые переходы с изменением агрегатного состояния. Показано, что ключевую роль при таких фазовых превращениях играет промежуточное состояние, которое реализуется на одной из стадий химического взаимодействия. В случае превращения кремния в карбид кремния таким промежуточным, метастабильным состоянием является кремний, насыщенный дилатационными диполями. Проведены эксперименты, в которых напрямую (in site) наблюдались процессы фазовых превращений, образования пор и процессы их “залечивания”.

Показано, что на границе раздела SiC/Si при данном методе роста возникает интерфейсный слой с нестандартными оптическими и электрофизическими свойствами [3,6]. Необычные свойства вызваны схлопыванием (усадкой) материала, при котором карбид кремния, как новая фаза, отделяется от кремниевой матрицы. Кремний подвергается аномально сильному механическому сжатию. В результате подобной усадки каждая пятая химическая связь SiC полностью согласуется с каждой четвертой связью Si, остальные связи деформируются. Показано, что давления сжатия, возникающие в тонком приграничном слое толщиной порядка нескольких нанометров, могут достигать величин порядка 200-250 ГПа. Давления подобной величины приводят к образованию особых, ранее неизвестных, свойств границы раздела SiC(111)/Si(111).

Основным отличительным свойством пленок SiC, синтезированных данным методом, является образование в нем избыточной концентрации кремниевых вакансий, в то время как в SiC, выращиваемом по стандартным методикам, присутствуют в основном вакансии углерода. Взаимодействие углеродных атомов и кремниевых вакансий приводит к образованию слоев SiC, упорядоченных ансамблей углеродно-вакансионных структур [2-4,6]. Подобные структуры образуются как вследствие химической реакции замещения, так и вследствие усадки кристаллической ячейки Si при ее превращении в кристаллическую ячейку SiC. Присутствие углеродно-вакансионных структур в SiC приводит к образованию в нем целого ряда новых уникальных оптических, электрических и магнитных свойств. Приводится описание обнаруженного явления фазового перехода носителей заряда в когерентное состояние с одновременным возникновением гигантского значения диамагнетизма порядка $(1/4\pi)$, в слабых магнитных полях, что связывается с возникновением сверхпроводящего состояния [7,8].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ИПМаш РАН. Номер учредителя № FFNF-2021-0001. Регистрационный номер темы: 121112500383-9.

Литература

1. S.A. Kukushkin and A.V. Osipov. Topical Review. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films (Review)// J. of Phys. D: Appl. Phys. 47, 313001-313041 (2014). doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/31/313001>.
2. С. А. Кукушкин, А. В. Осипов. Эпитаксиальный карбид кремния на кремнии. Метод согласованного замещения атомов (Обзор)// Журнал общей химии. Т. 92, № 4, с. 547–577 (2022). doi: <https://doi.org/10.1134/S1070363222040028>.
3. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. Термодинамика, кинетика и технология синтеза эпитаксиальных слоев карбида кремния на кремнии методом согласованного замещения атомов и его уникальные свойства. (Обзор) // Конденсированные среды и межфазные границы. – (2022). Т. 24, вып. 4. – С. 407–458. – DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/10549.
4. Grashchenko A.S., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V. Vacancy growth of monocrystalline SiC from Si by the method of self-consistent substitution of atoms// Catal. Today. (2022); 397–399(8): 375-378. DOI: 10.1016/J.CATTOD.2021.08.012.
5. S. A. Kukushkin, L. K. Markov, A. S. Pavlyuchenko, I. P. Smirnova, A. V. Osipov, A. S. Grashchenko, A. E. Nikolaev, A. V. Sakharov, A. F. Tsatsulnikov, G.V. Sviatets. SiC/Si Hybrid Substrate Synthesized by the Method of Coordinated Substitution of Atoms: A New Type of Substrate for LEDs // Coatings, 2023, Vol. 13, p. 1142. pp.1-17. DOI:10.3390/coatings13071142
6. S.A. Kukushkin, A.V. Osipov. Spin Polarization and Magnetic Moment in Silicon Carbide Grown by the Method of Coordinated Substitution of Atoms // Materials. – 2021. – V. 14, No. 19. – P. 5579. – DOI: 10.3390/ma14195579.
7. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, В.В. Романов, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.С. Хромов. Магнитные свойства тонких эпитаксиальных слоев SiC, выращенных методом самосогласованного замещения атомов на поверхностях монокристаллического кремния // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55, вып. 2. – С. 103–111. – DOI: 10.21883/FTP.2021.02.50493.9538.
8. Н.Т. Баграев, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, В.Л. Уголков. Фазовые переходы в эпитаксиальных слоях карбида кремния, выращенных на кремниевой подложке методом согласованного замещения атомов // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, вып. 7. – С. 715–718. – DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52766.24.

ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА С АНТИКУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Кутуков А.А., Кудряшов Н.А., Нифонтов Д.Р.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
aakutukov@mephi.ru

Рассматривается обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера с антикубической нелинейностью и нелинейностями третьей, пятой и седьмой степеней, описывающее распространение импульсов в нелинейной оптической среде. Изучаемое уравнение не является интегрируемым, поэтому решение ищется в переменных бегущей волны. После приравнивания нулю действительной и мнимой частей уравнения, получается система из двух обыкновенных дифференциальных уравнений. Система приводится к одному нелинейному обыкновенному дифференциальному уравнению после прямых преобразований. Применяется метод неявной функции для построения решения этого уравнения с учётом ограничений на параметры задачи. Законы сохранения для обобщённого нелинейного уравнения Шрёдингера строятся путём применения алгебраических операций к исходному уравнению. Вычисляются сохраняющиеся величины для полученных решений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-41-00070, <https://rscf.ru/project/23-41-00070/>.

ПЕНЛЕВЕ АНАЛИЗ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ИЗ ИЕРАРХИИ КАУПА-НЬЮЭЛЛА В ПЕРЕМЕННЫХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Лаврова С.Ф., Кудряшов Н.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
sflavrova@mephi.ru

Рассматривается второе уравнение в частных производных из иерархии Каупа-Ньюэлла, впервые полученное в работе [1] и имеющее следующий вид:

$$iq_t + iq_{xxx} + 3q_x^2 q^* + 3q|q_x|^2 + 3|q|^2 q_{xx} - 3i|q|^2 q^2 q_x^* - \frac{9i}{2}|q|^4 q_x = 0,$$

где $q(x, t)$ - комплексная функция, x, t - время и координата.

Изучаемое уравнение используется для моделирования множества физических процессов, таких как, например, распространение импульсов в оптическом волокне, распространение волн в плазме или динамика волн в глубоком океане. В ходе выполнения работы исследуемое уравнение в частных производных сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений при помощи перехода к переменным бегущей волны, потому что исходное уравнение допускает операторы сдвига по координате и времени. Для проверки интегрируемости полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений проведен тест Пенлеве. Ищутся локальные разложения решений системы в ряд Пуанкаре на комплексной плоскости в окрестности особой точки. Также находятся точные решения редукции уравнения к переменным бегущей волны в виде периодических и уединенных волн с помощью метода простейших уравнений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-41-00070.

Литература

1. D. J. Kaup, A. C. Newell // An exact solution for a derivative Schrödinger equation, Journal of Mathematical Physics, 19 4 1979, 798-801.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА МАСС ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ ИОННЫМ ПОТОКОМ

Ледков А.С.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия
ledkov@inbox.ru

Проблема космического мусора является одной из наиболее актуальных проблем современной космонавтики. Вышедшие из строя спутники, старые ступени ракет, разгонные блоки и их обломки представляют большую опасность как для функционирующих в данный момент, так и для вновь выводимых космических аппаратов (КА). В настоящее время разрабатываются различные схемы уборки крупногабаритного космического мусора. Одной из таких схем является бесконтактная уборка ионным потоком, генерируемым электрореактивным двигателем КА-уборщика. Предполагается, что КА подлетает на расстояние порядка 10 м к космическому мусору и направляет на него шлейф своего электрореактивного двигателя (ионный поток). Врезаясь в поверхность мусора, частицы потока генерируют силу, которая используется для транспортировки. Для компенсации тяги этого двигателя КА должен быть оснащен еще одним противоположно направленным двигателем (рис. 1). Эта схема уборки была предложена в работе [1]. Поскольку рассматриваемая схема не предполагает прямого механического контакта между КА и космическим мусором, вероятность аварии значительно снижается. Безопасность и возможность уборки быстро вращающихся объектов являются главными достоинствами рассматриваемой схемы уборки космического мусора.

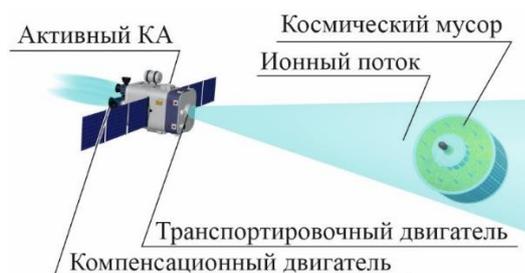


Рис. 1. Схема бесконтактной транспортировки космического мусора ионным потоком.

Величина и направление ионной силы зависят от параметров потока, относительного положения КА, формы космического мусора и его ориентации в потоке. Помимо ионной силы поток создает момент, который стремится повернуть космический мусор относительно центра масс. Для расчета ионной силы и момента используется приближенная методика, основанная на разбиении поверхности космического мусора на треугольники. Целью работы является исследование пространственного движения космического мусора относительно центра масс в процессе его бесконтактной транспортировки ионным потоком. Разработана математическая модель, описывающая пространственное движение механической системы, состоящей из КА и объекта космического мусора, которые рассматриваются как твердые тела. Движение происходит в центральном гравитационном поле Земли. Проведено численное моделирование движения космического мусора относительно центра масс при его ионной транспортировке. Исследовано влияние параметров потока и направления оси ионного двигателя на движение космического мусора цилиндрической формы относительно центра масс. Работа является развитием исследования [2] для случая пространственного движения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-19-00160.

Литература

1. C. Bombardelli, J. Pelaez. Ion beam shepherd for contactless space debris removal // Journal of guidance, control, and dynamics, 34:3 2011 916-920.
2. A.S. Ledkov Effective Space Debris Attitude Motion Modes for Ion-Beam-Assisted Transportation // Journal of Spacecraft and Rockets, 61:1 2024 104-113.

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ОТДЕЛЕНИИ СПУСКАЕМОЙ КАПСУЛЫ ОТ ОКОЛОЛУННОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА ОБЛАСТЬ ЕЁ ПОСАДКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Ледкова Т.А.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия
ta_ledkova@bk.ru

Актуальность исследования динамики и методов управления движением окололунной космической станции обусловлены тем, что во многих проектах освоения Луны и Марса предполагается использование космической станции на окололунной орбите в качестве порта на орбите Луны, который сможет обеспечить жизнеобеспечение длительных экспедиций на поверхности Луны, а также будет служить отправной точкой для исследования глубокого космоса [1].

В зависимости от задачи применения могут рассматриваться различные массово-геометрические конфигурации космических тросовых систем. В данной работе рассматривается движение окололунной тросовой системы, которая включает в себя космическую станцию D и малые космические аппараты (МКА) A и B , прикрепленные к ней с помощью тросов, длиной l_a и l_b , соответственно. Космическая станция представляет собой цилиндр, длина которого l , диаметр d и масса m_d . МКА принимаются за материальные точки массой m_a и m_b , соответственно. В работе исследуется влияние начальных условий отделения спускаемой капсулы троса, соединяющего её и окололунную космическую станцию, на область её посадки на поверхность Луны.

Рассматривается несколько возможных условий для отделения капсулы:

1. В конце процесса развёртывания окололунной тросовой системы без дополнительного задания начальной скорости;
2. Когда КТС полностью развёрнута, а её положение стабилизировано вдоль положения местной вертикали без дополнительного задания начальной скорости;
3. Отделение от полностью развёрнутой и стабилизированной КТС с дополнительным заданием начальной скорости спускаемой капсуле.

Для построения математической модели в работе используются результаты, опубликованные ранее [2].

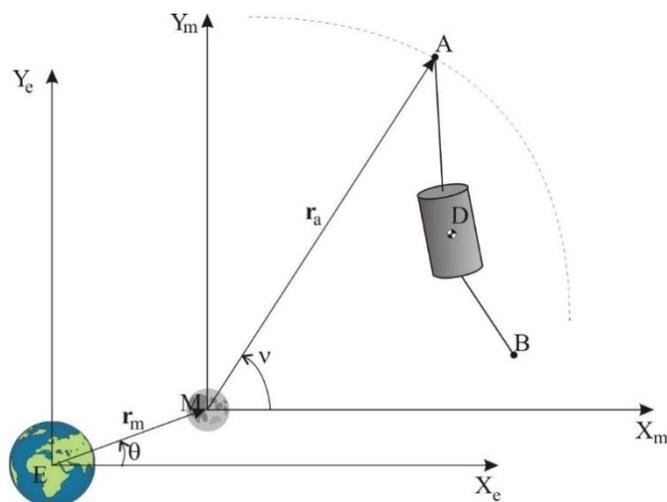


Рис. 1. Механическая система

Литература

1. Gill T. NASA's Lunar Orbital Platform-Gateway [Text]/ T. Gill. – The Space Congress Proceedings, 2018.
2. Заболотнов Ю. М., Ледкова Т. А. Анализ процесса развёртывания окололунной тросовой системы с учётом притяжения Земли //Космические аппараты и технологии. – 2021. – №. 3 (37). – С. 153-159.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ УСЕЧЁННЫХ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ЖИДКОСТЬЮ

Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В., Матвеев В.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия
lekomtsev@icmm.ru

Представлены результаты исследований собственных частот колебаний изотропных круговых усечённых конических оболочек, частично заполненных идеальной сжимаемой жидкостью. Поведение тонкостенной конструкции рассматривается в рамках классической теории оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа – Лява, уравнения которой записываются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно новых неизвестных [1]. Малые колебания жидкости описываются линеаризованными уравнениями Эйлера, которые в акустическом приближении сводятся к волновому уравнению относительно гидродинамического давления. Его преобразование к системе обыкновенных дифференциальных уравнений выполняется методом обобщённых дифференциальных квадратур [2]. Эффекты плескания на свободной поверхности S_{free} (Рис. 1) не учитываются. Решение сформулированной краевой задачи осуществляется методом ортогональной прогонки Годунова [3] с численным интегрированием дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты четвёртого порядка точности. Собственные частоты колебаний вычисляются с помощью пошаговой процедуры с последующим уточнением методом Мюллера. Достоверность получаемых результатов подтверждена сравнением с известными численно-аналитическими решениями и с полуаналитическим вариантом метода конечных элементов, реализованным с использованием коммерческого пакета ANSYS.

Детально исследованы зависимости нижней частоты колебаний от уровня заполнения жидкостью H и углов конусности A для прямых и обратных оболочек с различными комбинациями граничных условий на краях. Установлено, что только для прямой закреплённой у основания конической оболочки существуют такие комбинации геометрических параметров, при которых фундаментальные частоты колебаний оказываются выше значений эквивалентной по объёму цилиндрической оболочки.

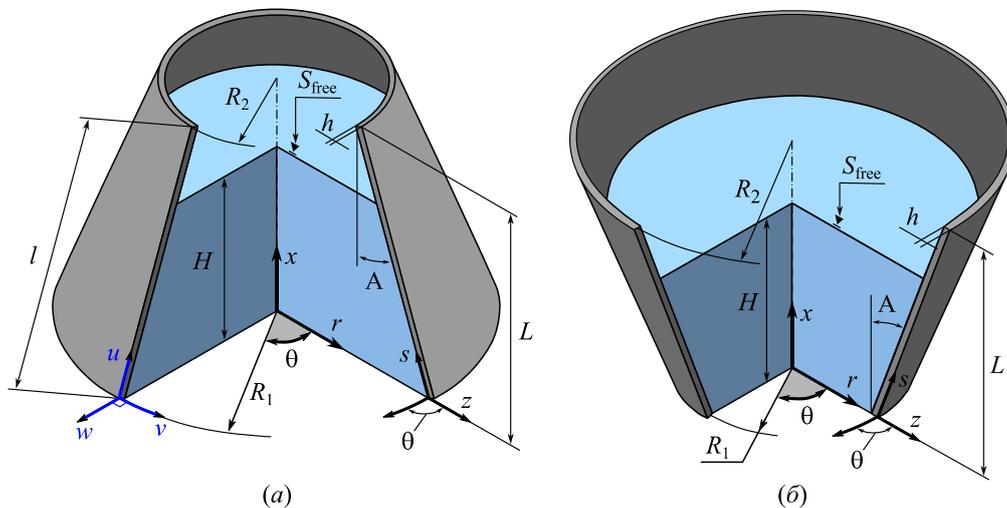


Рис. 1. Расчётные схемы прямой (а) и обратной (б) усечённых конических оболочек, содержащих жидкость.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Литература

1. С. А. Бочкарёв, С. В. Лекомцев, В. П. Матвеев // Собственные колебания усечённых конических оболочек, содержащих жидкость, ПММ, 86:4 2022. 505–526.
2. С. Shu // Differential quadrature and its application in engineering. 2000. 340 p.
3. С. К. Годунов // Обыкновенные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами. Т. I: Краевые задачи. 1994. 264 с.

О МЕТОДЕ ФУРЬЕ, СВЯЗАННОМ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ СПЛАЙНАМИ, В ЗАДАЧЕ ДИНАМИКИ МЕМБРАНЫ

Леонтьев В.Л.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
leontiev_vl@spbstu.ru

Модифицированный метод разделения переменных [1], связанный с вариационным принципом Рейсснера и с ортогональными сплайнами, применяется для решения задач о колебаниях мембран с закрепленными криволинейными границами. Метод дает возможность получать решения в форме конечных рядов Фурье гиперболических начально-краевых задач для неканонических областей. В [1] в рамках задачи Штурма-Лиувилля доказана сходимости приближенных собственных функций к точным собственным функциям и показано, что при решении задач о колебаниях сплошной круглой мембраны и круглой мембраны с круглым отверстием метод порождает сходящиеся последовательности приближенных аналитических решений. Согласно алгоритму метода [1] после дискретизации задачи Штурма-Лиувилля появляется система конечно-разностных уравнений, которая благодаря применению конечных рядов Фурье, связанных с ортогональными сплайнами, предоставляет возможность исключения собственных значений, появившихся вместе с задачей Штурма-Лиувилля. Решение системы конечно-разностных уравнений дает значения коэффициентов конечных рядов Фурье в заданные моменты времени. В докладе приводится доказательство сходимости приближенных аналитических решений, имеющих форму конечных рядов Фурье, к точному решению задачи о колебаниях мембраны с неканонической границей. Для этого область, занимаемая мембраной и имеющая криволинейную границу, вписывается в прямоугольную область, в которой строится сетка. Дается постановка вспомогательной начально-краевой задачи в прямоугольной области, которая равносильна исходной краевой задаче для мембраны с криволинейной границей. Показывается, что конечно-разностная схема (КРС) аппроксимирует вспомогательную задачу в прямоугольной области с погрешностью, имеющей величину порядка квадрата максимального шага сетки, и является устойчивой при условии, что величина шага по времени определенным образом согласуется с величиной шагов прямоугольной сетки по координатам. Поскольку во всех узлах области, являющейся разностью прямоугольной области и области мембраны, узловое значения решения системы конечно-разностных уравнений для вспомогательной задачи равны нулю согласно постановке этой задачи, то такие условия выполняются в рамках КРС без погрешностей. Поэтому из аппроксимации и устойчивости КРС последовательность узловых решений КРС для вспомогательной задачи в прямоугольной области сходится к точному решению вспомогательной задачи. Следовательно, последовательность узловых решений КРС для основной задачи о колебаниях мембраны, имеющей криволинейную границу, сходится к точному решению этой начально-краевой задачи со скоростью пропорциональной квадрату максимального шага сетки. Разность приближенного и точного решений оценивается при этом с помощью нормы, являющейся сеточным аналогом интегральной нормы гильбертова пространства квадратично суммируемых функций двух пространственных переменных. Это означает сходимости к точному решению последовательности конечных рядов Фурье, определяемых ортогональными сплайнами и узловыми значениями решений КРС. Скорость такой сходимости пропорциональна квадрату максимального шага сетки и оценивается интегральной нормой пространства квадратично суммируемых функций. Приводятся в графической форме решения для прогиба круглой мембраны, имеющей отверстие с границей в форме эллипса. Линии уровней на рисунках определяют для заданных моментов времени значения коэффициентов конечных рядов Фурье по ортогональным сплайнам и характеризуют фактическую сходимости этих рядов к неизвестному точному решению, которая согласуется с теоретическим доказательством сходимости в общем случае неканонической области. На примере задачи о свободных колебаниях двусвязной мембраны с неканонической границей показана фактическая сходимости приближенных решений, полученных в рамках алгоритма метода Фурье в форме конечных рядов Фурье, подтверждающая общие результаты теоретического исследования сходимости. Алгоритм модифицированного метода Фурье [1] может быть распространен на задачи теории пластин и оболочек, теории упругости.

Литература

1. В.Л. Леонтьев // Журнал вычислительной математики и математической физики, 62:10, 2022. 1662–1681.

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УДАРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И НДС ЛОБОВОГО СТЕКЛА САМОЛЕТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ПТИЦЕСТОЙКОСТЬ

Аунг К.М., Лепешкин А.Р.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия*

aungkhinemyint22@gmail.com

Одним из важнейших факторов появления в международных и отечественных стандартах требований по повышению безопасности и прочностной надёжности [1-3] при выполнении гражданских авиаперелетов является возможное столкновение с птицами в полете. При этом необходимо обеспечить требования по обеспечению высоких прочностных и оптических свойств и минимизации весовых характеристик авиационного остекления.

Конструкция лобового стекла играет важную роль в изучении проблемы птицестойкости остекления, поэтому большое внимание при исследованиях уделяется не только разработке конечно-элементных моделей остекления и птицы, но и анализу различных геометрий и материалов. В результате удара, в соответствии с международными сертификационным стандартами, лобовое стекло должно не только выдерживать удар проникновения птицы, но и не допускать полной фрагментации всех прозрачных материалов, обеспечивать приемлемую видимость для безопасного продолжения полета и посадки. Эти стандарты играют решающую роль в случае, если лобовое стекло состоит только из двух панелей, потому что удар по одной стороне может привести к выходу из строя другой панели, или удар по контрбалке, которая разделяет две панели, может привести к фрагментации обоих материалов панелей остекления одновременно с последующей потерей видимости. Разработана методика расчетного моделирования динамического процесса удара птицы по полной структуре лобового стекла (одной панели) самолета в пакете программ LS DYNA. В методике численного моделирования птицестойкости остекления использован SPH метод для учета параметров птицы. Стекло в расчетной модели рассматривается как упругопластичный хрупкий материал, в то время как полимерная прослойка ведет себя как вязкая среда, обеспечивающая высокую деформацию перед разрушением и хорошую прочность на разрыв. В расчетном моделировании, согласно сертификационным требованиям, использовалась птица массой 1.8 кг при скорости удара 158 м/с. В качестве модели птицы выбран цилиндр. В соответствии с требованиями отказобезопасности лобовое стекло является многослойным из четырех силикатных слоев, скрепленных из клеенных трех слоев полимерной пленки. При ударе в такое стекло и его разрушении, осколки остаются соединенными с полимерными прослойками. Получены результаты численного моделирования ударного динамического процесса и напряженно-деформированного состояния (НДС) лобового стекла. Анализ распределений НДС лобового стекла показал, что максимальные напряжения наблюдаются в первые моменты времени 1.0-1.5 мсек ударного динамического процесса. Результаты, полученные путем численного моделирования указанного динамического процесса, подтверждают способность стекла выдерживать удар птицы с учетом своих свойств материала и геометрических характеристик (малые углы удара и двойная кривизна), что позволяет птице скользить вдоль лобового стекла и тем самым снизить передающуюся ему кинетическую энергию. По результатам расчетного моделирования лобовое стекло выдержало удар птицы.

Результаты испытаний лобового стекла самолета на птицестойкость на специальном стенде с пневматической пушкой с указанными выше параметрами массы и скорости птицы подтвердили результаты расчетного моделирования. После проведенных испытаний повреждений лобового стекла не обнаружено. Расчетное моделирование также позволило расширить полученную информацию об указанном ударном динамическом процессе при испытаниях лобового стекла самолета на птицестойкость.

Литература

1. А. Р. Лепешкин, О.И. Ильинская, С.Б. Маликов. Динамика и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 2020. 100 с.
2. A. Lepeshkin. The blade releasing method for test of engine casing containment // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). Сер. "ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2013". 2013. С. 63749.
3. B.F. Shorr B.F., N.N. Serebriakov, G.V. Melnikova et al. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate // The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. 012050.

ДВИЖЕНИЕ АКТИВНОЙ БРОУНОВСКОЙ ЧАСТИЦЫ С ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ИНЕРЦИЕЙ В ГАРМОНИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

Лисина И.И.^{1,2}, Лисин Е.А.^{1,2}, Ваулина О.С.¹

1 - ОИВТ РАН, Россия

2 - МФТИ, Россия

irina.lisina@mail.ru

В последнее время наблюдается стремительный рост количества публикаций по активной материи — особой форме «мягкого» конденсированного вещества, которая представляет собой дисперсионную среду, содержащую мелкодисперсные активные частицы. Несмотря на свою простую форму и отсутствие подвижных частей, такие частицы (также называемые нано- и микромоторами) способны автономно преобразовывать доступную в окружающей среде энергию в собственное направленное движение. Системы таких частиц представляют большой интерес для статистической механики и материаловедения, имеют множество перспективных приложений: от чисто технических до биомедицинских.

Привлекательность активной материи заключается в том, что ожидается прийти к пониманию и возможности управления динамическими свойствами самодвижущихся активных элементов. К настоящему времени характер безынерционного движения активной броуновской частицы в рамках подхода сильно вязкой среды достаточно хорошо изучен. Однако существует целый ряд обстоятельств, при которых применение данного приближения не является оправданным. В частности, когда самодвижущиеся частицы движутся в среде с низкой вязкостью, или когда вращательная диффузия активных частиц усиливается внутренними активными процессами или внешним управлением. В качестве примеров можно привести экспериментальные работы, в которых инерционные эффекты играют существенную роль, например: янус-частицы в плазме и сверхтекучем гелии; активные капли, скользящие по межфазной границе, так называемые "виброботы", движущиеся по твердой поверхности; управляемые внешними полями активные коллоиды; биофиламенты с молекулярными моторами; мини-роботы с сенсорными задержками, и т.д. Для решения этих задач, необходимо расширить область исследования движения активных броуновских частиц на случай среды с низкой вязкостью. В нашем исследовании мы опираемся на активную модель движения частиц Ланжевена (Active LPM), которая учитывает инерционные эффекты и позволяет исследовать все вышеперечисленные случаи. Несмотря на богатый экспериментальный материал, в теории существует пробел в области, где вращательная инерция существенно влияет на случайное блуждание активных частиц на всех временных масштабах. В частности, хотя известные модели активных частиц броуновского типа и Орнштейна-Уленбека включают эффект памяти о направлении движения, они неприменимы в случае низкой вязкости среды, поскольку вращательная инерция, которую они не учитывают, может частично предотвратить «потерю памяти» с увеличением вращательной диффузии.

Мы представляем анализ движения самодвижущейся частицы с поступательной и вращательной инерцией и с флуктуирующей скоростью. Теоретические кривые хорошо описывают соответствующие, полученные при численном моделировании и усредненные по шуму траекторий, функции среднеквадратичного и линейного смещений самодвижущейся частицы с поступательной и вращательной инерцией и флуктуациями скорости в широком диапазоне скоростей самодвижения, моментов инерции, диффузий вращения, вязкостей среды и времени наблюдения. Впервые, посредством численного моделирования изучено совместное влияние таких факторов, как гармоническая ловушка и вращательная инерция, на движение сферической активной броуновской частицы. Путем аппроксимации численных данных предложены необходимые поправки к модели активной частицы Орнштейна-Уленбека. Эти поправки позволяют вычислить стационарные значения статистических свойств (таких как среднеквадратичные смещения и средний квадрат скорости) активной броуновской частицы в ловушке с учетом ее поступательной и вращательной инерции. Мы показываем, что в условиях достаточно больших значений частоты ловушки и коэффициента трения, вращательная инерция оказывает существенное влияние только на средний квадрат скорости и слабое — на среднеквадратичное смещение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-22-00130, <https://rscf.ru/project/24-22-00130/>.

РЕШЕНИЕ СВЯЗНОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОДНОСЛОЙНОГО КВАЗИБЕССИЛОВОГО МАГНИТА

Лобачев М.И., Новокшенов А.Д.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
lobachev_mi@spbstu.ru

Стремление к достижению более высоких значений магнитной индукции для исследований в фундаментальных областях науки в импульсных неразрушаемых системах требует новаторских решений для преодоления ограничений, связанных с механической прочностью проводников [1]. Одним из таких решений, способным избежать экспоненциального роста размеров радиусов токоведущих соленоидов, является концепция квазибессилловых магнитов [2]. В таких конфигурациях магнитных систем механические силы Лоренца, возникающие вследствие воздействия полоидального и тороидального магнитных полей, практически сведены к минимуму. Происходит это за счет подбора соответствующих компонент вектора плотности тока, что влияет на направление проводящих элементов конструкции, как, например, в [3].

Для грамотного построения подобной квазибессилловой конфигурации необходимо решить множество подзадач, одна из которых является основной темой данной работы. В ходе ее решения рассматривается однослойный цилиндрический соленоид, с заданной центральной аксиальной компонентой магнитной индукции. В осесимметричной постановке в проводящем слое заданы азимутальные и аксиальные компоненты вектора плотности тока, что в свою очередь приводит к возникновению радиальной компоненты механической силы Лоренца – связующей в электромагнитных задачах и задаче механики деформируемого твердого тела. Основным параметром, рассматриваемым в данной работе и влияющим на прочность квазибессилловой системы, является безразмерный параметр

$$\eta = \sigma_{Mises_{max}} / \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

являющийся отношением максимального значения эквивалентного напряжения по Мизесу к магнитному давлению поля B_0 (значение индукции на центральной оси). Снижение величины параметра η в токоведущем слое – основная цель данной работы.

Для определения компонент тензора напряжений рассматривается задача Ляме в линейной упругой постановке аналитически и численно в программном комплексе COMSOL Multiphysics при наличии радиальной компоненты вектора объемных сил в виде:

$$\underline{k} = \left(\frac{A}{r} + \frac{B \ln r}{r} + Cr \right) \underline{e}_r$$

Константы A, B и C содержат информацию о свойствах материала, а также о величинах магнитной индукции и компонент вектора плотности тока. Подобная зависимость от r получена при решении дифференциальных уравнений Максвелла в статической постановке (импульс в магнитной системе мал по времени). Решением задачи линейной теории упругости в перемещениях будет выражение:

$$u_r = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{Cr^3}{8} + \frac{r}{2} \left(\left(A - \frac{B}{2} \right) \left(\ln r - \frac{1}{2} \right) + \frac{B \ln^2 r}{2} \right)$$

Таким образом, при нахождении из граничных условий констант, связанная задача для однослойной квазибессилловой конфигурации становится полностью параметризуемой и далее к ней может быть применена процедура оптимизации по снижению механических напряжений и обеспечению большего запаса прочности для достижения новых рекордов значений величин индукций в сильных и сверхсильных магнитных полях.

Литература

1. Xiao, Houxiu, et al. "Failure analysis of a 100 tesla pulsed magnet." 2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). IEEE, 2020.
2. Shneerson, German A., Mikhail I. Dolotenko, and Sergey I. Krivosheev. Strong and superstrong pulsed magnetic fields generation. Vol. 9. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2014.
3. Nemov A.S., Lagutkina A.D., Shneerson G.A. "A conceptual 3-D design of a non-destructive two-layer quasi-force-free magnet for megagauss field generation." IEEE Transactions on Magnetics 58.3 (2022): 1-9

ПРИМЕНЕНИЕ GPU ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ DEM

Лобовиков Д.В., Матыгуллина Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
ppk2004@inbox.ru

Для исследования свойств сыпучих материалов при их прессовании, гранулировании, транспортировании, перемалывании используется 3D моделирование методом дискретных элементов (DEM) [1]. Использование DEM позволяет определить положение, направление движения, силовые, динамические характеристики каждой частицы сыпучего материала. При DEM моделировании сыпучих материалов применяются различные методы для представления частиц сложной формы. В работе используется сложная форма частиц, состоящая из сфер (Рис. 1).

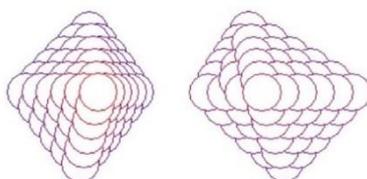


Рис. 1. Модель частицы состоит из сфер (multi-sphere particles).

Каждая частица состоит из 89 сфер, расположенных на поверхности, с перекрытием. Сферы жестко позиционированы относительно центра тяжести частицы, между собой не взаимодействуют. Момент инерции принят равным для трех осей. Использование DEM требует значительное компьютерное время для моделирования. Применение графической карты (GPU) позволяет кратно снизить время расчетов. Авторами написана программа, которая может выполняться на центральном процессоре CPU (язык программирования C++) или на GPU (язык CUDA C). Для проверки модификации программы для GPU используется моделирование силы сопротивления сдвигу. При проведении численного эксперимента используется 3000 частиц (Рис. 2). Погрешность между двумя типами вычислений не превышает 2%. Погрешность возникает в связи с тем, что GPU по сравнению с CPU производит вычисление операций с отличающейся точностью, кроме того, параллельные вычисления приводят к изменению порядка суммирования сил, что влияет на итоговое округление.

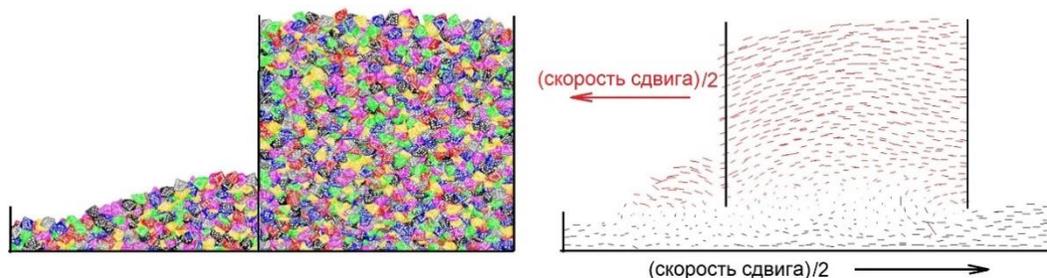


Рис. 2. Моделирование сдвига.

Для моделирования физического процесса при количестве частиц 3000, количестве составляющих их сфер 267000 с моделируемым временем 1 с требуется 10^5 итераций, 512 секунд компьютерного времени GPU или 8908 секунд времени расчета на одном ядре CPU. Требуемое компьютерное время GPU в 17,4 раз меньше, чем компьютерное время CPU. Теоретически, для расчета на GPU трех секунд физического процесса с использованием одного миллиона сложных частиц (89 млн. сфер) потребуется 142 часа компьютерного времени, что позволит проводить численные эксперименты в сроки, измеряемые днями. Однако, если для 50000 сложных частиц достаточно использовать GPU с 6 Гб памяти, то для 1 млн. частиц требуется промышленный GPU со 120 Гб памяти либо использование дополнительной оперативной памяти CPU с затратами времени на обмен данными. В работе использовались: CPU Intel Xeon E5 2650 v3, память 16 Гб, использовалось одно ядро; GPU Nvidia GTX1660s, память 6Gb, использовались 1408 ядер.

Литература

1. T. Poschel, T. Schwager, Computational Granular Dynamics// Springer Berlin Heidelberg New York. 2005. 322 p.

ВОПРОСЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ВИБРОПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ

Ереев М.Н., Лонин К.А., Патрушев В.Л., Соловьев С.А.

АО "ОКБМ Африкантов", Россия
lonin_ka@okbm.nnov.ru

В докладе представлены подходы к расчетно-экспериментальному обоснованию вибропрочности механического оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Обеспечение вибропрочности оборудования ЯЭУ является отдельным классом задач, в которых проводится многокритериальная оценка прочности и работоспособности, что регламентировано нормативными документами Российской Федерации. Сложность реализации экспериментов на натурных моделях, их значительная стоимость, а также сокращение сроков проектирования выдвигают на первый план компьютерные методы проектирования и расчетного виртуального моделирования, что предлагает использование соответствующей методологии расчетного обоснования. Моделирование вибрационного воздействия на оборудование ЯЭУ проводится с учетом различных факторов, обусловленных внешними и внутренними источниками возбуждений, основными из которых являются: остаточная неуравновешенность и действие электромагнитных сил в роторных системах, действие гидродинамических сил, ходовая вибрация. Также, в качестве исходных данных используются обобщенные параметры внешнего вибрационного воздействия (например, по ГОСТ 30631-99, 30546.1-98). Для верификации цифровых моделей проводятся технически возможные специальные измерения или используются результаты ранее выполненных экспериментов по идентификации параметров аналогичного оборудования, например, путем экспериментального определения модальных характеристик на специальных стендах (вибрационных, ударных).

Характерными примерами реализации используемой методологии по расчетно-экспериментальному обоснованию вибропрочности оборудования в АО «ОКБМ Африкантов» являются: 1) разработка компьютерной модели реакторной установки (РУ) типа РИТМ-200 с ее верификацией по результатам измерений на натурном объекте (также в обоснование сейсмостойкости блоков биологической защиты и исполнительных механизмов системы управления и защиты (ИМ СУЗ)); 2) разработка компьютерных моделей шкафов управления электронасосами и ИМ СУЗ (также для анализа динамической прочности электронных компонент и узлов их креплений); 3) разработка компьютерной модели блока арматуры с трубопроводами систем РУ (также с целью обоснования динамической прочности применяемой арматуры).

О ГЕНЕРАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ НАНОСИСТЕМ

Лукин А.В., Попов И.А., Привалова О.В., Штукин Л.В.

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
lukin_av@spbstu.ru

Теоретические и прикладные задачи нелинейной динамики наномеханических систем в настоящее время привлекают растущее внимание научного и инженерного сообщества. Данная область исследований имеет непосредственное отношение к развитию таких направлений современной индустрии наносистем как датчики высокоточного измерения различных физических величин (высотомеры, датчики давления и влажности, газовые сенсоры, детекторы масс осаждаемых частиц, датчики инерциальной информации) [1], системы преобразования и обработки сигналов (ультразвуковые преобразователи, радиочастотные переключатели, генераторы частоты, элементы акустоэлектроники) [2], системы идентификации физических характеристик материалов на нано-масштабе [3].

Оптические гребенки как источники стабильного электромагнитного излучения оптического диапазона находят многообразные применения в сложных метрологических и спектроскопических задачах, таких как создание сверхточных часов и спутниковых систем позиционирования, лазерная спектроскопия высокого

разрешения, анализ состояния холодных атомов и др. [4] После появления первых экспериментальных реализаций акустомеханических частотных гребенок, называемых также фононными, эта область исследований начала активно развиваться [5]. Ключевым потенциальным преимуществом фононных частотных гребенок на базе низкоразмерных наносистем перед их оптическими аналогами является уникальный диапазон возможностей по управлению параметрами генерируемого высокочастотного сигнала за счет существенной нелинейности возбуждаемых режимов колебаний и контролируемой изменчивости в широких пределах динамических характеристик нанорезонаторов, изготовленных из двумерных материалов.

В настоящей работе исследуется нелинейная динамика прямоугольной атомарно-тонкой нанополосы в условиях внутреннего комбинационного резонанса между двумя поперечными и одной продольной формами механических колебаний. Аналитически найдены условия на величину деформации начального натяжения слоя, требуемую для реализации резонанса между формами с заданными индексами изменчивости по длине. Показано, что в условиях внутреннего резонанса в системе возбуждается нелинейный режим свободных колебаний, спектр которого имеет вид частотной гребенки. Выделены два качественно различных типа колебаний такого рода - вызванных начальным возбуждением по рабочей продольной форме колебаний и по двум поперечным формам. Показана существенная зависимость спектрального состава генерируемых частотных гребенок от соотношений между амплитудами начального возмущения по трем взаимодействующим модальным координатам и от величины параметра внутренней частотной расстройки системы.

Литература

1. Xiao, X. et al(2023). Optical-thermally actuated graphene mechanical resonator for humidity sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 374, 132851. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132851>
2. Xu, B. et al (2022). Nanomechanical Resonators: Toward Atomic Scale. In *ACS Nano* (Vol. 16, Issue 10, pp. 15545–15585). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c01673>
3. Sajadi, B. et al (2018). Size- and temperature-dependent bending rigidity of graphene using modal analysis. *Carbon*, 139, 334–341. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.06.066>
4. Kolachevsky, N. N. et al(2018). Prospective Quantum-Optical Technologies for Satellite Navigation Challenges. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 5(1), 13–27. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.13.27>
5. Lee, J., Shaw, S. W., Feng, P. X. L. (2022). Phononic Frequency Comb Generation via 1:1 Mode Coupling in MoS₂ 2D Nanoelectromechanical Resonators. *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2022-January, 503–506. <https://doi.org/10.1109/MEMS51670.2022.9699651>

ВЛИЯНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВИХРЕЙ НА ОБТЕКАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Луцкий А.Е., Константиновская Т.В.

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия
allutsky@yandex.ru

Сверхзвуковое обтекание современных летательных аппаратов часто сопровождается формированием различных вихревых структур. Источником (генератором) таких структур являются, например, кромки крыльев и горизонтального оперения. Вихри могут оказывать заметное влияние на обтекание элементов конструкции, расположенных вниз по потоку. В представленной работе исследуется влияние двух типов вихре-генераторов: треугольного и прямоугольного на обтекание основного крыла. Свойства вихрей, формируемых этими генераторами, существенно различаются. Особенности течения над подветренной стороной треугольного крыла к настоящему времени изучены достаточно хорошо [1-3]. Однако эволюция вихревой структуры вдали от крыла требует дальнейших исследований. Основной вихрь на подветренной стороне треугольного крыла, как правило, разрушается под действием хвостового скачка на расстоянии 1-2 корневых хорд [4,5] вниз по потоку от задней кромки – рис. 1а. Элементы конструкции, расположенные на таком расстоянии от треугольного генератора, не подвергаются воздействию вихря. Сверхзвуковые концевые вихри, сходящие с боковой кромки прямого крыла, как правило, сохраняют свои свойства на расстояниях десятков хорд [6] – рис. 1б. В работе проведено исследование влияния обоих типов вихрей на обтекание прямоугольного крыла, расположенного вниз по потоку. Получены распределения давления и температуры на его поверхности в зависимости от числа Маха набегающего потока и угла установки генератора вихрей.

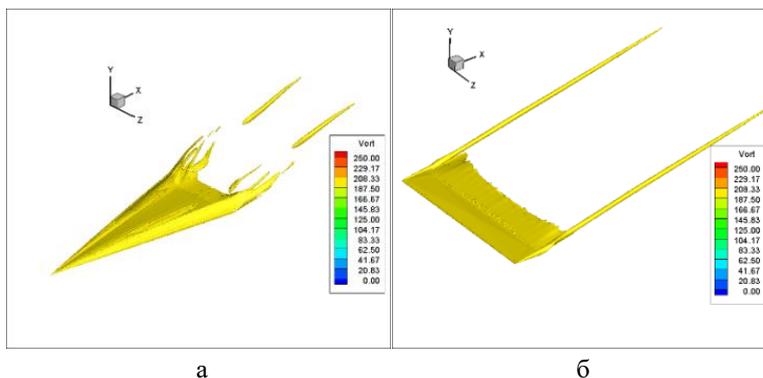


Рис. 1. Вихревые структуры, генерируемые дельта (а) и прямым (б) крылом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 24-21-00230.

Литература

1. Stanbrook, L. C. Squire // Possible types of flow at swept leading edges, *Aeronaut. Quart.*, 15:2 1964. 72-82.
2. В. Я. Боровой, Б. А. Иванов, А. А. Орлов, В. Н. Харченко // Исследование обтекания сверхзвуковым потоком крыльев различной формы в плане методом лазерного ножа, „Груды ЦАГИ“, вып. 1793, 1977.
3. М. Д. Бродецкий, Э. Краузе, С. Б. Никифоров, А. А. Павлов, А. М. Харитонов, А. М. Шевченко // Развитие вихревых структур на подветренной стороне треугольного крыла, *ПМТФ*, 42:2 2001. 68-80.
4. В. В. Затолока, А. К. Иванюшкин, А. В. Николаев // Интерференция вихрей со скачками уплотнения в воздухозаборнике. Разрушение вихрей, *Учен. зап. ЦАГИ*. 6:2 1975. 134–138.
5. Iraj M. Kalkhoran, Michael K. Smart // Aspects of shock wave-induced vortex breakdown, *Progress in Aerospace Sciences*, 36:1 2000. 63-95.
6. А. А. Давыдов, Т. В. Константиновская, А. Е. Луцкий // Численное моделирование вихревого следа за крылом на больших удалениях от крыла в сверхзвуковом потоке, *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*, 095 2017. 15 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Лысенко А.М.^{1,2}, Савватимова П.Р.^{1,2}, Томилина Т.М.¹

1 - *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

2 - *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

lysenko@imash.ac.ru

В настоящее время идет активный процесс «возвращения человека на Луну», в рамках которого большой интерес вызывает вопрос об использовании лунного грунта – реголита для изготовления элементов лунной инфраструктуры на месте. Принципиальная возможность такого использования реголита была продемонстрирована в ряде работ, в том числе авторами данного доклада, см., например, [1-3], где были получены небольшие образцы из имитатора реголита на основе аддитивных технологий (АТ) методом селективного лазерного сплавления (СЛС). В процессе выполнения пробных экспериментов было установлено, что для получения тестовых образцов заданной формы с приемлемыми механическими свойствами необходима предварительная подготовка исходного порошкового материала. Известно, что реголит содержит большое количество пылевых частиц с вкраплениями каменной крошки разных размеров и форм, в то время как технология СЛС разрабатывалась для металлических порошков со сферической формой частиц.

В данном докладе обобщены результаты изучения свойств лунного реголита как исходного материала для сплавления тестовых образцов, выделены его параметры (морфология, размеры частиц, химический и минеральный составы, сыпучесть), которые существенно влияют на механические свойства готового изделия. Обосновано, что для проведения исследований по применимости технологии АТ-СЛС не обязательно использовать дорогостоящий коммерческий имитатор реголита. В экспериментах использовались имитаторы, изготовленные на основе измельченных земных пород лабрадорита и габбро-диабазы, близких к реголиту по химическому составу, с соответствующим распределением частиц по размерам (показаны на рис. 1), в том числе после удаления пылевых частиц. Сформулированы преимущества и недостатки технологии СЛС применительно к данной задаче.

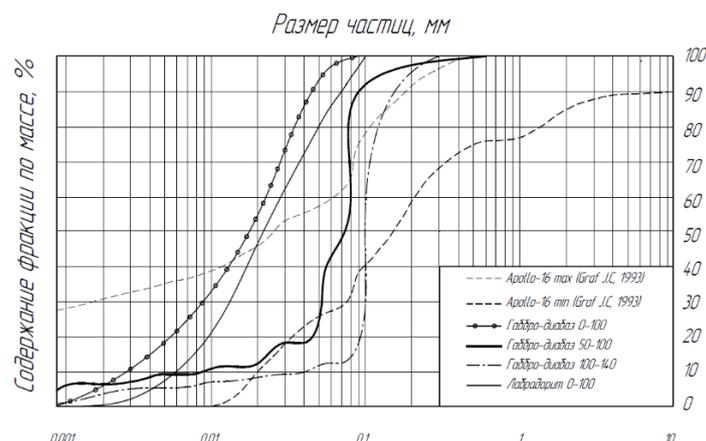


Рис. 1. Интегральные распределения частиц по размерам для используемых порошковых композиций и область распределений частиц для всех образцов реголита, доставленных Apollo-16 (зона внутри пунктирных линий)

Литература

1. Goulas A., Binner J.G.P., Harris R.A. et al. Assessing extraterrestrial regolith material simulants for in-situ resource utilization based 3D printing // Applied Materials Today. 2017. V. 6. P. 54-61.
2. Ким А.А., Лысенко А.М., Томила Т.М. Получение изделий из лунного реголита с помощью аддитивных технологий. Научные труды 6-ой международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (Живком-2022). 2022. С.151-154.
3. Томила Т.М., Ким А.А., Лисов Д.И., Лысенко А.М. Эксперимент «Лунный-принтер» по лазерному сплавлению лунного реголита в космическом проекте «Луна-грунт». Космические исследования. 2023. Т.61, № 4. С. 311-321.

НЕСОВМЕСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ГИБКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС

Лычев С.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия

lychevsa@mail.ru

В настоящее время микроэлектромеханические системы (МЭМС) являются неотъемлемой частью большинства электронных и оптических устройств. Специфика МЭМС-элементов заключается в их пространственном масштабе, который может составлять порядка нескольких микрон и менее. Деформация упругих элементов такого масштаба существенно зависит от факторов, которыми обычно пренебрегают в теориях расчета конструкции. К ним относятся: влияние несовместности деформаций; поверхностного натяжения; нелинейное взаимное влияние плоского напряженного состояния на изгиб, а также значительные изменения геометрической формы элементов вследствие их высокой гибкости. Чтобы учесть эти факторы, необходимо выйти за пределы классической теории упругих пластин и оболочек, рассматривая их с позиций нелинейной механики сплошной среды как упругие системы с малым параметром, соответствующим их толщине.

Традиционный подход к математическому моделированию деформаций в тонкостенных конструкциях основан на следующих положениях. 1. Представление перемещений в виде достаточно простых аппроксимаций относительно пространственной координаты, вдоль которой тело полагается тонкостенным. 2. Усреднение кинетической энергии и энергии деформирования по направлениям, трансверсальным поверхности осреднения. 3. Вывод уравнений движения и граничных условий из принципа наименьшего действия по расширенному набору кинематических функций, заданных на поверхности осреднения. Эта стратегия, восходящая к работам Л. Эйлера и Г. Кирхгофа, дала превосходные результаты при моделировании малых деформаций в упругих пластинах и оболочках, однако её реализация для гибких тонкостенных конструкций связана со сложностями, как теоретического, так и вычислительного характеров. Дело в том, что гибкость предполагает существенное различие геометрической формы конструкции до деформации и после. Это приводит к тому, что

изгибное и плоское напряженные состояния оказываются связанными. Впервые этот эффект был учтен Фёпплем, а несколько позже фон Карманом. Уравнения Фёппля-фон Кармана в настоящее время являются основными в теории гибких конструкций. В них, однако, связь напряжений и деформаций предполагалась линейной, а нелинейные члены, характеризующие связь плоского напряженного состояния и изгиба, определялись полуэмпирическим путем. Использование подобного подхода для учета несовместных деформаций и поверхностных эффектов весьма проблематичен, поскольку эмпирические элементы теории (асимптотически непоследовательное игнорирование деформационных и силовых составляющих) вносят неопределенность в описание деформирования. Кроме того, для учета физической нелинейности материала конструкции необходимо определять напряжения из гиперупругого потенциала, структура которого более сложная, чем квадратичная. Результаты в этом направлении получены, в основном, только для мембран (т.е. для тонкостенных конструкций, в которых изгибной жесткостью можно пренебречь).

В докладе представлено развитие полностью (геометрически и физически) нелинейной теории в рамках указанной выше стратегии, но без асимптотически непоследовательных шагов, с учетом несовместимых деформаций и поверхностных эффектов. Из принципа стационарности действия и вариационных симметрий получены уравнения поля и законы сохранения, в которых в последовательность независимых полей включено поле импланта, характеризующего несовместность деформаций. Это дает эффективный математический формализм для моделирования собственных (остаточных) напряжений и позволяет теоретически объяснить значительное увеличение жесткости сверхтонких МЭМС-элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00866

КОНЕЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ КРУГЛОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ

Лычёв А.С.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

lychev.senya@mail.ru

Получено замкнутое осесимметричное решение краевой задачи для упругой анизотропной круглой пластины (элемента МЭМС) в постановке трехмерной теории упругости (короткого цилиндра). Решение отыскивается в классе вектор-функций, интегрируемых с квадратом. Боковая граница пластины свободна от касательных напряжений и зафиксирована в радиальном направлении. Такие условия соответствуют «скользящему контакту» цилиндрической части границы с абсолютно жестким полым цилиндром без трения. Это дает полную свободу для выбора условий на основаниях цилиндра (лицевых поверхностях пластины). Для того, чтобы воспроизвести реальные условия закрепления, предполагаем, что внешние силовые поля самоуравновешены, т. е. их результирующая сила и результирующий момент равны нулю. При этих предположениях удастся представить решение линейной задачи в виде разложения по системе собственных функций, выражаемых конечными комбинациями элементарных функций и функций Бесселя.

Для учета геометрической нелинейности предлагается трактовать напряжения, определенные в рамках линейной задачи, как вторые напряжения Пиолы-Кирхгофа и использовать закон состояния Кирхгофа-Сен-Венана. Конечно, это лишь один из возможных и, вероятно, не лучший тип закона состояния нелинейной упругости, но его использование позволяет эффективно использовать интегральный оператор, представляющий решение линейной задачи, для итерационного решения нелинейной задачи. Выделяя линейную часть в уравнениях равновесия, приходим к формально линейной постановке, правая часть которой нелинейно зависит от искомого решения. Если считать правую часть заданной, получим краевую задачу с некоторым (фиктивным) полем объемных сил, решение которой уже построено. Это соображение позволяет сформулировать итерационный алгоритм, реализующий метод простых итераций, на каждом шаге которого определяется фиктивное поле объемных сил по решению на предыдущем шаге.

Последовательность итераций сходится достаточно быстро, если на каждом шаге фиктивное поле объемных сил незначительно отличается от изначально заданного (т.е. поправки, связанные с нелинейностью задачи, малы). Вместе с тем, наибольший интерес как раз представляют случаи, когда нелинейный характер деформирования проявляется существенно. При этом, как и следовало ожидать, скорость сходимости итерационной последовательности уменьшается, либо численный процесс расходится вовсе. Чтобы преодолеть проблему расходимости, предлагается использовать регуляризацию итерационного процесса, идея которого аналогична методу суммирования Фейера (со средними арифметическими). При этом фиктивная часть объемных сил определяется не по непосредственно предшествующей итерации, а по всем предыдущим

итерациям, суммируя их с определенными весами. Последовательность весов характеризует “вычислительную вязкость” итерационного процесса и стабилизирует его. Конечно, это приводит к увеличению числа итераций, однако позволяет получить результаты для деформаций пластины, при которых величина прогиба оказывается на порядок больше её толщины.

Вычислительный анализ пластин из монокристаллического кремния, применяемых в МЭМС, позволяет утверждать следующее: 1. Прогибы пластины незначительно зависят от того, учитывается ли фактор анизотропии. 2. Геометрической нелинейностью можно пренебречь при прогибах, не превышающих толщину пластины. 3. При давлениях, превышающих это значение, влияние геометрической нелинейности резко возрастает.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00866

ЗАДАЧА О ВНЕДРЕНИИ ИГЛЫ В ТКАНЬ МОЗГА

Лычёва Т.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия
taniko81@mail.ru

Быстрое развитие технологических достижений в XX веке, оказали большое влияние на различные дисциплины, в том числе и медицину. Роботизированная хирургия - это огромный шаг вперед в мире медицинской науки. Нейрохирургия - одна из таких областей, где активно применяются роботизированные устройства. Например, одной из самых распространенных процедур является стереотаксическая биопсия — это хирургическая процедура, при которой нейрохирург вводит тонкую иглу в мозг для извлечения небольшого кусочка ткани для исследования под микроскопом.

С точки зрения математического моделирования этот процесс представляет собой сложную систему, в которой надо учесть систему взаимодействия сил между иглой и тканью. С одной стороны, нужно учесть силы, которые требуются для перемещения иглы внутри ткани, с другой, на тело иглы воздействуют силы трения, силы распределённой нагрузки, а в силу несимметричности кончика иглы на него также воздействует сила, оказывающая давления со стороны ткани. К тому же надо смоделировать саму ткань мозга, понять какая математическая модель будет более приближена к настоящему материалу.

Для описания изгиба медицинской иглы, которая вводится глубоко в мягкие ткани и подвержена действию внешних нагрузок, связанных с управлением движением иглы, предложена оригинальная математическая модель. В разработанной модели игла представляет собой полый цилиндрический упругий стержень, частично погруженный в вязкоупругий материал, имитирующий мягкую ткань. Часть стержня, которая погружена вглубь материала, скользит с трением по каналу, стенки которого сжимают иглу. К стержню приложены внешние сила и момент. Сила сжатия, действующая на боковую поверхность стержня со стороны окружающего вязкоупругого материала, изменяется вдоль оси погруженной части иглы, а также может изменяться во времени. Предполагается, что в продольном направлении стержень не деформируется, он движется вдоль своей оси как абсолютно твердое тело, а его деформация сводится только к изгибу. Обжатие стержня со стороны канала в вязкоупругом материале описывается с помощью модели вязкоупругого основания как динамическая система балка - основание с переменной во времени длиной зоны взаимодействия [1]. При такой постановке краевая задача оказывается несамосопряженной, и её решение представляется в форме разложения по биортогональной системе собственных функций взаимно сопряженной пары дифференциальных операторов. В результате моделирования получены аналитические зависимости от времени для изгиба погружаемого стержня и реактивного усилия, противодействующего погружению.

Развит численно-аналитический метод моделирования цилиндрической изгибаемой иглы, внедряемой в вязкоупругое полупространство. При этом используется модификация представленного выше аналитического решения, которая учитывает изменяемость по осевой координате реакции полупространства. Предполагается,

что упругие и вязкие параметры винклеровского основания, моделирующего эту реакцию, изменяются пропорционально функции влияния. Она определяется из конечноэлементного моделирования семейства пространственных упругих задач о взаимодействии упругой иглы, внедренной на некоторую заданную глубину, и упругого полупространства с цилиндрическим каналом. Элементы семейства моделируют внедрение на глубины, изменяемые от нуля до максимального значения с достаточно малым шагом (1/50 от полного погружения). Это позволяет корректно учесть пространственный характер взаимодействия иглы и полупространства, а также концентрацию напряжений у кончика иглы и устья канала.

С помощью развитых аналитических и численных подходов произведен вычислительный анализ эволюции напряженно-деформированного состояния полупространства, изгиба иглы и зависимостей глубины и скорости погружения от управляющих усилий, приложенных к её свободному концу. На основе вычислений показана возможность выбора щадящего управления, при котором интенсивности напряжений в полупространстве, моделирующем биологическую ткань, оказываются наименьшей.

Литература

1. Lycheva T., Lychev S.// The Simulation the Contact Interaction of the Needle and Brain Tissue, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Advanced Problem in Mechanics II. APM 2020, 2022,341-349

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Любимова Н.Ю., Герцен Т.А., Нуруллаев Э.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия
ninalubimova@yandex.ru

Цель работы – анализ теоретических и экспериментальных исследований по созданию морозостойкого (с температурой стеклования ~170К), эластичного (деформация не ниже 70% при T~223К) полимерного композитного материала.

Полимерная основа композита образована сополимеризованными низкомолекулярными каучуками с эпоксидными и карбоксильными концевыми группами, поперечно сшитыми трехфункциональной эпоксидной смолой. Наполнитель представляет собой смесь двух фракций кремнезема: природного макрокристаллического кварца и высокодисперсного пирогенного аморфного кварца торговой марки “аэросил-380” в соотношении 80:20. Температура стеклования полученного эластомера составляет 213 К.

Сополимер: температура стеклования 178К, плотность 900 кг/м³ и объемная доля 0,4. Пластификатор: диоктилсебацанат с температурой стеклования 169 К, плотностью 910 кг/м³ и объемной долей 0,6.

Эластомерный композит был изготовлен в лабораторных условиях с использованием смесителя ЛСП-5 в Научно-исследовательском институте полимерных материалов (Пермь).

Теоретические основы исследования разработаны авторами с использованием упругого потенциала полимерной пространственной сетки в развитие феноменологического уравнения Муни-Ривлина, обобщенного в работах Трелоара [1].

Уравнение зависимости механического напряжения от деформации модифицировано с использованием упругого потенциала полимерной пространственной сетки и уравнения Муни-Ривлина уточненного авторами относительно влияния “физической” (межмолекулярного взаимодействия) составляющей поперечных связей в полимерном связующем. Проведено сравнение огибающих точек разрыва эластомерных композиционных материалов по Т. Смиуту [2] на основе смеси низкомолекулярных каучуков СКД-КТР и ПДИ - 3Б с высокомолекулярным сополимером СКДИ – Л.

Используя предложенное авторами уравнение зависимости механического напряжения от деформации и разработанные компьютерные программы, методом численного эксперимента, исследовано влияние ряда структурных параметров на механические характеристики полимерных композитов.

По результатам численных экспериментов построена модель полимерного композитного материала, удовлетворяющая поставленной цели и экспериментально получен морозостойкий и эластичный полимерный композит. Материал испытан с помощью разрывной машины, проведено сравнение результатов с расчетами.

Композит рекомендован в качестве конструкционного материала применительно к инженерной задаче создания износостойких деталей и узлов автомобильной и авиационной техники [3], эксплуатирующихся в широком температурном диапазоне, в том числе в условиях Крайнего Севера России и Арктики.

Литература

1. Treloar I. R. G. The Elasticity and related Properties of Rubbers / Rubber Reviews. 1974. Vol. P. 625-696.
2. Smith T. L., Chy W. H. Ultimate Tensile Properties of Elastomers // J. Polymer Sc. – 1972. – Part A - 2, – Vol. 10. – No. 1. – P.133-150.
3. Любимова Н.Ю., Ермилов А.С., Нуруллаев Э.М., Быкова Е.А. Оптимизация состава трехмерно сшитого эластомера по энергии механического разрушения //Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника.- 2017. - № 49, с.129-133А.

ПОДВОД ЭНЕРГИИ В ПОЛУБЕСКОНЕЧНУЮ ЦЕПочКУ В-ФЕРМИ-ПАСТА-УЛАМА-ЦИНГУ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Ляжков С.Д.^{1,2}

1 - Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

sergeiliazhkov@gmail.com

В рамках настоящего исследования анализируется динамика цепочки β -Ферми-Паста-Улама-Цингу со свободным концом, подверженным внезапному нагружению по синусоидальному закону; рассматриваются как силовое, так и кинематическое нагружения. Проводится исследование изменения полной энергии, закачиваемой в цепочку на больших временах. В гармонической цепочке (то есть при $\beta = 0$) закачиваемая энергия неограниченно растёт пропорционально времени при частотах нагружения, лежащей в полосе пропускания. При частоте нагружения, равной частоте отсечки, энергия неограниченно растёт пропорционально корню из времени. При частоте нагружения, находящейся в запрещённой зоне, энергия закачивается до определённого значения, по достижении которого рост энергии прекращается. Для объяснения механизма закачки энергии в зависимости от частоты нагружения производится анализ аналитического выражения для скорости частицы в замкнутой форме (для нахождения последнего предложен подход, заключающийся в асимптотическом анализе вкладов вынужденных и собственных колебаний в решение для скорости частицы, что позволяет получить приближение с большей точностью, чем в работах Хеммера [1] и Моколе [2]).

Показано, что при низких частотах силового нагружения эффектом дисперсии можно пренебречь: процесс подвода энергии качественно неотличим от того же процесса как в бесконечной цепочке Гука, так и в упругом стержне (см. [3]). Однако, поскольку скорость подвода энергии уменьшается с увеличением частоты нагружения, сама задача о подводе энергии в полубесконечную цепочку при силовом нагружении, вообще говоря, не может считаться симметричной относительно границы. Задача о подводе энергии при кинематическом нагружении (в отличие от силового) является симметричной относительно границы.

Для слабонелинейного случая получена асимптотическая аппроксимация полной энергии на больших временах (квазигармоническое приближение) с помощью выражения для ренормализованного (англ. renormalized) дисперсионного соотношения, полученного в [4] для периодической β -ФПУТ цепочки, но переписанного для полубесконечной β -ФПУТ цепочки. Квазигармоническое приближение для полной энергии позволяет оценить скорость закачки энергии на частотах нагружения, лежащих как в полосе пропускания, так и в запрещённой зоне. В частности, показано, что частота кинематического нагружения, при которой скорость закачки максимальна, увеличивается с ростом коэффициента нелинейности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00338 и гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Литература

1. P. C. Hemmer// Dynamic and stochastic types of motion in the linear chain, Norges tekniske hoiskole, 1959.
2. Mokole E. L., Mullikin A. L., Sledd M. B. Exact and steady-state solutions to sinusoidally excited, half-infinite chains of harmonic oscillators with one isotopic defect //Journal of mathematical physics. – 1990. – Т. 31. – №. 8. – С. 1902-1913.
3. Kuzkin V. A., Krivtsov A. M. Energy transfer to a harmonic chain under kinematic and force loadings: Exact and asymptotic solutions //Journal of Micromechanics and Molecular Physics. – 2018. – Т. 3. – №. 01n02. – С. 1850004.
4. Gershgorin B., Lvov Y. V., Cai D. Renormalized waves and discrete breathers in β -Fermi-Pasta-Ulam chains //Physical review letters. – 2005. – Т. 95. – №. 26. – С. 264302.

ОБЩЕЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ИЗОТРОПНОГО КРИТЕРИЯ ТЕКУЧЕСТИ ПРИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Лямина Е.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия
lyamina@inbox.ru

В теории пластичности часто принимается предположение о плосконапряженном состоянии. Этот класс задач имеет некоторые особенности, не присущие другим задачам. Примером таких особенностей может служить локальное утолщение вблизи поверхности отверстия, расширяющегося в тонкой пластине [1]. Следствием такого поведения решений является то, что некоторые деформации нельзя считать бесконечно малыми, что противоречит одному из основных предположений. В этом отношении аналитические и полуаналитические решения предпочтительнее численных, хотя они и ограничиваются более простыми краевыми задачами. В частности, в [2] было найдено несколько специальных аналитических решений для идеально жесткопластических материалов в условиях плосконапряженного состояния. Многие краевые задачи в условиях плосконапряженного состояния также являются осесимметричными [3, 4]. Как правило, даже в этих случаях и в предположении бесконечно малых деформаций для решения краевых задач необходим прямой численный метод. Исключением являются решения, основанные на критерии текучести Треска. Обзоры таких решений представлены в [5, 6]. В настоящей работе представлено общее осесимметричное упругопластическое решение в условиях плосконапряженного состояния. Используется теория пластического течения. Принимается произвольный изотропный критерий текучести, на который не налагается никаких ограничений, кроме стандартных ограничений, налагаемых общей теорией пластичности. Решение справедливо и для ортотропных критериев текучести, если главные оси анизотропии совпадают с координатными кривыми выбранной цилиндрической системы координат. В качестве примера рассмотрено плосконапряженное состояние осесимметричного полого диска, подверженного давлению на внутреннем и внешнем радиусах (рис. 1). Решение готово к практическому использованию. Достаточно лишь применить численный метод вычисления обыкновенных интегралов. Вспомогательные функции, введенные в ходе решения, позволяют единообразно использовать различные критерии текучести.

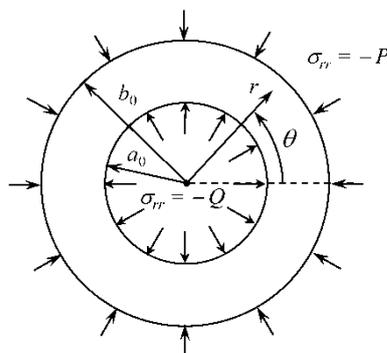


Рис. 1. Геометрические параметры диска и приложенные нагрузки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-21-00335.

Литература

1. R. Dębski, M. Życzkowski // *Z. angew. Math. Mech.*, 82 2002. 655–669
2. D. E. Panayotounakos, P. Andriotaki-Panayotounakou, G. Papandonopoulos // *Int. J. Non Linear Mech.*, 34 1999. 71–84
3. U. S. Dixit, S. M. Kamal, R. Shufen // *Autofrettage Processes: Technology and Modelling*. CRC Press. 2019.
4. S. Alexandrov // *Elastic/Plastic Discs Under Plane Stress Conditions*. Springer. 2015.
5. A. Prokudin // *J. Appl. Comput. Mech.*, 7 2021. 858–869
6. S. Kamal, U. Dixit // *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C*, 235:13 2021. 2452–2467

ПРОДОЛЬНАЯ МАГНИТОУПРУГАЯ ВОЛНА В СТЕРЖНЕ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЕГО МАТЕРИАЛА

Мальханов А.О., Леонтьева А.В., Ерофеев В.И.

*Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ "Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова
Российской академии наук", Россия
alexey.malkhanov@gmail.com*

В настоящее время интенсивно развивается механика поврежденных сред, изучающая как напряженно-деформированное состояние конструкций, так и накопление повреждений в их материалах [1 - 3]. При этом для ряда задач необходимо учитывать, что элементы конструкций работают в условиях взаимодействия с внешним магнитным полем, которое оказывает влияние на процессы формирования и распространения упругих волн. В публикуемой работе изучается продольная магнитоупругая волна в стержне с учетом поврежденности его материала. Проведенный анализ показывает, что низкочастотные возмущения обладают ярко выраженной частотно зависимой диссипацией и дисперсией, пропорциональными радикалу частоты при любых значениях параметра поврежденности. Высокочастотные возмущения, для после пороговых значений параметра поврежденности, распространяются практически без дисперсии, а затухание принимает постоянное значение, не зависящее от частоты. При до пороговых значений параметра поврежденности высокочастотные возмущения имеют постоянную длину волны, т.е. скорость распространения возмущения не зависит от частоты, а затухание линейно растет с увеличением частоты. Изменение параметра поврежденности может приводить к существованию как нормальной, так и аномальной дисперсий. При отсутствии поврежденности на всем интервале частот проявляется аномальная дисперсия. Наличие поврежденности в диапазоне до пороговых значений, близких к граничному значению позволяет получить нормальную дисперсию на ограниченном интервале частот. Для после пороговых положительных значений коэффициента поврежденности аномальная дисперсия наблюдается только на низких частотах. Определено, что баланс между упругой нелинейностью и диссипацией, вызванной поврежденностью материала, может привести к формированию локализованной слабой ударной волны деформации. Ширина ударной волны будет расти, а ее скорость будет уменьшаться с увеличением параметра, характеризующего поврежденность материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00613.

Литература

1. Kachanov, L. M., 1986. Introduction to Continuum Damage Mechanics, Springer, New York.
2. Rabotnov, Yu. N., 1969. Creep Problems in Structural Members. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. North-Holland Publishing Company, Amsterdam.
3. Maugin, G. A., 1992. The Thermomechanics of Plasticity and Fracture, Cambridge University Press, Cambridge.

О ДИНАМИКЕ МАЯТНИКОВЫХ ЧАСОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

Маркеев А.П.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия
anat-markeev@mail.ru*

Задача о движении тяжёлого твёрдого тела при наличии вибраций его точки подвеса имеет более чем столетнюю историю [1-9]. В докладе исследуется задача о влиянии периодических вибраций точки подвеса физического маятника на его нелинейные колебания в окрестности устойчивого положения равновесия на вертикали. Вибрации предполагаются периодическими и происходят в плоскости движения маятника.

Получены приближенные, не зависящие от времени, уравнения движения. Для случая колебаний маятника в окрестности вертикального положения равновесия, допускаемого приближёнными уравнениями, введены переменные действие – угол и методами КАМ-теории показано, что большинство траекторий приближённой системы сохраняется и в полной системе. В плоскости двух безразмерных параметров: амплитуды колебаний маятника и параметра, характеризующего разность величин интенсивности вибраций

точки подвеса по горизонтальному и вертикальному направлениям указаны области, в которых маятниковые часы спешат и области, в которых они отстают. Более подробное изложение результатов проведенного исследования можно найти в статье [10].

Работа выполнена в рамках Государственного задания (номер госрегистрации 124012500443-0) в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Литература

1. A. Stephenson . One a New Type of Dynamical Stability // Mem. and Proc. Manchester Literary and Phil. Soc. 1908. Vol. 52. Pt.2. № 8. P. 1-10.
2. П.Л. Капица. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // ЖЭТФ. 1951. Т.21. Вып. 5. С.588–597.
3. П.Л. Капица. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физ. наук. 1951. Т.44. Вып. 1. С.7–20.
4. Т.Г. Стрижак // Методы исследования динамических систем типа "маятник". Алма-Ата: Наука, 1981. 253 с.
5. И.И. Блехман // Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 394 с.
6. Б.С. Бардин, А.П. Маркеев . Об устойчивости равновесия маятника при вертикальных колебаниях точки подвеса // ПММ. 1995. Т.59. Вып.6. С.922-929.
7. О.В. Холостова // Задачи динамики твердых тел с вибрирующим подвесом. М.Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. 308 с.
8. В. И. Юдович. Вибродинамика и виброгеометрия механических систем со связями // Успехи механики. 2006. Т.4. № 3. С. 26–158.
9. А. П. Маркеев. Об уравнениях приближенной теории движения твердого тела с вибрирующей точкой подвеса // ПММ. 2011. Т.75. Вып. 2. С.193–203.
10. А. П. Маркеев. К задаче о точности хода маятниковых часов на вибрирующем основании // Изв. РАН. Механика твёрдого тела. 2018. №5. С.108-119.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ НА ВЫХОДЕ ИЗ ПЛОСКОГО КАНАЛА СТОКСОВОГО ТЕЧЕНИЯ

Марковский А.Н., Гамаюнова Д.Ю.

Кубанский государственный университет, Россия
mrkvsk@yandex.ru

Для краевой задачи бигармонического уравнения рассматривается проблема определения граничного условия на части границы при выполнении некоторых условий минимальности самого решения. Применяется проекционный алгоритм метода базисных потенциалов (фундаментальных решений), опирающийся на системы потенциалов, полные на границе области. Задача имеет гидродинамическую интерпретацию - определение профиля скорости на выходе из плоского канала для течения со среднеквадратической завихренностью. Такая задача может возникать, например, при моделировании дыхания в части бронхиального дерева человека. Приводятся результаты вычислительных экспериментов.

Литература

1. Лежнев В. Г., Марковский А. Н. Проекционные алгоритмы вихревых 2D течений в сложных областях // Таврический вестник информатики и математики, 2015, №1(26), 42–49
2. Лежнев А. В., Лежнев В. Г. Метод базисных потенциалов в задачах математической физики и гидродинамики. Краснодар: КубГУ, 2009
3. Лежнев В.Г., Марковский А.Н. Метод базисных потенциалов для неоднородного бигармонического уравнения // Вестник Самарского госуниверситета – Естественно научная серия, №8/1(67), 2008, 127–139
4. Марковский А. Н. Замкнутость бигармонической системы базисных потенциалов. Экологический вестник НЦ ЧЭС, 2020, Т. 17, № 1, Ч. 2, 20–26
5. Лежнев В.Г., Марковский А.Н. Проекционные алгоритмы вычисления потенциала Робена // Вычислительные методы и программирование, Т.20, 2019, 378–385
6. Boselli F., Obrist D., Kleiser L. A multilayer method of fundamental solutions for Stokes flow problems // Journal of Computational Physics, 231(18), 2012, 6139–6158
7. Sincich1 E., Šarler B. Non-singular method of fundamental solutions based on Laplace decomposition for 2D Stokes flow problems // CMES, 99:5, 2014, 393–415
8. Медведев А.Е., Гольшева П.С. Моделирование движения воздуха в легких человека при дыхании. Динамика осаждения капель жидкости при применении аэрозольных форм лекарственных средств // Матем. биология и биоинформ., 16:2 (2021), 422–438

ПРОЧНОСТНЫЕ ОТКАЗЫ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Марчук Н.А., Зеньков Е.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия
fts07@mail.ru

В настоящее время в гражданской авиации используется большое количество различных типов двигателей, в процессе эксплуатации которых выявляются отказы и неисправности, связанные с разрушением различных конструктивных элементов из-за несовершенства их конструкции, технологии производства или ремонта и нарушения правил эксплуатации. Разнообразный характер отказов и неисправностей отдельных узлов и агрегатов при эксплуатации силовых установок в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода к анализу их состояния.

Одной из основных причин отказов по прочности являются: усталостные трещины на разных деталях двигателя, приводящие к разрушению этой детали. Трещины и обрывы лопаток компрессора и турбин встречаются практически на всех типах газотурбинных двигателей (ГТД). Подавляющее большинство поломок компрессорных лопаток и очень многие поломки турбинных лопаток имеют усталостный характер. Трещины и разрушения дисков турбин и компрессоров относятся к наиболее опасным видам отказов, так как при обрыве части диска разрушения во многих случаях обычно не локализируются в пределах корпуса двигателя [1]. Усталостные трещины чаще всего зарождаются в замковой части лопаток. Рабочие лопатки турбины эксплуатируются в сложных условиях и подвергаются воздействию сложного спектра динамических и статических нагрузок. В связи с большим количеством запусков и выключений двигателей, а также многократными изменениями режимов их работы, лопатки турбины подвергаются многократным циклическим изменениям теплового и напряженного состояний.

Высоконагруженные детали и элементы летательных аппаратов и двигателей, в частности, диски компрессоров и турбин, в процессе эксплуатационных нагрузок испытывают, как правило, сложное напряженно-деформированное состояние (НДС), в частности, двухосное НДС, а его наиболее опасный вид характеризуется двухосным растяжением. Указанное состояние деталей и элементов определяет их прочность и ресурс работы.

Условия разрушения деталей машин при сложном напряженном состоянии хорошо описываются так называемыми объединенными критериями прочности, учитывающих сложный характер деформирования в момент разрушения деталей. Оценка прочности при этом осуществляется на основе расчетно-экспериментального исследования, требующего знания как характеристик напряженного состояния в момент разрушения, так и прочностных характеристик (параметров) материала детали. Актуальность проблемы определяется тем, что точность указанных критериев ограничена в силу различия напряженного состояния стандартных образцов при их типовых испытаниях, входящих в уравнение предельного состояния этих критериев в виде неизменных прочностных параметров, и реального вида напряженного состояния оцениваемой детали [2].

Литература

1. Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 годы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 81–90. doi:10.21685/2307-42.
2. Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик, А.А. Пыхалов Методика расчета на прочность деталей машин с учетом вида напряженного состояния // Механики XXI века. 2015. № 14 С.

УСТОЙЧИВОСТЬ ОДНОМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ СМЕСИ ЧЕРЕЗ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ПРОТИВ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Марышев Б.С., Клименко Л.С., Колчанов Н.В.

Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН, Россия
bmaryshev@mail.ru

Рассмотрена задача о конвективной устойчивости одномерного течения в прямоугольной области пористой среды. Течение возникает при транспорте порции тяжелой примеси через рассматриваемую область снизу вверх. Такая постановка задачи была использована в эксперименте [1] где наблюдалось возникновение неустойчивости. Между горизонтальными границами задаётся постоянный перепад давления, на верхней границе условие свободного протекания, а на нижней границе заданный поток примеси зависящий от времени. Вертикальные границы считаются непроницаемыми (см. Рис.1). Предполагается развитие неустойчивости Релея-Тейлора на нижнем фронте. Задача решается в приближении Дарси-Буссинеска транспорт примеси описывается в рамках нелинейной МММ (Mobile-Immobile Media) модели [2].

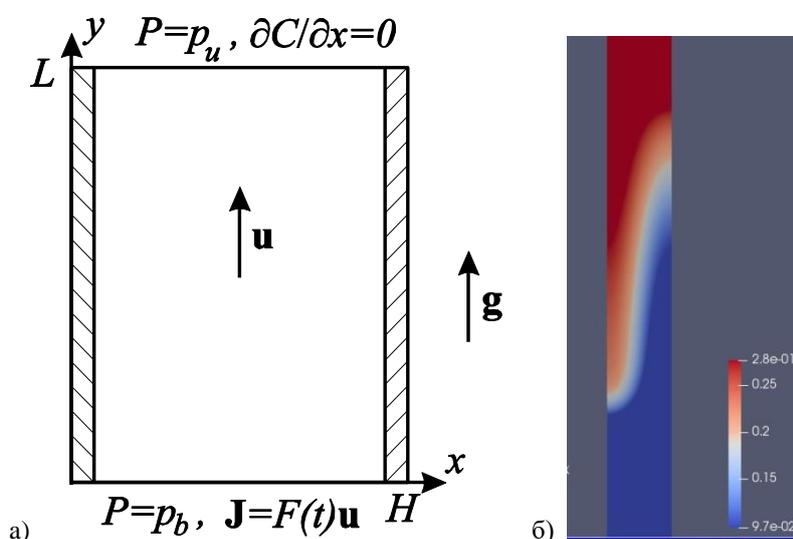


Рис. 1. Принципиальная схема задачи (а). Поле концентрации с возникающей неустойчивостью (б)

Получены и обсуждены зависимости критического времени от параметров транспорта. Сравнение такого времени с экспериментальными данными показывает, что механизм неустойчивости и модель процесса переноса адекватны изучаемой задаче. Показано, что неустойчивость носит абсолютный характер. На нижнем фронте концентрационного импульса развивается неустойчивость Релея-Тейлора. При чем время развития всегда меньше времени прохождения импульса через область. Исследовано влияние параметров задачи на характерное время возникновения неустойчивости. Проанализированы способы увеличения этого времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-11-20125.

Литература

1. Н. В. Колчанов, Е.А. Колчанова Исследование перераспределения примеси NaCl в потоке воды сквозь пористую среду в вертикальной круглой трубе // Пермские гидродинамические научные чтения: сборник статей по материалам VIII Всероссийской конференции. 2022. 239–242.
2. Н. М. Selim Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environmental Health Perspectives, 83 1989. 69–75.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА

Матвеева А.И., Авдонюшкин Д.В., Новокшенов А.Д., Боровков А.И.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия*
matveeva_ai@spbstu.ru

Искусственный интеллект все чаще применяется для решения задач вычислительной механики. Методы машинного обучения и нейронные сети могут быть использованы для создания суррогатных моделей, которые аппроксимируют поведение исходных моделей. Данный подход позволяет существенно сократить время выполнения вычислений и использование вычислительных ресурсов. Суррогатные модели достигают наибольшей эффективности в задачах, требующих длительного расчетного процесса, и в задачах с множеством варьируемых параметров.

С целью определения эффективности применимости суррогатных моделей в контексте прикладных задач в данной статье был произведен сравнительный анализ численных методов, лежащих в основе суррогатных моделей и моделей пониженного порядка. В качестве исследуемых методов были выбраны нейронная сеть, регрессия гауссовского процесса и метод ортогонального разложения (proper orthogonal decomposition). Реализация данных методов была выполнена на языке программирования Python, используя современные библиотеки и инструменты для машинного обучения.

Для создания архитектуры нейронной сети, способной обрабатывать как статические данные, так и временные ряды, была применена библиотека Keras. Данный выбор обусловлен широким функционалом библиотеки, а также ее простотой использования и возможностью реализации различных моделей нейронных сетей. В качестве метода обучения нейронных сетей был выбран стохастический градиентный спуск (stochastic gradient descent, SGD), который является одним из наиболее распространенных и эффективных методов оптимизации для обучения нейронных сетей. Кроме того, для обучения нейронной сети также был использован алгоритм Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt), его преимущество заключается в использовании квадратичной аппроксимации функции ошибки, что позволяет ему эффективно находить оптимальные параметры нейронной сети даже в случае сильно нелинейных зависимостей между входами и выходами.

В контексте суррогатного моделирования регрессия гауссовского процесса может быть использована для создания аппроксимации сложных функций аналогично нейронным сетям. Преимущество метода заключается в построении вероятностной меры, заданной на пространстве функций, при этом используется предположение, что восстанавливаемая функция принадлежит классу гауссовских случайных процессов

Метод ортогонального разложения представляет собой технику снижения размерности модели путем выделения главных ортогональных базисных функций. В данном методе искомое решение аппроксимируется с помощью взвешенной суммы базисных функций.

Используя рассмотренные методы, были разработаны и изучены суррогатные модели и модели пониженного порядка для различных задач вычислительной механики. Проведенный анализ продемонстрировал эффективность применения данных методов, а также выявил их преимущества и ограничения. Данный сравнительный анализ позволяет определить наиболее подходящий метод для конкретной инженерной задачи, учитывая ее уникальные требования и особенности.

ОБ АНАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ ДИСПЕРСИОННЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ВОЛНОВЕДУЩЕЙ СРЕДЫ ЭЙРИ

Мацковский А.А.¹, Заворохин Г.Л.¹, Петров П.С.²

*1 - Санкт-Петербургское отделение Математического института
им. В. А. Стеклова РАН, Россия*

2 - Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва ДВО РАН, Россия
zavorokhingerman@gmail.com

Исследована структура волнового поля в неограниченном по глубине модельном волноводе Эйри - рассмотрена задача о распространении волн вблизи раздела изоскоростной среды и волноведущей среды Эйри,

характеризующейся линейным изменением квадрата показателя преломления с глубиной. Получено дисперсионное уравнение, не содержащее специальных функций, которое редуцировано к нелинейному обыкновенному дифференциальному уравнению псевдопервого порядка. Построены асимптотические решения дисперсионного уравнения для модельного волновода Эйри (без скачка плотности на границе раздела сред).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00171.

УПРАВЛЕНИЕ ЧЕТЫРЕХЗВЕННЫМ РОБОТОМ НА РУКОХОДЕ

Голубев Ю.Ф.^{1,2}, Мелкумова Е.В.²

1 - Институт прикладной математики имени М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия

2 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
elena_v_m@mail.ru

Тренажёр рукоход часто встречается на детских площадках и в спортивных комплексах. В работе рассматривается задача о перемещении четырёхзвённого робота-гимнаста между перекладинами рукохода. Проблема имеет отношение также к преодолению антропоморфным роботом препятствий. Описываются такие виды движения робота-гимнаста, как раскачивание на перекладине до угла, достаточного для зацепления на следующей перекладине, когда расстояние между перекладинами может быть больше размаха рук, дальнейшее зацепление и успокоение гимнаста, а также частный случай свободного полёта (Рис. 1). Вывод уравнений движения следует из теоремы об изменении кинетического момента системы [1].

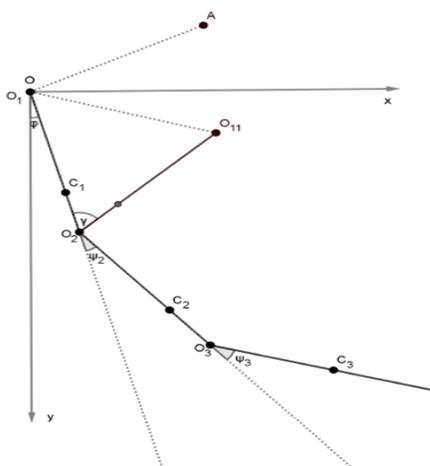


Рис. 1. Робот-гимнаст

Раскачивание и успокоение при этом происходят оптимально с точки зрения максимизации амплитуды на каждом полупериоде колебаний. Проведено численное моделирование процесса раскачивания, подтверждающее аналитические результаты. Проанализирован частный случай движения робота в свободном полёте, реализующий на коротком промежутке времени максимально высокое поддержание рук. Численное моделирование при некоторых параметрах робота демонстрирует возможности перелёта робота на расстояния, в несколько раз превышающие длину руки робота. Однако предложенный алгоритм не является универсальным, поэтому требует дальнейшего изучения и анализа. Пользуясь полученным законом управления, получаем увеличение амплитуды колебаний на каждом полупериоде. Таким образом, в определённый момент времени происходит достижение требуемого угла отклонения первого стержня. Считаем, что при достижении этого угла остальные два фиксируются. В этот момент происходит отцепление системы от точки подвеса и закрепление её в верхней точке "отклоненной руки". При этом система представляет собой твёрдое тело и испытывает удар. Определяется угловая скорость после удара. Проведено численное моделирование процесса раскачивания, подтверждающее аналитические результаты [2].

Литература

1. Ю.Ф. Голубев // Оптимизация колебаний механических систем с трением, Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления, том 512, 2023. С. 18–26.
2. Ю.Ф. Голубев, В.В. Корянов, Е.В. Мелкумова // Выход робота из аварийной ситуации на спине, XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов в 4 томах, 21–25 августа, Т. 1. Общая и прикладная механика. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. С. 166–168.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Меркулов Д.И., Меркулова И.И., Пелевина Д.А., Турков В.А., Налетова В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
merkulovdima@mail.ru

В статье [1] получена формула для силы, действующей на тело из анизотропного намагничивающегося материала, в неоднородном магнитном поле. В представленной работе исследуется движение сферических тел из анизотропного намагничивающегося эластомера (АНЭ), расположенных на наклонной плоскости (Рис. 1) либо жестко закрепленных на свободном конце маятника (Рис. 2), под действием силы из [1]. Также рассматривается взаимодействие двух сферических анизотропных намагничивающихся тел в однородном магнитном поле (Рис. 3). С использованием сферических тел из АНЭ можно изготовить мобильные роботы, аналогичные рассмотренным в статье [2]. В экспериментах обнаружено отклонение сферических тел из АНЭ от вертикальной оси электромагнитной катушки при движении по наклонной плоскости. При этом в зависимости от тока в катушке и угла наклона плоскости возможны четыре режима движения: тело не движется, тело движется по плоскости и останавливается на ней, тело движется по плоскости и затем всплывает, тело всплывает сразу при включении тока. Также обнаружено отклонение маятника с анизотропным телом на конце под действием неоднородного магнитного поля.

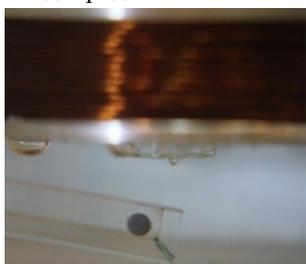


Рис. 1. Движение тела из АНЭ по наклонной плоскости



Рис. 2. Движение маятника с телом из АНЭ на конце

В предлагаемой работе получена и исследована сила взаимодействия двух сферических анизотропных намагничивающихся тел в однородном магнитном поле, как сила взаимодействия двух диполей с магнитными моментами специального вида. Вычислены соответствующие магнитные моменты. Разработана компьютерная программа для вычисления данной силы при различных магнитных полях и направлениях векторов ориентации анизотропии в телах (Рис. 3). Например, на Рис. 4 приведен график зависимости проекции магнитной силы на ось, соединяющую центры тел, от угла наклона сонаправленных векторов ориентации анизотропии тел в вертикальном однородном магнитном поле.

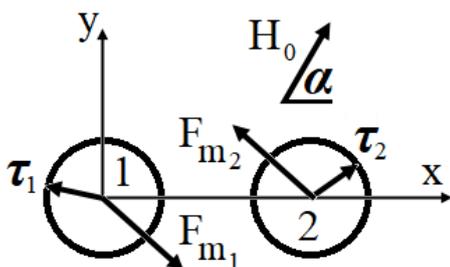


Рис. 3. Взаимодействие двух сферических тел из АНЭ

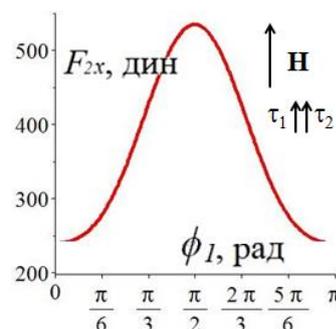


Рис. 4. Зависимость магнитной силы от ориентации тел

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 20-71-10002, <https://rscf.ru/project/20-71-10002/>.

Литература

1. Demin A.A., Merkulov D.I., Pelevina D.A., Kalmykov S.A., Naletova V.A. // Magnetohydrodynamics, 55:3 2019. 347–352.
2. Merkulov D.I., Pelevina D.A., Turkov V.A., Vinogradova A.S., Naletova V.A. // Acta Astronautica, 181 2021. 579–584.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД. УЧЕТ СТОХАСТИЧНОСТИ

Мещеряков Ю.И., Кучмин А.Ю., Жигачёва Н.И., Диваков А.К., Коновалов Г.В.

ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
ym38@mail.ru

Для учета влияния стохастичности на процесс распространения ударной волны в твердом теле используется система уравнений континуальной теории дислокаций [1], в которой тензор плотности потока дислокаций выражается через функцию распределения дислокаций по скоростям [2].

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_i} = \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial t} - J_{ik}; \quad \rho \frac{\partial v_k}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_i}; \quad \sigma_{ik} = c_{iklm} \varepsilon_{lm} \quad J = b \int_{-\infty}^{\infty} v f_1(v) dv$$

Для нахождения функции распределения дислокаций по скоростям используется релаксационная форма кинетического уравнения [3]

$$\frac{\partial f^{(0)}}{\partial t} + v_i \frac{\partial f^{(0)}}{\partial x_i} + \tau \varepsilon_{ikl} b_k \sigma_{mn} \frac{\partial f^{(0)}}{\partial v_m} = \frac{f - f^{(0)}}{\tau}.$$

В итоге, уравнение распространения ударной волны имеет нелинейную форму, в которой стохастичность присутствует в виде дисперсии скорости, D' (второго статистического момента функции распределения дислокаций по скоростям), коэффициента торможения дислокаций, B , и времени релаксации структуры, τ

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial t} [Lu + Mu^2] = 0 \quad L = 2\tau \left(\frac{B}{m} D_2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad M = 2\tau \rho C \frac{b}{m} \left(\frac{D_2 m}{\pi B} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ударное нагружение алюминиевого сплава 1565 выявило критическое значение скорости деформации, при которой происходит переключение режима распространения ударной волны от затухания к локальному ускорению. Этот момент соответствует изменению знака дефицита массовой скорости (Рис. 1а). на плато импульса сжатия, ΔU . Микроструктурные исследования выявили наличие локальной сбросовой деформации при скорости ударника 625 м/с. (Рис. 1б).

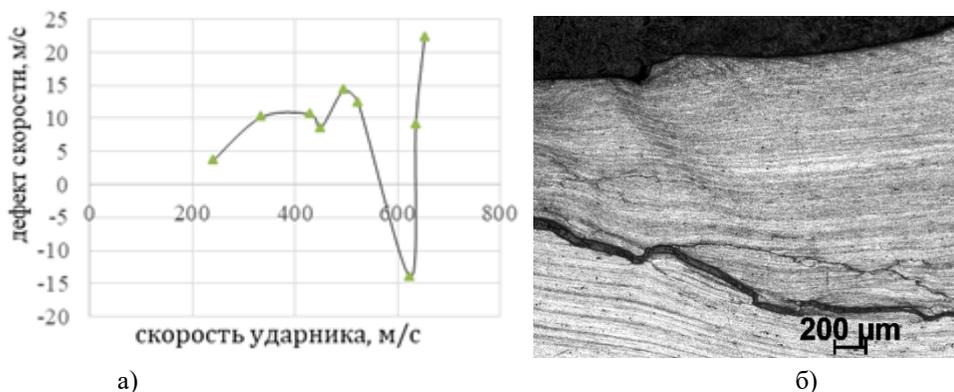


Рис.1. а) Зависимость дефекта скорости, ΔU , (3) от скорости ударника в алюминиевом сплаве 1565 при скорости 625 м/с

б) Полоса сброса в ударно-деформированной мишени ал.1565 как результат отрицательного значения дефекта скорости

Литература

1. А.М. Косевич, Дислокации в теории упругости. «Наукова думка».1979. 215 с
2. Y.I. Meshcheryakov. Multiscale Mechanics of Shock Waves Processes. 2021. Springer Nature Singapore. 192 p. <http://doi.org/101007/978-981-16-4530-3>
3. T. Kihara, O. Aono. J. of the Physical Society of Japan. 1963..18. 5. .837 – 851

ДИСЛОКАЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОГРАФЕНОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Микаелян К.Н.¹, Гуткин М.Ю.^{1,2,3}, Шейнерман А.Г.^{1,3}

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
2 - Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
3 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
kristy_mik@mail.ru

Недавние экспериментальные исследования показали, что введение графеновых пластин или нанолент в металлическую матрицу может увеличить предел текучести и напряжение течения материала при сохранении хорошей пластичности. Наблюдаемое увеличение предела текучести за счет графеновых пластин объясняется перераспределением нагрузки на графеновые пластины, напряжениями термического несоответствия между металлической матрицей и графеном, возникающими в процессе охлаждения образца при его изготовлении, и препятствием включений графена расширению дислокационных петель, причем последний механизм упрочнения считается основным. Важная роль графеновых включений как препятствий для расширения дислокационных петель подтверждается наблюдениями дислокаций вблизи графеновых пластинок в металлических слоях металлграфеновых многослойных композитов и в обычных металлграфеновых нанокompозитах с ультрамелкозернистой металлической матрицей.

Недавно была предложена теоретическая модель передачи пластической деформации через слои графена в ситуации, когда однослойные или многослойные листы графена пересекают весь композит. Было показано, что такая передача пластической деформации через включения графена может происходить за счет образования и расширения дислокационных петель в полях напряжений дислокационных скоплений в соседних металлических слоях. В настоящей работе разработана теоретическая модель, описывающая перенос дислокационного скольжения через границы зерен в металлграфеновом нанокompозите в общем случае, когда включения графена распределены вдоль границ зерен случайным образом. Предполагалось, что пластическая деформация происходит за счет образования петель полных или частичных дислокаций. Эти петли зарождаются на границах зерен в металлической матрице и расширяются внутри зерен. Образовавшиеся в результате дислокационные петли способствуют зарождению и расширению вторичных дислокационных петель в соседних зернах, тем самым реализуя передачу дислокаций через границы зерен. В рамках модели были рассчитаны критические напряжения τ_{c1} – для образования вторичной полной совершенной или частичной дислокационной петли, и τ_{c2} – для обхода включения графена этой вторичной петлей. Показано, что критическое напряжение τ_{c2} может в среднем возрастать с увеличением концентрации графена. Это означает, что добавление графена может повысить критическое напряжение для расширения петель вторичных дислокаций и, таким образом, увеличить предел текучести металлов.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ТРАНСПОРТЕ ШЛАМА БУРОВЫМИ ЭМУЛЬСИЯМИ С ДОБАВКОЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Жигарев В.А., Минаков А.В., Шебелев А.В., Лысакова Е.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
vzhigarev@sfu-kras.ru

Для апробации разрабатываемых математических моделей учитывающих движение шлама при многофазном течении бурового раствора было проведено сравнение результатов расчётов полученных при

помощи численного моделирования на программном комплексе ANSYS Fluent и отечественном программном комплексе σ Flow. Рассмотрено исследование транспорта шлама в горизонтальной скважине буровым раствором на углеводородной основе, модифицированным многостенными углеродными нанотрубками. В программном комплексе Fluent использовалась модель смеси для гранулированных сред [1]. Для численного моделирования использовалась программа σ Flow с одножидкостной моделью [2].

Расчетная область представляет собой кольцевой канал, образованный двумя гладкими прямыми трубами круглого сечения. Для расчёта течений в скважине при прокачивании модифицированного бурового раствора выбраны типичные параметры процесса бурения наклонно-направленных скважин описанная нами ранее [3]. Реология буровых растворов задавалась из экспериментальных данных, полученных в эксперименте. Неньютоновские свойства описываются с помощью модели Гершеля-Балкли. Для описания турбулентных характеристик течения использовалась двухпараметрическая модель турбулентности $k-\omega$ SST [5]. Для описания многофазности в программном пакете Fluent использовалась модель смеси. В программном пакете σ Flow также $k-\omega$ SST. Представлены результаты численного моделирования распределения осевой скорости бурового раствора на выходе из кольцевого канала для базового раствора. (см. рис.1).

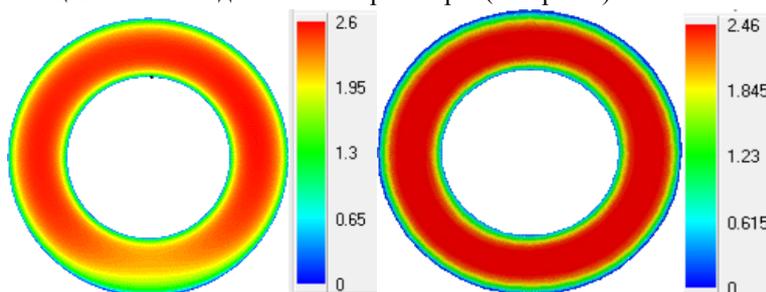


Рис. 1. Осевая скорость бурового раствора на выходе из кольцевого канала для массовой концентрации МУНТ в буровом растворе 0 %, слева расчет σ Flow, справа Fluent..

В обоих пакетах было проведено исследование влияния концентрации углеродных нанотрубок на характеристики течения и эффективность выноса шлама из скважины. В результате кросс-верификации пакетов было показано, что программные пакеты дают в целом достаточно близкие результаты. Отличие результатов расчётов по перепаду давления составляет величину порядка 3 %, отличие по интегральной эффективности выноса шлама из кольцевого канала – около 1 %.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

Литература

1. A.V. Minakov, et al. The effect of nanoparticles additives in the drilling fluid on pressure loss and cutting transport efficiency in the vertical boreholes // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2008. – V.171. – P. 1149-1158.
2. А.А Гаврилов, А.В. Шебелев Реологическая модель турбулентных течений суспензий в горизонтальных каналах // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. Т. 27, № 3 С. 403-421.
3. Zhigarev, V.A. Numerical study of the cuttings transport by drilling mud in horizontal directional well / V.A. Zhigarev et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1382. – P. 1-6.
4. Gidaspow, D. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach // Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, Engineering Foundation, The United States. – 1991. – P. 75-82.

ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ВОЛНЫ В ВОДОПОДОБНОМ ЦИЛИНДРЕ

Миронов М.А., Шуляпов С.А., Савицкий О.А., Пятаков П.А.

*АО "Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева", Россия
mironov_ma@mail.ru*

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распространения осесимметричных волн в твердом волноводе круглого сечения со свободной боковой поверхностью (так называемая задача Похгаммера-Кри), выполненном из водоподобной среды. Под водоподобной средой

понимается среда, в которой скорость распространения сдвиговых волн существенно меньше скорости распространения продольных волн. Эквивалентным критерием водоподобности среды является близость значения ее коэффициента Пуассона к 0.5. Основным результатом сообщения состоит в следующем. Дисперсионное уравнение, связывающее волновое число нормальной волны с частотой для водоподобной среды, мало отличается от дисперсионного уравнения для жидкой, невязкой среды. Соответственно, скорости распространения нормальных волн в водоподобном цилиндрическом волноводе, с большой степенью точности равны скоростям распространения нормальных волн в жидком цилиндре. Вычислена поправка к волновым числам собственных волн жидкого цилиндра, вызванная конечным модулем сдвига. Она стремится к нулю обратно пропорционально частоте. Этот результат радикально отличается от поведения волн в неводоподобных цилиндрах (коэффициент Пуассона меньше 0.4), где скорости распространения нормальных волн на высоких частотах равны, приблизительно, скорости рэлеевской волны на плоской границе (см. напр. [1-5]). В сообщении анализируется структура поля смещений в нормальных волнах, относительный вклад потенциальной и сдвиговой компонент. Демонстрируются формы импульсов, экспериментально полученные в полиуретановом цилиндре.

Литература

1. J. Zemanek An Experimental and Theoretical Investigation of Elastic Wave Propagation in a Cylinder. The Journal of the Acoustical Society of America 51, 265 (1972); doi: 10.1121/1.1912838
2. V. V. Meleshko, A. A. Bondarenko, S. A. Dovgij, A. N. Trofimchuk, and G. J. F. van Heijst // Elastic waveguides: history and the state of the art. Journal of Mathematical Sciences, Vol. 162, No. 1, 2009
3. G. Valsamos, F. Casadei, G. Solomos. A numerical study of wave dispersion curves in cylindrical rods with circular cross-section. Applied and Computational Mechanics 2013, 7, 99–114
4. С.В. Кузнецов, А. В. Ильяшенко. Поляризация волн Похгаммера–Кри: аксиально симметричные продольные моды // Акустический журнал, 2018, том 64, № 6, с. 657–663.
5. Т. А. Гаджибеков, А. В. Ильяшенко Теоретические аспекты применения волн Похгаммера–Кри к задачам определения динамического коэффициента Пуассона // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела 2021, №5, с. 113–126.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОРОГ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

Михайлова Н.В., Смирнов И.В., Якупов Б.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
n.v.mikhailova@spbu.ru

Понимание распространения акустических волн в жидкостях является важным аспектом для различных инженерных приложений. Вместе с тем появление кавитации - образование и коллапс парогазовых пузырей из-за областей низкого давления в жидкости - может быть проблемой или желаемым эффектом, в зависимости от конкретной ситуации. Для решения фундаментальных и практических проблем, связанных с кавитацией, важно иметь знания об ультразвуковых параметрах, которые приводят к наступлению кавитации при определенных внешних условиях. Эти знания являются необходимыми для проектирования систем, которые могут либо минимизировать, либо эффективно использовать кавитацию.

В данном исследовании мы провели эксперименты для изучения порога акустической кавитации. Эксперименты проводились с использованием различных частот ультразвука и путем изменения внешнего давления, мощности излучателя и температуры жидкости. Эксперименты были проведены с использованием подсолнечного масла в качестве жидкой среды. Результаты испытаний предоставили сведения о том, как порог кавитации изменяется со временем при изменении мощности ультразвукового воздействия. Кроме того, мы также исследовали влияние внешних колебаний давления на начало кавитации.

Полученные результаты наших экспериментов вносят вклад в общее представление о процессах кавитации. Они предоставляют важные данные, которые могут быть использованы для верификации и улучшения теоретических моделей, разработанных для прогнозирования начала и поведения кавитации. Связывая теорию с экспериментальными наблюдениями, это исследование открывает путь к более точным и надежным предсказаниям динамики кавитации в практических приложениях.

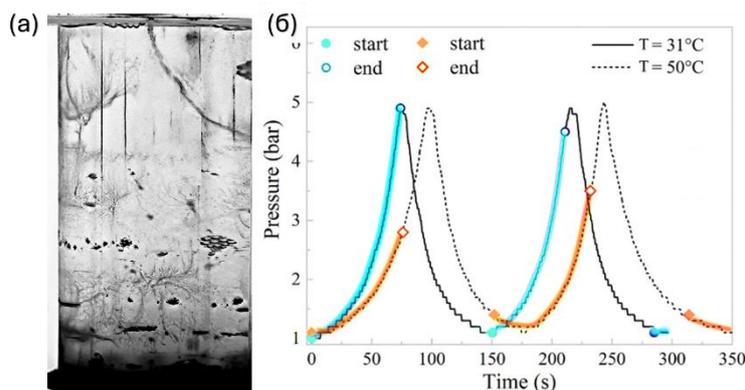


Рис. 1. (а) Активная акустическая кавитация. (б) Возникновение кавитации при изменении внешнего давления в течение времени

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта мегагранта (соглашение No. 075-15-2022-1114 от 30.06.2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОРШНЕВАНИЯ В ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ

Михеев Е.В.¹, Силов В.Ю.², Гарифуллина Р.А.², Щербинин С.А.^{1,3}

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

2 - ООО Группа компаний "Газпром нефть", Санкт-Петербург, Россия

*3 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
mchave21@outlook.com*

Настоящая работа посвящена исследованию эффекта поршневания в газовых скважинах, выражающегося в колебаниях газа внутри скважины при её остановке. Предложен метод обработки экспериментальных данных, позволяющий получить параметры колебательного процесса (частоту и коэффициент затухания) по кривым восстановления давления. На основе [1] разработана математическая модель динамики газа в вертикальной скважине, учитывающая свойства газа и особенности строения скважины, в частности, наличие внутри эксплуатационной колонны скважины второй — лифтовой — колонны. С использованием разработанной модели построен алгоритм нахождения параметров собственных колебаний газа: их частоты и интенсивности затухания. Осуществлен анализ влияния геометрических параметров скважины и фильтрационных свойств пласта на параметры колебательного процесса. Произведена валидация математической модели на доступных скважинных исследованиях.

Литература

1. В. Ш. Шагапов, Р. А. Башмаков, Г. Р. Рафикова, З. З. Мамаева. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, №4, С. 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Митрофанов А.А.

*Томский государственный университет, Томск, Россия
moiseeva_km@t-sk.ru*

Доклад посвящен исследованию нестационарной скорости горения смесового твердого топлива (СТТ) при колебательном изменении давления в камере сгорания. Задача решается на основе сопряженной модели горения СТТ, предложенной в [1]. Полагается, что при горении СТТ под поверхностью топлива имеется прогретый слой, в котором происходит экзотермическая химическая реакция разложения. Над поверхностью СТТ при достаточной глубине разложения появляются газообразные продукты, способные дореагировать в

газовой фазе. Экзотермическая химическая реакция в газовой фазе повышает температуру газа. Вдали от поверхности все химические реакции заканчиваются. Над поверхностью горения давление меняется во времени по заданному закону. Теплофизические характеристики твердой фазы не зависят от температуры. Скорость химической реакции в газе (над поверхностью топлива) зависит от температуры по закону Аррениуса. Учитывается расширение газа при его нагревании.

Система уравнения физико-математической модели над поверхностью твердого топлива состоит их уравнений сохранения массы, импульса и энергии для сжимаемого газа с учетом теплопроводности, уравнений баланса массы окислителя в газе с учетом диффузии и уравнением состояния газа. На поверхности топлива ставятся граничные условия сопряжения, обеспечивающие выполнение сохранения потоков энергии и массы компонентов. На правой границе области для газа полагается истечение продуктов сгорания в объем с заданным давлением, возможно переменным во времени. Метод численного решения системы уравнений математической модели подробно изложен в [2] и основан на методе С. К. Годунова [3].

На рисунке 1 представлены результаты решения задачи. Представлены зависимости скорости горения твердого топлива от времени, построенные при разной частоте колебаний давления над поверхностью топлива.

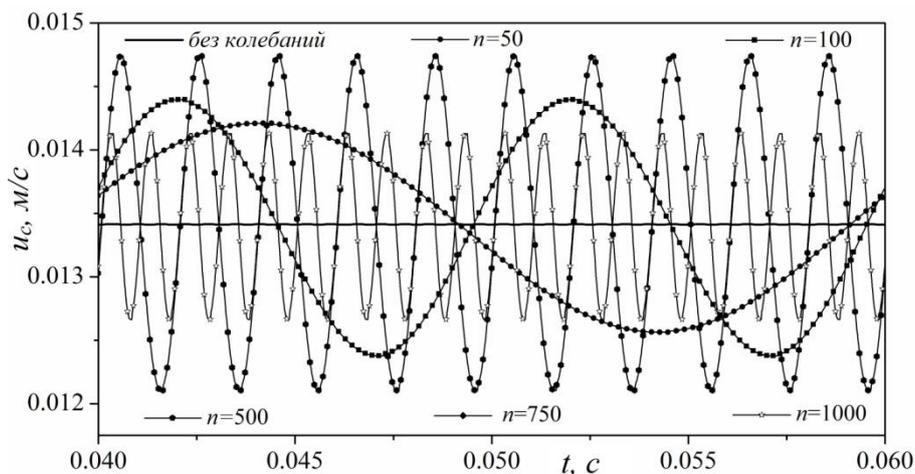


Рис. 1. Зависимость скорости горения твердого топлива от времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-21-00071.

Литература

1. В. А. Порязов, А.Ю. Крайнов Математическая модель и расчет нестационарной скорости горения металлизированных твердых ракетных топлив, Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, 50 2017. 99-111.
2. В. А. Порязов, К. М. Моисеева, А.Ю. Крайнов Исследование горения смесового твердого топлива с добавкой порошка бора, Физика горения и взрыва, 58 5 2022. 106-114. .
3. С. К. Годунов, А. В. Забродин, и др. // Численное решение многомерных задач газовой динамики. 1976. 400 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Глеуленов Р.Р.

Томский государственный университет, Россия
moiseeva_km@t-sk.ru

На основе физико-математической модели [1 – 2] исследованы закономерности горения пропановоздушной смеси в замкнутом канале с переменным поперечным сечением. Задача поставлена в двумерной осесимметричной постановке. Предполагается, что воспламенение газовой смеси происходит с одного из концов канала. Основные допущения физико-математической модели соответствовали [2]. В газе протекает экзотермическая химическая реакция второго порядка, первого по окислителю и по горючему. Теплоотдача излучением от продуктов сгорания не учитывается. Диссоциация молекул продуктов сгорания при

высокой температуре также не учитывается. Коэффициенты диффузии и теплопроводности зависят от температуры. Газовая постоянная определяется составом смеси. Учитывается тепловое расширение и последующее движение газа.

Физико-математическая постановка задачи определяется уравнениями сохранения массы, импульса и энергии газа, сохранения массы горючей компоненты и окислителя в газе, записанными в двухмерной осесимметричной постановке. На стенках канала задаются условия непротекания. Задача сформулирована с помощью системы уравнений сохранения массы, импульса и энергии газа в двумерной осесимметричной постановке. Учитываются процессы теплопроводности, вязкости и диффузии газа. Вязкость газа определяется соотношениями [3, 4]. Метод решения задачи был основан на методе Ван Леера [5].

Схема канала показана на рисунке 1. Общая длина канала составляла L , длина канала до расширения – L_m . Радиус широкого канала был равен R , радиус узкого канала задавался равным R_m . В начальный момент времени в очаге возгорания формируется область с повышенной температурой газа. Газ воспламеняется от очага и начинается развитие горения.

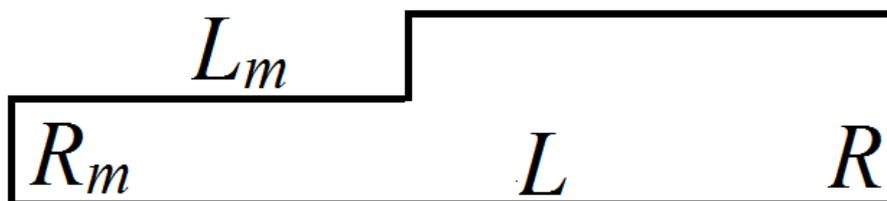


Рис. 1. Схема канала.

Из решения задачи определялась видимая скорость горения пропано-воздушной смеси и форма фронта пламени в зависимости от состава газа и соотношения между радиусами канала. Показано искривление фронта горения при высоких концентрациях метана в газе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-71-10034.

Литература

1. К.М. Моисеева, А. Ю. Крайнов Закономерности распространения пламени пропано-воздушной смеси в цилиндрическом канале, Сибирский журнал индустриальной математики, 26 1 2023. 108–117.
2. К.М.Моисеева, А.Ю. Krainov, D.A. Krainov Combustion of aluminum powder-air suspension in a swirl flow, Eurasian Physical Technical Journal, 18 12 202. 47–55.
3. А. М. Липанов // Теоретическая гидромеханика ньютоновских сред, 2011. 552 с.
4. К. К. Kuo // Principles of Combustion. 2nd Edition. 2005.
5. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's method, Journal of Computational Physics, 32 1 1079. 101–136.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КONTИНУАЛЬНОМ И ДИСКONTИНУАЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИЯХ

Мартыненко С.И., Токталиев П.Д., Дорощенко С.О., Молоканов А.А.

*Институт проблем Федеральний исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, Россия
martyn_s@mail.ru*

В докладе рассмотрен новый подход к математическому моделированию различных физико-химических процессов на примере задач гидродинамики и конвективного теплообмена. В основе подхода лежит строгое соответствие методов математического моделирования ранее разработанным физическим теориям.

В истории гидродинамики можно выделить три основных периода: аналитический, переходный и вычислительный в зависимости от способа построения математических моделей и используемых методов решения основополагающих уравнений [1]. В аналитический период были получены основные дифференциальные уравнения механики жидкости и газа, для решения которых использован аппарат дифференциального и интегрального исчисления. Для этого пришлось принять грубые допущения типа континуального приближения. Точные решения были получены для простейших задач. С появлением первых

компьютеров стали использовать численные методы для решения уравнений Навье-Стокса, то есть произошла смена математического аппарата для решения дифференциальных основополагающих уравнений. Вычислительный период основан на построении моделей различных физико-химических процессов, согласованных с вычислительным алгоритмом и разработанными ранее физическими теориями [2].

Простейший подход к выводу основополагающих уравнений состоит в выделении произвольного контрольного объема и записи фундаментальных законов сохранения массы, импульса энергии и других. Недостающие связи между неизвестными функциями восполняются феноменологическими законами. Реальную среду заменяют фиктивной бесконечно делимой сплошной средой. Стягивание контрольного объема в точку приводит к дифференциальным уравнениям, связывающих физически бессмысленные функции в точках (t, x, y, z) . Согласно кинетической теории газов температура и давление могут быть определены статистически только для совокупности молекул в физически малом объеме, а плотность в точке есть неопределенность $0/0$.

Вычислительный период основан на разделении области на контрольные объемы, размер которых позволяет считать содержащуюся в них среду сплошной ($Kl < 10^{-3}$). Основополагающие уравнения для каждого объема выводят традиционным образом на основе законов сохранения и феноменологических законов. В соответствии с физическими теориями, все функции (плотность, температура, давление и другие) являются постоянными в объемах и, следовательно, разрывными на его гранях. Условие сплошности $Kl < 10^{-3}$ и аналогичное ограничение на шаг по времени позволяют отказаться от использования производных для математического описания физико-химических процессов (то есть запрещают стягивать объем в точку). Фактически, математическая модель совпадает с разностной схемой, что позволяет существенно упростить вычислительные алгоритмы: становятся не нужными различные методы аппроксимации (начально-)краевых задач, явные и неявные схемы, многие подходы к построению высокоточных схем. Искомые функции должны быть всего лишь интегрируемыми, а не (дважды) дифференцируемыми: разница между рассмотренным континуальным и дисконтинуальными приближениями особенно наглядна на примере схемы Годунова. Аналогичная разница возникает при теоретическом анализе погрешности аппроксимации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект «Разработка и приложение высокоэффективных параллельных алгоритмов для суперкомпьютерного моделирования сложных реагирующих течений», код проекта 21-51-46007) и Научного и технологического исследовательского совета Турции (TÜBİTAK), Grant №: ARDEB-220N170.

Литература

1. С. И. Мартыненко. Моделирование теплообмена в дисконтинуальном приближении // Вестник Удмуртского университета. Сер: Математика. Механика. Компьютерные науки, 34:1 2024. 137–164. DOI: 10.35634/vm240109
2. S. I. Martynenko Numerical Methods for Black-Box Software in Computational Continuum Mechanics. Parallel High-Performance Computing. De Gruyter, Berlin, 2023. <https://doi.org/10.1515/9783111319568>

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ С ЕДИНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ МОДОЙ КОЛЕБАНИЙ И СИСТЕМЫ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЕРЕМЕННЫХ ПО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРОВ

Мочалова Ю.А., Гаврилов С.Н., Шишкина Е.В.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
myua@ipme.ru

Проведено сравнительное исследование поведения при больших временах бесконечной по пространству системы с переменными параметрами, обладающей единственной локализованной модой колебаний и системы с одной степенью свободы (дискретный линейный осциллятор с переменной по времени жесткостью). В качестве системы с локализованной модой колебаний рассмотрена струна на винлеровском основании с дискретным линейным осциллятором переменной жесткости. Показано, что классическая формула приближения Лиувилля-Грина, справедливая для дискретного осциллятора, применима к системе с локализованной модой колебаний только в случае, если безразмерный параметр, характеризующий инерцию дискретного осциллятора, стремится к бесконечности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (проект № 124040800009-8).

Литература

1. Gavrilov, S.N., Shishkina, E.V. & Mochalova, Y.A. Non-stationary localized oscillations of an infinite string, with time-varying tension, lying on the Winkler foundation with a point elastic inhomogeneity. *Nonlinear Dyn* 95, 2995–3004 (2019)

ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА В ГЕЛЯХ С ОКСИДОМ ГРАФЕНА

Храмцов Д.П.¹, Мошин А.А.^{2,1}, Некрасов Д.А.^{2,1}

1 - МИРЭА - Российский технологический университет, Россия

2 - Московский политехнический университет, Россия

a.moshin97@mail.ru

В настоящее время наметилась тенденция создания модифицированных различными компонентами биочернил на различной основе, добавление которых даже в совсем незначительной концентрации позволяет существенно влиять как на структуру, так и на их свойства. Одним из таких компонентов является оксид графена. Однако несмотря на растущее число исследований остаются большие пробелы, касающиеся как, методик исследования свойств гелей, модифицированных компонентами на основе графена, так и зависимостей самих свойств от различных типов, форм-факторов и концентраций модифицирующего компонента. Также стоит отметить, что остается очень много вопросов касающиеся изучения массопроводных свойств. Данная работа посвящена изучению процессов переноса в гидрогелевых материалах с добавлением оксида графена и определению эффективных коэффициентов диффузии. Для экспериментального измерения зависимости глубины проникновения от времени при диффузии оксида графена в гель на основе агарозы был использован метод оптического зондирования выбранной области.

Присутствие макроструктурных частиц оксида графена значительно интенсифицирует процесс диффузии. Оксид графена обладает высокой поверхностной активностью, становится частью сетчатой структуры геля, увеличивая его пористость и таким образом влияет на скорость диффузии. Для поиска конфигурации каналов, которая наиболее точно описывает составы геля, используются элементы эволюционного моделирования. После создания микроканалов с использованием заданных настроек методом случайного блуждания проводится моделирование движения фронта фуксина и фиксируется его движение во времени. Суть метода заключается в разбиении расчетной области на множество дискретных сегментов [1]. На каждом этапе перемещение (микроканал) может быть продлено на один дискретный шаг. Параметры случайного блуждания, применяемого для формирования микроканалов в геле, могут быть определены набором исходных значений, таких как длина шага, вероятность поворота канала и весовые коэффициенты [2]. На рисунке 1 представлено моделирование массообменных процессов в агарозном геле концентрацией 0,4% масс. без графена, так и при наличии оксида графена концентраций 0,5% и 1% масс. и сопоставление расчетных результатов с данными эксперимента.

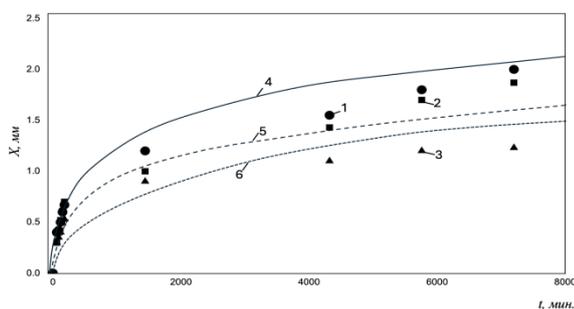


Рис. 1 - Зависимость временной динамики роста фуксина в агарозном геле 0,4% с добавлением оксида графена. 1 – агарозный гель 0,4% масс. + оксид графена 0,5% масс.; 2 - агарозный гель 0,4% масс. + оксид графена 1,0% масс.; 3 – чистый агарозный гель 0,4% масс.; 4 – агарозный гель 0,4% масс. + оксид графена 0,5% масс. (модель); 5 - агарозный гель 0,4% масс. + оксид графена 1,0% масс. (модель); 6 – чистый агарозный гель 0,4% масс. (модель).

Внедрение графена в гель приводит к укреплению его структуры за счет взаимодействия между оксидом графена и гелевым материалом, что способствует формированию более прочной структуры геля. Кроме того, присутствие графена в геле может привести к расширению каналов, заполненных жидкостью, что может усилить интенсификацию процессов массопереноса в гелях.

Литература

1. Vamos, Calin, et al. Generalized Random Walk Algorithm for the Numerical Modeling of Complex Diffusion Processes // Journal of Computational Physics. V. 186, №2. 2003. P. 527. doi:10.1016/S0021-9991(03)00073-1.
2. Ghoniem, Ahmed F., and Frederick S. Sherman. Grid-Free Simulation of Diffusion Using Random Walk Methods // Journal of Computational Physics. V. 61. №1. 1985. P. 1. doi:10.1016/0021-9991(85)90058-0.

АНАЛИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ СПЛОШНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ИЗГИБА

Мыльников В.В.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Россия
mmylnikov@mail.ru

При испытаниях материалов по схеме консольного изгиба с вращением наибольшее растяжение-сжатие происходит в слое материала на поверхности образцов, сопровождаемое местной пластической деформацией, а внутренние объемы деформируются упруго в виде сильной кривизны кристаллических решеток [1], обусловленных силами межзатомных связей и оказывающих согласованное влияние на поверхностную локальную деформацию [2]. В данной работе исследованы образцы экспериментального дисперсно-упрочненного композиционного материала на основе алюминия, полученного методом внутреннего окисления, при нагружении по «мягкой» схеме консольного изгиба цилиндрических вращающихся образцов в условиях симметричного цикла (рис. 1,а). По экспериментальным результатам построена кривая усталости (рис. 1,б). Анализ упругопластического деформирования позволил выявить, что продвижение магистральной усталостной трещины имеет как линейный, так и ярко выраженный волновой характер. При этом участок с трещиной волнового характера сопровождается значительной зоной локальной пластической деформации, которая существенно больше аналогичной зоны на участке линейного характера распространения трещины (рис. 1,в). Такое различие связано с неравномерностью распределения упрочняющих частиц в объеме материала. Кроме этого, данная неравномерность приводит к гофрированию поверхности материала при циклической деформации в сопряженной с трещиной области (рис. 5,г).

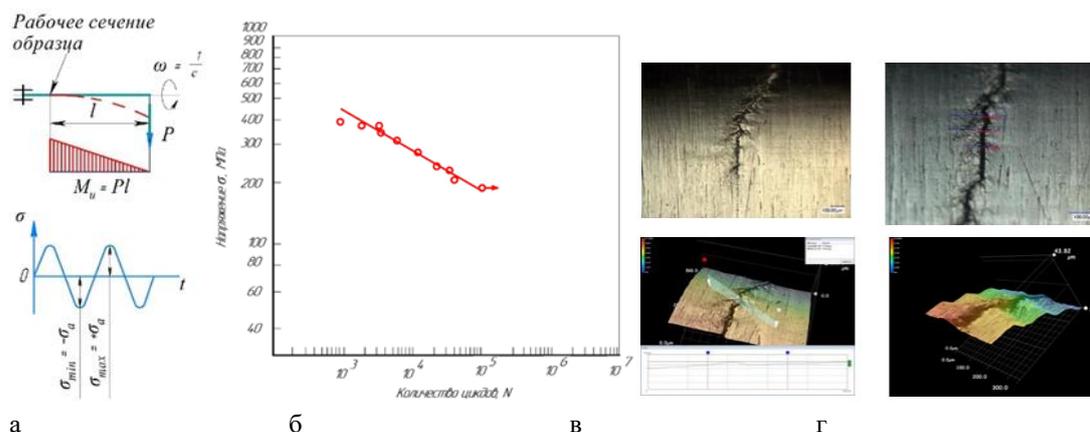


Рис. 1. Изображения: а – схема нагружения; б – кривая усталости; в-г – деформационный рельеф и величины зон локализации деформации у границы трещины.

Получены численные значения коэффициента корреляции $K_{\text{кор}} = -0,975$, наклона кривой усталости $\text{tg } \alpha_w = 0,1545$, коэффициента ограниченной выносливости $\chi = 0,35$ и произведена сравнительная оценка с широко применяемыми современными машиностроительными сплавами. Экстраполяция полученных результатов на сравнительной базе $N = 10^6$ циклов показала предел ограниченной выносливости 140 МПа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-13-20009.

Литература

1. Панин В.Е. // Физическая мезомеханика материалов. Том 1 / Отв. ред. С.Г. Псахье. Томск: ТГУ, 2015. 462 с.
2. Mylnikov, V. V. Heat treatment effect on fatigue strength and frequency stability of maraging steel / V. V. Mylnikov, E. A. Dmitriev // Letters on Materials. – 2023. – Vol. 13, No. 3(51). – P. 266-271. – DOI 10.22226/2410-3535-2023-3-266-271. – EDN PKOJLK.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ШИРОКОДИАПАЗОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия
naimark@icmm.ru

Экспериментальные исследования поведения конденсированных сред в широком диапазоне интенсивностей нагружения показывают ограниченность предположения о «адиабатическом подчинении» механических свойств структурным переменным, отражающих поведение дефектов. Процессы деформации при ударно-волновом и динамическом нагружении характеризуются близкими временами нагружения к временам развития дефектов, структурной релаксации, стадийности зарождения трещин и их распространения. Это предполагает рассмотрение процесса деформирования и разрушения в терминах структурных переменных, характеризующих дефекты, включая термодинамику, влияние на релаксационные свойства.

Развитая в [1] статистическая термодинамика сред с дефектами (микротрещинами, микродвигами) установила вид термодинамического потенциала (неравновесной свободной энергии) в зависимости от внутренних переменных: деформации, индуцированной дефектами, и параметра структурного скейлинга, определяющего взаимодействие дефектов. Анализ кинетики дефектов с учетом нелинейности термодинамического потенциала показал связь коллективных мод ансамблей дефектов (автоволновых структур и диссипативных структур обострения), имеющих природу автомодельных решений [2,3]. Экспериментально подтверждена связь степенной универсальности пластических волновых фронтов в жидкостях и твердых телах, инициирования и распространения волн разрушения, статистики динамической фрагментации керамик с установленными типами коллективных мод [4,5]. Исследовано влияние коллективных мод дефектов на формирование упруго-пластических фронтов, механизм «релаксации» упругого предвестника [6,7]. Развита методика многомасштабного анализа структурных изменений, обусловленных дефектами, с использованием данных рентгеновской томографии применительно к широкодиапазонному моделированию поведения материалов.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30041).

Литература

1. Naimark O.B., Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: Advances in multifield theories of continua with substructure. Ed.: G.Capriz, P.Mariano.- Boston, Birkhauser.- 2004. -P.75-114
2. Bannikov M., Oborin V., Bayandin Yu., Ledon D., Kiselkov D., Savinykh A., Garkushin G., Razorenov S., Naimark O. Damage-failure transition under consecutive dynamic and very high cycle fatigue loads // Journal of Applied Physics. - 2022. -V.131. -P.135902 <https://doi.org/10.1063/5.0085348>
3. Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // Acta Mechanica. - 2021. - V.232. - P.1943–1959 <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1>
4. Ledon D.R., Bannikov M.V., Oborin V.A., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. Prediction of the fatigue life of VT1-0 titanium in various structural states under very high cycle fatigue // Letters on Materials. - 2021. - V.11, Is.4. . - P. 422-426 <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-422-426>
5. Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical Dynamics of Defects and Mechanisms of Damage-Failure Transitions in Fatigue // Materials. - 2021. - V.14, Is.10. - P.2554 <https://doi.org/10.3390/ma14102554>
6. Davydova M., Uvarov S., Naimark O. The effect of porosity on fragmentation statistics of dynamically loaded ZrO2 ceramics // Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity). - 2018. - V.12, Is.43. - P.106-112. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.43.08>
7. Saveleva N.V., Bayandin Yu.V., Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Naimark O.B. The Formation of elastoplastic fronts and spall fracture in AMg6 alloy under shock-wave loading // Technical Physics Letters. - 2018. - V.44, Is.9. - P.823-826. <https://doi.org/10.1134/S1063785018090286>.

МОЛЕКУЛЯРНО ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА AL2Ni3, АРМИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Нарсеев А.С., Захаров П.В., Старостенкова М.Д., Янковская У.И.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
nar_as@e-43.ru

Используя методы молекулярной динамики в работе исследованы прочностные свойства композита, армированного углеродными нанотрубками. Композитные материалы применяются в различных отраслях промышленности (авто-, судо-, авиастроении) благодаря своей легкости, прочности и другим свойствам. Моделирование осуществлялось на основе применения компьютерной программы LAMMPS Molecular Dynamics Simulator. Кристаллы необходимых размеров получены из элементарных ячеек из базы материалов с помощью приложения AtomsK. Рассмотрено несколько видов образцов с различными способами армирования и одной или несколькими нанотрубками. В каждом случае определены прочностные свойства образцов путем их деформации (сжатия при температуре 300К). На основе полученных данных можно уверенно сделать вывод о повышении прочности композита с внедренными УНТ по сравнению с образцом чистого Al2Ni3.

ЭЛЕКТРОКАПИЛЛЯРНАЯ МОДЕЛЬ ШАРОВОЙ МОЛНИИ НА ОСНОВЕ СФЕРИЧЕСКОГО ВИХРЯ ХИКСА

Натяганов В.Л., Маслов С.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
tensor-home@yandex.ru

Рассматривается новый вариант электрокапиллярно-вихревой модели [1] шаровой молнии (ШМ) радиуса a , когда кинематическая вязкость вещества ШМ пренебрежимо мала в сравнении с воздухом. Тогда внутри ШМ может реализоваться течение не в виде вихря Хилла, а более сложная гидродинамическая структура в виде сферического вихря Хикса [2], который неоднократно заново переоткрывался.

Для сферического вихря Хикса внутри и потенциального потока той же идеальной жидкости вне сферы соответствующие решения в собственной сферической системе координат (R, θ, φ) можно выписать через гидродинамические функции тока [2]:

$$\Psi = -\frac{1}{2}V_*R^2 \left[1 - \left(\frac{a}{R} \right)^3 \right] \sin^2 \theta \quad \text{и} \quad \Psi' = \left[-\frac{\lambda}{\xi^2} + b \left(\frac{a}{R} \right)^{3/2} J_{3/2}(\xi R) \right] \sin^2 \theta \quad (1)$$

с выполнением квазивязких граничных условий и соотношений для констант V_*, b, λ, ξ :

$$R = a: \quad \Psi = \Psi' = 0, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial R} = \frac{\partial \Psi'}{\partial R} = -\frac{3}{2}V_*a \sin^2 \theta; \quad \frac{\lambda}{\xi^2} = -bJ_{3/2}(\xi a), \quad V_* = \frac{2}{3}bJ_{5/2}(\xi a), \quad (2)$$

где V_* – неизвестная скорость потенциального потока при $R \rightarrow \infty$, $J_{3/2}$ и $J_{5/2}$ – функции Бесселя дробного порядка.

Однако для ШМ в форме вихря Хикса внутри при $v' \rightarrow 0$ находится идеальная и хорошо проводящая жидкость, а вне – вязкая и плохо проводящая. Тогда дальнейшая цель состоит в поиске решения на основе формул (1) – (2) новой задачи, которая отличается от системы (1) в работе [1] тем, что при $R < a$ используются уравнения Эйлера для идеальной жидкости (а не уравнения Навье-Стокса) и упрощенные граничные условия при $v' \rightarrow 0$, но с учетом электрокапиллярных членов в тензоре напряжений.

Полное решение этой задачи приводит к следующей формуле для скорости электрокапиллярного движения ШМ в виде сферического вихря Хикса:

$$V_* = \frac{2aq\sigma E_1}{4\sigma\eta + 3q^2} = \frac{aq\sigma E_1}{2\sigma\eta + 3q^2/2}, \quad (3)$$

где q – плотность заряда двойного электрического слоя на поверхности ШМ, η – динамическая вязкость внешней среды, E_1 – напряженность внешнего электрического поля. Заметим, что формула (3) незначительно

отличается от формулы для движения ШМ в виде сферического вихря Хилла [1] при условии $v' \rightarrow 0$.

Однако главный результат этой работы заключается не в конкретном виде формулы (3), а в том факте, что скорость V_* удалось найти на основе формул (1) и (2) из решений [2] для вихря Хикса внутри и потенциального потока уже вязкой жидкости вне ШМ. Тогда как в [3] говорится, что V_* для вихря Хикса можно определить без учета капиллярных эффектов лишь когда известны 2 из 5 (при заданном радиусе a) или 3 из 5 интегральных инвариантов: импульс, 2 компоненты момента импульса, кинетическая энергия и спиральность. Это существенно осложняет расчет V_* , если не учитывать электрокапиллярные граничные условия, которые определяют как импульс, так и источник энергии для движения ШМ.

Литература

1. Натяганов В.Л. Ломоносов и загадки природного электричества. Часть 1. Парадоксы шаровой молнии // Вестн. Моск. ун-та. Матем. Механ. 2005. № 6. 42–49.
2. Moffatt H.K. The degree of knottedness of tangled vortex lines // J. Fluid. Mech. 1969. V. 35. N 1. 117–129.
3. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504с.

ПРИЧИНЫ ФОРМИРОВАНИЯ И МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ГВОЗДЕЙ

Натяганов В.Л.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
tensor-home@yandex.ru

Рассматриваются признаки и свойства сейсмических гвоздей (СГ), которые представляют собой субвертикальные скопления гипоцентров слабых землетрясений на глубинах 30-80 км и аномально малым временем формирования таких масштабных геофизических структур [1,2].

В этих, а также ряде других публикаций, в качестве основной причины образования подобных геофизических структур называлась глубинная дегазация Земли легких газов в виде мантийных плюмов. Главным компонентом глубинных флюидов считается водород, который может сжиматься до больших плотностей, а в ионно-протонной форме обеспечивать повышенную на 2-3 порядка электропроводность по сравнению с окружающей геосредой: верхней мантией или нижней литосферой. Отсюда следует важная роль электромагнитных факторов, а также возможность землетрясений на определенных глубинах, когда по геологическим временам фактически скачком меняются как фазовое состояние флюидов (с водородно-гелиевого на газо-пароводяное), так и геохимический состав вмещающей геосреды.

Еще более важным фактором является аномально высокая подвижность перегретого атомарного водорода, когда его коэффициент диффузии D превышает на 7-10 порядков величины D всех других ионов и атомов внедрения, а также его высокие показатели теплоемкости.

Несмотря на сложность математического моделирования подобных обратных задач геофизики в докладе представлены взаимодополняющие модели, описывающие на интегральном уровне отдельные свойства СГ, их формирование и механизмы функционирования на определенных этапах развития.

1. Диффузионно-тепловая макромодель [3] формирования СГ в режиме с обострением [4] на основе уравнения теплопроводности с источником. В физическом пространстве эта модель описывает спиральные траектории распространения температуры, которые намотаны на поверхность СГ конической формы. Внутри этого конуса находится аморфизированная (насыщенная водородом) среда с более высокой плотностью, чем вмещающая внешняя геосфера. В результате этого вдоль поверхности СГ образуется своеобразный “чехол” – тонкая прослойка с перегретым водородом внутри.
2. В начальной стадии функционирования СГ на основе уравнений Стокса рассматривается модель истечения водорода из точечного источника в тонкой прослойке между соосными конусами. Закрутка такого радиального течения обосновывается на основе теории электровихревых течений [5].
3. На более поздних стадиях, когда удлиняющийся “чехол” представляет собой уже квазицилиндрическую прослойку, можно воспользоваться результатами Бэтчелора [6] о циркуляционных течениях с закруткой.
4. На заключительных стадиях формирования СГ, когда водородистый состав плюма поменяется на газо-

пароводяной в верхних слоях литосферы, для теоретического описания утолщения СГ в виде “шляпки” можно использовать 5-параметрическое семейство решений уравнений Навье-Стокса для вихреисточника, которое ранее применялось для моделирования торнадо.

Литература

1. Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические “гвозди” // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ1001.
2. Захаров В.С., Карпенко, Завьялов С.П. Особенности сейсмических “гвоздей” в разных геодинамических обстановках // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2013. № 1. С. 11-18.
3. Натяганов В.Л. Возможные механизмы формирования “сейсмических гвоздей”. Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. СПб.: ВСЕГЕИ. 2022. С. 192-196.
4. Самарский А.А., Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Михайлов А.П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука. 1987. 480с.
5. Электровихревые течения / Под ред. Щербинина Э.В. Рига: Зинатне. 1985. 315с.
6. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкостей. М.: Мир. 1973. 792 с.

ДИЛАТАЦИОННОЕ КОНИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ В БЕСКОНЕЧНОМ УПРУГОМ ЦИЛИНДРЕ

Нгуен Ван Туен^{1,2}, Колесникова А.Л.^{1,3}, Гуткин М.Ю.^{1,3}, Романов А.Е.¹

1 - Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

2 - Университет Сао-До, Хайзыонг, Вьетнам

3 - ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

nguyenvantuyendhsd@gmail.com

В работе найдено аналитическое решение упругой изотропной задачи для дилатационного конического включения, помещенного соосно в бесконечно длинный круговой цилиндр.

Конус был смоделирован коаксиальными бесконечно тонкими дилатационными дисками переменного радиуса, распределенными с постоянной плотностью вдоль его оси симметрии (рис. 1).

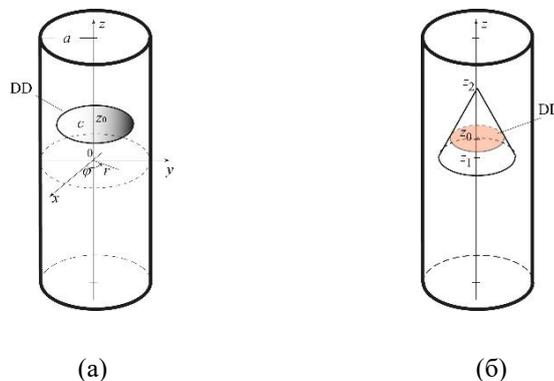


Рис. 1. Дилатационный диск DD (а) и коническое включение (б) в бесконечно длинном круговом цилиндре.

Собственная деформация бесконечно тонкого дилатационного диска, обозначенного DD, имеет вид [1,2]:

$${}^{DD}\varepsilon_{ii}^* = b H \left(1 - \frac{r}{c}\right) \delta(z - z_0), \quad i = x, y, z \text{ или } r, \varphi, z, \quad (1)$$

где b - размерный коэффициент; c - радиус диска; $H(1 - r/c)$ - ступенчатая функция Хевисайда; $\delta(z)$ - дельта-функция Дирака; z_0 - координата диска вдоль оси z .

При непрерывном распределении дисков, имеющих определенную зависимость радиуса диска a от координаты z_0 , вдоль оси z получаем осесимметричное дилатационное включение (DI) заданной формы, обладающее следующей собственной деформацией [3,4]

$${}^{DI}\varepsilon_{ii}^* = \int_{z_1}^{z_2} {}^{ITD}\varepsilon_{ii}^* \rho dz_0 = \int_{z_1}^{z_2} b H \left(1 - \frac{r}{c}\right) \delta(z - z_0) \rho dz_0 = \varepsilon^* \delta(\Omega), \quad i = x, y, z \text{ или } r, \varphi, z, \quad (2)$$

где ρ - плотность распределения дисков; $\varepsilon^* = b \rho$ - величина собственной деформации включения; $\delta(\Omega)$ - дельта-функция объема Ω , занимаемого включением: $\delta(\Omega) = \begin{cases} 1, & \text{если } R \in \Omega \\ 0, & \text{если } R \notin \Omega \end{cases}$

Ранее с помощью упругого поля диска в бесконечной упругой среде [1,2] интегрированием, подобным (2), были рассчитаны упругие поля включений в виде цилиндра, шарового сегмента и конуса [3,4].

В настоящей работе, опираясь на решение упругой граничной задачи для диска в бесконечном цилиндре [5], мы рассчитали упругое поле конуса в цилиндре. Перемещения, упругие деформации и напряжения конуса имеют компактное представление в сферических координатах, включающее ряды с полиномами Лежандра. Построены карты напряжений конуса, показано влияние свободной поверхности цилиндра на их распределение.

Литература

1. А. Л. Колесникова, Р. М. Сорока, А. Е. Романов // Дефекты в континуальной упругой среде: классификация, поля и физические аналоги, *Materials Physics and Mechanics*, 17: 2013. 71–91.
2. A. L. Kolesnikova, M. Yu. Gutkin, A. E. Romanov // Elastic models of defects in 3D and 2D crystals, *Reviews on Advanced Materials Science*, 51: 2017. 130–148.
3. A. L. Kolesnikova, M. Yu. Gutkin, A. E. Romanov // Analytical elastic models of finite cylindrical and truncated spherical inclusions // *Int J Sol Struct*, 143: 2018. 59-72.
4. Nguyen Van Tuyen, A. L. Kolesnikova, A. E. Romanov // Isotropic elasticity of dilatational conical inclusion. An analytical approach, *Int J Sol Struct*, 294: 2024, 112735 (1-12).
5. А. Л. Колесникова, Нгуен Ван Туен, М. Ю. Гуткин, А.Е. Романов // Общий подход к расчету упругих характеристик осесимметричных квантовых точек в нитевидных нанокристаллах, *Письма в ЖТФ*, 50: 6, 2024. 28–32.

РАЗРАБОТКА ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ БЕДРЕННОГО КОМПОНЕНТА ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА РЕШЕТЧАТОГО ТИПА

Боровков А.И.¹, Маслов Л.Б.^{1,2}, Жмайло М.А.¹, Тарасенко Ф.Д.¹, Нежинская Л.С.¹

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
Иваново, Россия
nezhinskaya.l@compmechlab.ru*

В работе представлен процесс разработки решетчатого метаматериала с градиентным распределением эффективной плотности для производства бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава человека. Метаматериалы – искусственно создаваемые трехмерные периодические структуры, физико-механические свойства которых зависят от топологических параметров элементарной ячейки периодичности. Решетчатая структура метаматериала позволяет обеспечить более качественный в сравнении со сплошным или поверхностно-пористым материалом процесс врастания костной ткани в металлический имплантат, а также оптимизировать жесткость имплантата, исходя из функциональных нагрузок, приходящихся на имплантат. Исследуемая биомеханическая система включает бедренную кость, состоящую из кортикальной и губчатой костных тканей, ножку металлического эндопротеза тазобедренного сустава (имплантат) с керамической головкой (рис. 1). Распределение эффективной плотности решетчатого метаматериала, образующего имплантат, определяет его внутреннюю пористую структуру. Для нахождения искомого распределения решена задача оптимизации, в постановке которой учтены семь случаев нагружения, охватывающих основной перечень нагрузок, приходящихся на рассматриваемый узел скелета при нормальной двигательной активности человека.

Расчет напряженно-деформированного состояния системы, а также решение задачи оптимизации, основанное на результатах нагружения, проводилось с помощью конечно-элементного анализа. Нагрузка в каждом из сценариев нагружения приходится на поверхность керамической головки имплантата, в то время как внешняя поверхность кости в области коленного сустава жестко закреплена (рис. 2). Все компоненты системы жестко соединены друг с другом.

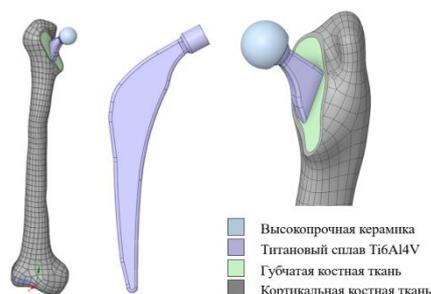


Рис. 1. Внешний вид компонента эндопротеза и части бедренной кости

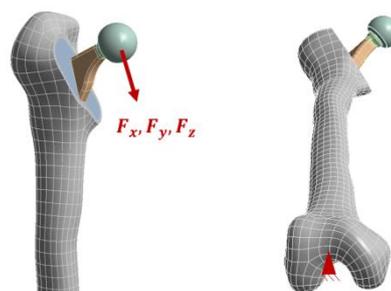


Рис. 2. Схема нагружения и закрепления биомеханической системы

Рассматриваемая задача оптимизации предполагает определение наиболее выгодного с точки зрения жесткости распределения эффективной плотности метаматериала в теле имплантата. При этом в расчете предполагается, что плотность метаматериала пропорциональна эффективным напряжениям, т.е. в областях с повышенными напряжениями плотность также должна быть больше и наоборот. Поставлена задача снизить массу металлического имплантата в 2 раза и работать в диапазоне эффективной плотности, являющейся переменной проектирования, от 0.3 до 0.7, где 1 – сплошной материал, 0 – отсутствие материала. Диапазон желаемых значений плотности выбирался с учетом технологических ограничений аддитивного производства.

Результаты проведенных расчетов плотности показаны на рис. 3. На основе полученного распределения плотности спроектирована пористая решетчатая конструкция (рис. 4).

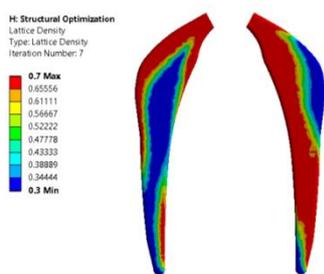


Рис. 3. Распределение эффективной плотности метаматериала

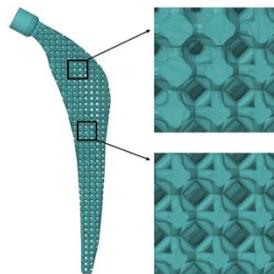


Рис. 4. Внешний вид градиентного имплантата

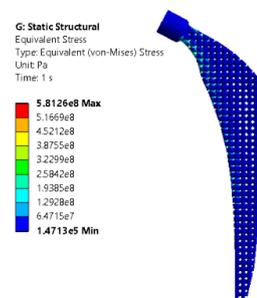


Рис. 5. Анализ интенсивности напряжений градиентного имплантата

Для верификации поведения системы при эксплуатации эндопротеза построенная решетчатая конструкция имплантата подвергается тем же нагрузкам. По результатам конечно-элементного анализа пористого имплантата (рис. 5) можем заключить, что в решетчатой конструкции отсутствуют превышения предела текучести титанового сплава Ti6Al4V, равного 950 МПа. Следовательно, градиентная структура позволяет получить оптимальное распределение прикладываемой нагрузки, а также не имеет зон, где материал принимает свое критическое состояние при рассмотренных сценариях нагружения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00882).

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Никишин А.П., Грищенко А.И.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

andjix_17@mail.ru

В последние годы нейронные сети стали все более широко используемым инструментом в науке и промышленности, и мы с уверенностью можем сказать, что они открывают новые перспективы в области исследований и оптимизации материалов со сложной структурой.

В качестве примера применения нейросетевого подхода мы рассмотрели однонаправленный волокнистый композитный материал, где матрица и включение являются изотропными. Тензор жесткости такого материала трансверсально-изотропный, что приводит к пяти независимым константам, которые принято называть эффективными свойствами.

Существуют различные методы для определения эффективных свойств, включая методы конечно-элементной гомогенизации и различные аналитические оценок, основанные на построении реологических моделей.

Однако, моделирование полносвязной нейронной сети представляет собой сложную задачу, требующего корректного выбора входных и выходных данных. Важно использовать безразмерные величины в диапазоне от 0 до 1 и выбирать физически интерпретируемые входные параметры. В качестве вариантов могут служить входы на основе классического правила смесей [1] или компоненты матрицы жесткости в тензорном представлении правила смесей.

Было проведено исследование различных вариантов архитектур, варьировалось количество скрытых слоев, количество нейронов в скрытом слое, функции активации (ReLU, ELU). В качестве критерия оценки результатов использовалась относительная погрешность полученных данных при обучении и входных данных.

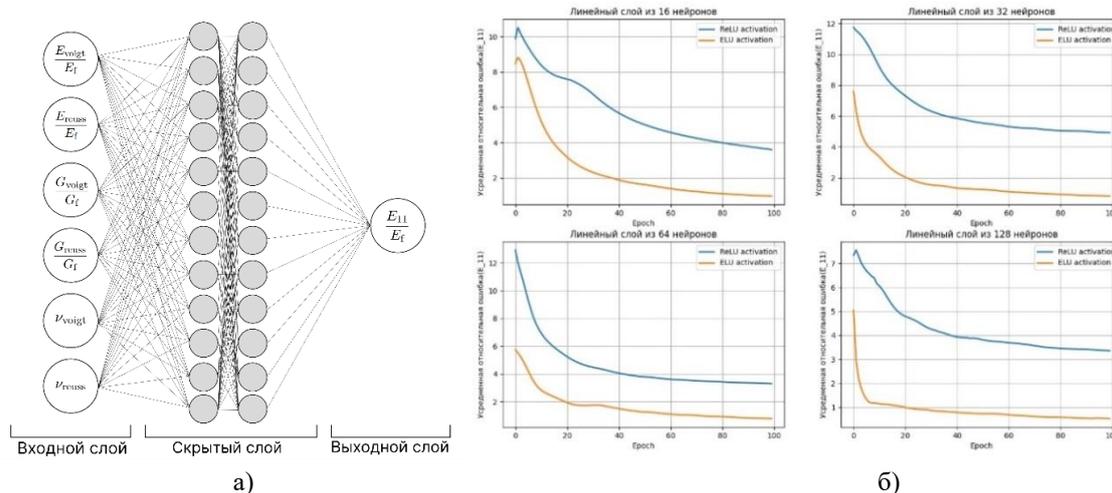


Рис. 1. а) Архитектура полносвязной нейронной сети с двумя скрытыми слоями для продольного модуля Юнга.
б) Результаты обучения двухслойной полносвязной нейронной сети

Выводы. В данном исследовании предложен подход, который использует полносвязные нейронные сети с различными подходами выбора механически интерпретируемых входных данных для прогнозирования эффективных свойств композиционных материалов. Рассматривался однонаправленный композитный материал, но предусматривается расширение результатов на другие типы композитов.

Литература

1. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle // ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1929. Vol. 9. No. 1. Pp. 49.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ И КОНСЕРВАТИВНЫЕ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ ОБОБЩЁННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ШРЁДИНГЕРА

Кудряшов Н.А., Нифонтов Д.Р.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
danil.nifontov.01@mail.ru

Законы сохранения являются важной характеристикой нелинейных уравнений в частных производных. С помощью них можно оценить сохраняющиеся характеристики математических моделей. Известно, что законы сохранения соответствуют свойству интегрируемости нелинейных уравнений в частных производных.

В последние десятилетия в связи с необходимостью решения задач нелинейной оптики, в том числе задач передачи информации на большие расстояния, появился большой интерес к исследованию математических моделей распространения импульсов в нелинейно-оптических средах [1, 2]. Используемые при описании нелинейные уравнения в частных производных обычно не относятся к классу уравнений,

интегрируемых методом обратной задачи рассеяния, и, как правило, имеют три и менее закона сохранения.

Как правило, законы сохранения, соответствующие нелинейным эволюционным уравнениям, находятся с помощью оператора Эйлера и минимизации Лагранжиана [3]. В данной работе для вычисления законов сохранения используются прямые преобразования. Метод, использованный в данной работе, имеет ряд преимуществ для определенного класса нелинейных эволюционных уравнений, к которым принадлежит рассматриваемое семейство.

В докладе представлены законы сохранения, соответствующие обобщенным нелинейным уравнениям в частных производных: уравнению Гинзбурга-Ландау [4], обобщенному уравнению Гержикова-Иванова [5], нелинейному уравнению Шредингера четвертого порядка [6]. Исследуемые уравнения позволяют оценить влияние различных процессов при распространении импульса в оптических волокнах. Задача Коши для рассматриваемых уравнений не решается методом обратной задачи рассеяния, поэтому они не относятся к классу интегрируемых уравнений в частных производных, однако эти уравнения имеют некоторые аналитические решения. Для каждого исследуемого уравнения найдено три закона сохранения с некоторыми ограничениями на параметры задачи.

Для исследуемых уравнений по найденным законам сохранения были рассчитаны сохраняющиеся величины для соответствующих решений уравнений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141, <https://rscf.ru/project/22-11-00141/>

Литература

1. Kivshar Y.S., Agrawal G.P., Optical Solitons. From Fibers to Photonic Crystals, Academic Press, 2003
2. Kivshar Yu. S. and Malomed B. A., Dynamics of solitons in nearly integrable systems, Rev. Mod. Phys. (1989) 63, 763 – 915
3. Olver P. J., Applications of Lie groups to differential equations, Springer-Verlag, New York inc, 1986
4. Kudryashov, N.A., Conservation laws of the complex Ginzburg-Landau equation, Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics, 2023, 481, 128994
5. Kudryashov, N.A. and Lavrova, S.F. and Nifontov, D.R., Bifurcations of Phase Portraits, Exact Solutions and Conservation Laws of the Generalized Gerdjikov-Ivanov Model, Mathematics, 2023, 11, 4760
6. Kudryashov, Nikolay A., Nifontov, D.R., Exact solutions and conservation laws of the fourth-order nonlinear Schrödinger equation for the embedded solitons, 2024, Optik, 303, 10.1016/j.ijleo.2024.171752

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПУЛЬСИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШУЩЕГО КРЫЛА ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ

Нурiev А.Н., Зайцева О.Н., Баймуратова А.Р., Богданович Е.Е.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
nuriev_an@mail.ru

Традиционные аналитические подходы к исследованию машущего полета в большинстве своем основываются на теории идеальной жидкости. Этот класс моделей успешно развивается уже более ста лет (см. обзор [1]), и фактически является веткой развития классической аэродинамики стационарного полета. Как и в теории обтекания стационарного крыла, моделям этого класса необходимы дополнительные предположения о точках отрыва потока или о структуре вихревого следа, подбор которых, в условиях нестационарного движения крыла, представляет основную трудность и, в большинстве случаев, значительно ограничивает область применимости модели. Полностью разрешить все эти проблемы можно используя полное уравнение Навье-Стокса. Именно такой подход является доминирующим в современных исследованиях нестационарного обтекания машущего крыла (см. обзор [2]). В то же время решение полной нелинейной задачи о общем случае возможно только с помощью приближенных численных методов. Прямые численные методы решения уравнения Навье-Стокса имеют высокую вычислительную сложность, что существенно лимитирует возможности исследования нестационарной гидродинамики машущего полета даже в двумерном приближении из-за большого числа параметров задачи.

В настоящей работе рассматривается аналитический подход для изучения нелинейной гидродинамики цилиндрического машущего крыла, основанный на методе последовательных асимптотических разложений.

Исследование развивает асимптотическую теорию [3-5] на случай эллиптической формы сечения крыла. Течение жидкости описывается полным уравнением Навье–Стокса, решение которого ищется в виде разложения по малому параметру. В рамках исследования было показано, что в результате нелинейного взаимодействия временных гармоник возникает ненулевая крейсерская скорость движения, направленная перпендикулярно оси поступательных колебаний. Изучены крейсерские режимы движения, формирующиеся в условиях синхронных вращательных и поступательных гармонических колебаний крыла. Определены основные характеристики нестационарного силового гидродинамического воздействия на машущее крыло и его крейсерская скорость. В работе также установлена область применимости построенной асимптотической модели по данным прямого численного моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-79-10033.

Литература

1. K.V. Rozhdestvensky, V. A. Ryzhov. // *Aerohydrodynamics of flapping-wing propulsors*. Progress in Aerospace Sciences. 39:8, 2003. 585–633.
2. X.Wu, X. Zhang, X. Tian, X. Li, W. Lu. A review on fluid dynamics of flapping foils. *Ocean Engineering*. 195, 2020, 106712
3. A.N. Nuriev and A. G. Egorov. // *Asymptotic theory of a flapping wing of a circular cross-section*. Journal of Fluid Mechanics. 941, 2022. A23
4. A.N. Nuriev, A. G. Egorov, O. N. Zaitseva, and A. M. Kamalutdinov // *Asymptotic study of the aerohydrodynamics of a flapping cylindrical wing in the high-frequency approximation*. Lobachevskii J. Math. 43, 2022. 2250-2256
5. A.G. Egorov, A. N. Nuriev, V. D. Anisimov, O. N. Zaitseva // *Propulsive motion of an oscillating cylinder in a viscous fluid*. Phys. Fluids. 36, 2024. 021908

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРЕМНИЕВЫХ ВАКАНСИЙ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ ЧЕРЕЗ УПРУГИЕ ПОЛЯ: МЕТОД ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Осипов А.В., Кукушкин С.А.

Институт проблем машиноведения, Санкт-Петербург, Россия
andrey.v.osipov@gmail.com

В настоящей работе экспериментально реализован новый метод получения карбида кремния кубического политипа 3C-SiC с кремниевыми вакансиями в стабильном состоянии. Идея метода состоит в том, что вначале кремниевые вакансии создаются высоко-температурным отжигом в подложке кремния Si(111), легированного фосфором, и лишь затем этот кремний превращается в 3C-SiC(111) за счет химической реакции с монооксидом углерода CO. Часть кремниевых вакансий, пройдя «химический отбор» при этом превращении, попадает в SiC. В результате образуется карбид кремния кубического политипа 3C-SiC с кремниевыми вакансиями V_{Si} . Так как кремний был легирован фосфором, то вакансии приобретают отрицательный заряд. Квантовомеханические расчеты, выполненные методом функционала плотности, показывают, что помимо заряда кремниевые вакансии обладают еще сильным магнитным моментом за счет того, что соседние атомы углерода имеют неспаренные электроны. Ключевую роль в данной системе играет то, что кремниевые вакансии V_{Si} очень сильно взаимодействуют друг с другом. Данное взаимодействие полностью определяет не только оптические, но и электрические свойства данного спинтронного материала. Кажется, что отрицательно заряженные вакансии должны отталкиваться друг от друга за счет кулоновского взаимодействия. Но на самом деле все наоборот. Квантовомеханические расчеты, выполненные методом функционала плотности, показывают, что каждая вакансия создает вокруг себя упругое поле за счет оборванных связей Si-C и эти поля приводят к сильному притяжению кремниевых вакансий вдоль направления $\langle 110 \rangle$ (см. Рис. 1). Притяжение возникает за счет образования новых очень выгодных связей C-C (Рис. 1). В результате все вакансии выстраиваются в «нити» $\langle 110 \rangle$, вдоль которых идет спиновый ток, т.е. ток электронов с одинаковым спином. Изучены свойства данного материала и проведено сравнение с экспериментальными данными.

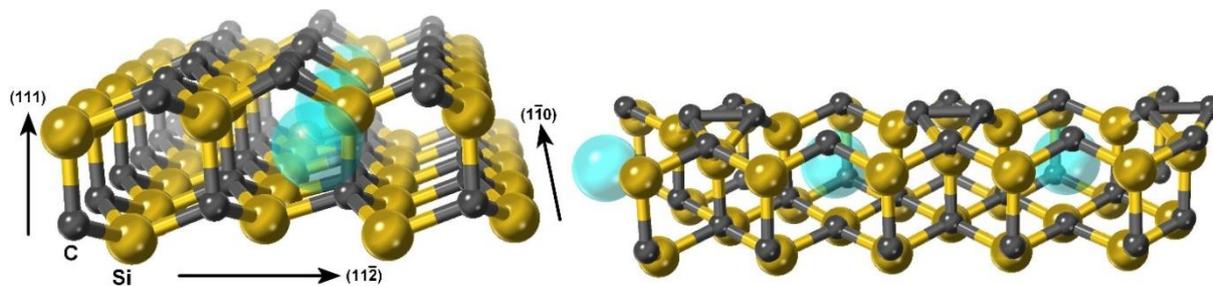


Рис. 1. «Нити» кремниевых вакансий в 3С-SiC согласно квантовомеханическим расчетам.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ИПМаш РАН. Номер учредителя № FFNF-2021-0001. Регистрационный номер темы: 121112500383-9.

ЛОКАЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ И АНИЗОТРОПИЯ ЛЬДА

Павилайнен Г.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
g_v_Pavilaynen@mail.ru

Современные исследования льда в северных регионах России предоставляют широкие возможности для проектирования и возведения экономичных сооружений при одновременном обеспечении их высокой надёжности в экстремальных условиях эксплуатации. К таким конструкциям относятся вертолётные площадки. В работе делается оценка локальной прочности и анизотропии льда на основе экспериментальных исследований и предложено решение задачи изгиба ледяного поля над поверхностью воды при воздействии на него сосредоточенной нагрузки, моделирующей посадку и взлёт вертолета. Обсуждается влияние поверхностного натяжения льда и делается его оценка. Определён прогиб льда под действием нагрузки от 3 до 12 Тс, соответствующей различным маркам используемых вертолетов и даны оценки допустимой толщины льда, обеспечивающей безопасную прочность конструкции.

Лёд, как строительный материал, является достаточно специфическим, поскольку его локальная прочность колеблется в широком диапазоне. Исследованиям по определению прочности льда уделяется особое внимание. Диапазон изменения локальной прочности льда достаточно широк и колеблется в пределах от 12 до 40 МПа, что связано с влиянием таких параметров как температура, солёность, строение, анизотропия, возраст льда и период года. Соответственно эти параметры влияют на несущую способность льда и его трещиностойкость при многократном использовании. Отдельным вопросом является оценка изгибной жёсткости льда и её изменении в зависимости от параметров эксплуатации вертолётной площадки и диапазона температур.

Работа выполнена в Федеральном бюджетном государственном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» в рамках проекта 5.1 НИТР Росгидромета и в Санкт-Петербургском государственном университете с поддержкой гранта РФФ 19-01-00208.

Литература

1. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Kornishin K.A., Efimov Y.O., Tarasov P.A., Volodin D.A. Physical and Mechanical Characteristics of Sea Ice in the Kara and Laptev Seas. International Journal of Offshore and Polar Engineering (ISSN 1053-5381). Vol. 29, No. 4, December 2019. P. 369–374. <https://doi.org/10.17736/ijope.2019.jc767>
2. Павилайнен Г.В. Математические модели гидротехнических опор из конструкционных материалов с эффектом пластической анизотропии (эффектом SD). //Труды семинара «Компьютерные методы в механике сплошной среды». 2020-2021г., С. 5-28. ISBN: 978-5-02-040494-6
3. Павилайнен Г.В., Юшин Р.Ю. Анализ учета упругой трансверсальной изотропии и пластической анизотропии при изгибе круглых пластин. // Вестн. С.-Петерб. ун-та., Сер.1. 2010, Вып. 4. - С.128-137.
4. Бачурихина Т.В., Кушнер А.П., Павилайнен Г.В. Сравнение численных и аналитических методов решения в задаче изгиба пластин из пластически анизотропных материалов. Казань. Казанское математическое общество. Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского, т. 28, 2004, с.38-43.

О МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С ПЕРВЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Павлов Ю.В.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
yuri.pavlov@mail.ru

Рассматриваются способы решения уравнения вида

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U}{\partial x_i^2} - \frac{\partial^2 U}{c^2 \partial t^2} + \sum_{i=0}^n \lambda_i \frac{\partial U}{\partial x_i} = p(x, t)F(U),$$

где c и $\lambda_0, \dots, \lambda_n$ – постоянные, $x_0 = ct$, $F(U)$ – некоторая заданная (нелинейная) функция, $p(x, t)$ – функция переменных $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ и t . Если первые производные отсутствуют, а $F(U) = \sin U$, то это, при $p(x, t) = 1$, известное уравнение синус-Гордона. При переменном $p(x, t)$ и $F(U) = \sin U$, его называют уравнением синус-Гордона с переменной амплитудой. Если первые производные отсутствуют, а $F(U) = \exp U$, имеет место уравнение Лиувилля. Подобные уравнения с первыми производными и переменной амплитудой $p(x, t)$ появляются во многих областях механики и физики, где имеются переменные внешние поля и явления диссипации, например, в физике жидких кристаллов [1].

Первые производные в таких уравнениях можно исключить стандартным способом, но при нелинейной функции $F(U)$ получающееся уравнение принимает сложную форму и не упрощает поиск решения. В данной работе обобщается на случай наличия первых производных метод решения нелинейных уравнений, использующий функционально-инвариантные решения волнового уравнения [2]. Для уравнения синус-Гордона такой метод был предложен в работе [3], а для нелинейных уравнений с переменной амплитудой – в работе [4]. В данной работе получены новые точные решения нелинейных уравнений с первыми производными, для разных типов нелинейностей $F(U)$, представлены графики решений и проведен анализ их свойств.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500009-8).

Литература

1. E. L. Aero, A. N. Bulygin // Equations of motion of nematic liquid-crystal media, J. Appl. Math. Mech., 35, (1971) 831–843
2. V. Smirnoff, S. Soboleff // Sur une methode nouvelle dans le probleme plan des vibrations elastiques, Труды сейсмологического ин-та АН СССР, Ленинград, 20, (1932) 1–37
3. Э. Л. Аэро, А. Н. Булыгин, Ю. В. Павлов // Новый подход к решению классического синус-Гордона уравнения и его обобщений, Дифференциальные уравнения, 47:10, (2011), 1428–1438
4. A. N. Bulygin, Yu. V. Pavlov // Some solutions of dynamic and static nonlinear nonautonomous Klein-Fock-Gordon equation, In book: Nonlinear Wave Dynamics of Materials and Structures, H. Altenbach, et al. (eds.), Springer, Cham, Switzerland (2020), pp. 107–120

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРИСТЫХ ХРУПКИХ СРЕД: ВЕРИФИКАЦИЯ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Пантелеев И.А.¹, Ляховский В.², Шалев Э.²

1 - Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

2 - Geological Survey of Israel, Jerusalem, Israel

pia@icmm.ru

Низкопористые осадочные породы и породы кристаллического фундамента при различных видах нагружения обнаруживают специфическое деформационное поведение. Специфичность поведения заключается в нелинейном упругом отклике материала уже при малом уровне действующих напряжений, зависимости упругих свойств от вида напряженно-деформированного состояния, анизотропии упругих свойств, индуцированной ростом микротрещиноватости, накопления необратимых деформаций, обусловленных ее

развитием. Для описания указанных эффектов разрабатываемые модели должны объединять в себе определяющие соотношения механики континуальной поврежденности с параметрами поврежденности различного ранга, механики разномодульных сред и сред, свойства которых зависят от вида напряженно-деформированного состояния. При исходной пористости горных пород, превышающей единицы процентов, ее эволюция становится ключевым фактором, наряду с эволюцией микротрещин, определяющих характер деформирования материала вплоть до его разрушения. При высоких уровнях среднего сжимающего напряжения в пористых хрупких материалах наблюдается снижение эффективной прочности, вызванное интенсивным разрушением пористого пространства, зерен, скелета породы, что приводит к их уплотнению.

Настоящая работа посвящена разработке модели деформирования трещиноватых пористых хрупких сред, учитывающей описанные выше особенности деформационного поведения данного класса материалов, ее экспериментальной верификации и приложению к решению геофизических задач. При построении модели, следуя классической теории анизотропной поврежденности, вводится тензор поврежденности второго ранга. Главные направления этого тензора задают направления ортотропии материала, а главные значения определяют изменение эффективной площади поперечных сечений, перпендикулярных к каждой из осей ортотропии [1]. Для описания эффекта направленного уплотнения вводится тензор уплотнения, след которого отражает текущую пористость материала. Взаимодействие двух тензорных параметров позволяет описать различные сценарии неупругого деформирования трещиноватой пористой среды.

Разработанная модель в частных случаях редуцируется к модели нелинейной пороупругости со скалярной поврежденностью [2], неклассической модели нелинейной упругости [3], модели пороупругой среды Био и модели линейно-упругого тела. Идентификация и верификация модели проведена на экспериментальных данных по циклическому непропорциональному трехосному сжатию песчаника Darley Dale. Показано, что нелинейная пороупругая модель с тензорной поврежденностью и уплотнением позволяет удовлетворительно описать не только ветки нагрузки в каждом цикле, но и ветви разгрузки.

Предложенная авторами модель была использована для описания азимутальной зависимости амплитуды колебаний порового давления, вызванных прохождением телесейсмических волн, и наблюдаемой для скважин, расположенных в районе крупных разломных зон. Установлено, что наличие преимущественной ориентации трещиноватости в районе разломной зоны является причиной анизотропии пороупругих свойств среды, что, в свою очередь, приводит к зависимости деформационного отклика подземной водоносной системы от направления прихода телесейсмических волн.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-77-30008.

Литература

1. Пантелеев И.А., Ляховский В.А. Ориентация трещиноватости в хрупком твердом теле при традиционном трехосном сжатии // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. 2022. № 5. С. 70-92.
2. Hamiel Y., Lyakhovsky V., Agnon A. // Rock dilation, nonlinear deformation, and pore pressure change under shear, Earth. Planet. Sci. Lett. 2005. V.237. P. 577-589.
3. Lyakhovsky V., Ben-Zion Y., Agnon A. // Distributed damage, faulting, and friction, Journal of Geophysical Research. 1997. V.102, N.B12. P. 27635-27649.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДОБЫЧИ В ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ОБВОДНЕННОСТИ

Пашкин В.Д.¹, Кузькин В.А.¹, Самолов Д.А.²

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

2 - Научно-технический центр Газпромнефти, Россия

pashkin.vd@edu.spbstu.ru

Текущий этап разведки углеводородов связан со значительным перераспределением в структуре запасов. Запасы, сосредоточенные в сложных коллекторах, характеризующиеся неоднородностью как по мощности, так и по площади залежей, приобретают все большее значение. Эта тенденция вынуждает уделять особое внимание газовым коллекторам со снижающейся добычей. Изменение положения газовой контактной поверхности во время эксплуатации скважины приводит к образованию водяных конусов, которые могут перерасти в

прорыв воды на дне коллектора.

Различные модели, которые были предложены до сих пор для прогнозирования падения давления и обводнения в газовых скважинах, не дают надежных прогнозов, особенно при высоких значениях обводненности. Основные различия между этими моделями заключаются в применении различных соотношений для прогнозирования коэффициентов трения и использовании различных способов определения формы поверхности раздела Жидкость-Газ

Предложенная в данной работе математическая модель базируется на уравнениях Навье-Стокса. Динамика газовой фазы определяется упрощенно с помощью эмпирической формулы Дарси-Вейсбаха. Математическая модель учитывает возможность турбулизации потока жидкости. Для определения искривления поверхности контакта Жидкость-Газ используются корреляции Гролмана, которые описывают динамику потока в терминах характеристических чисел Фруда и Вебера. Для учета образования волн на поверхности жидкости введены замыкающие соотношения, которые определяют коэффициент гидравлического сопротивления.

Проведена валидация модели на основе данных промышленного симулятора многофазных потоков. Рассчитаны критические расходы газа, которые обеспечивают необходимые условия для выноса жидкости из горизонтальных участков скважин. Модель продемонстрировала удовлетворительную сходимости для различных симуляций газожидкостных потоков.

В данной работе представлена механистическая модель газожидкостного потока в горизонтальных участках газовых скважин. Предложенная модель может использоваться для оценки снижения дебита газовой скважины из-за перекрытия перфорационных каналов и планирования мероприятий по удалению жидкости с забоя скважины.

СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ АСИММЕТРИИ ТАЗОВЫХ КОСТЕЙ

Пашковский Д.М.^{1,2}, Лобода О.С.^{1,2}, Умнов В.В.³

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург,
Россия*

*3 - Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и
ортопедии им. Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия
mr.vivivilka@icloud.com*

При планировании операций по реконструкции вертлужной впадины хирургам приходится оценивать асимметрию тазовых костей. Для этого обычно проводится расчет расстояний и углов между характерными анатомическими точками на снимках компьютерной томографии, что сопровождается большими трудностями при анализе и принятии врачебных решений [1]. Для решения данной проблемы в работе предлагается метрика оценки асимметрии таза, использующая собственные векторы тензоров инерции. Тензоры инерции рассчитаны для правой и левой половины относительно центра масс всей тазовой кости [2, 3]. Также проведено сравнение данного подхода с методом оценки асимметрии на основе характерных анатомических точек, адаптированного для трехмерного случая.

Литература

1. Новиков В. А. и др. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста //ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста Учредители: Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. ГИ Турнера, ООО "Эко-Вектор". – 2022. – Т. 10. – №. 2. – С. 143-150.
2. Жилин П. А. Динамика твердого тела. – 2014.
3. Жилин П. А. Векторы и тензоры второго ранга в трехмерном пространстве //СПб.: Нестор. – 2001. – Т. 276. – С. 3.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ С СЕРДЕЧНИКОМ

Иванова Е.А.^{1,2}, Пашковский Д.М.^{1,2}

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 - Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург,
Россия
mr.vivivilka@icloud.com

В работе предложена модель электромагнитного поля на основе континуума Коссера специального вида [1, 2]. Исходя из рассматриваемого набора гипотез построена редуцированная система уравнений сплошной среды с вращательными степенями свободы, включающая: баланс кинетического момента, соотношение, связывающее ротор угловой скорости и меры деформаций, уравнение совместности деформаций для вращательных степеней свободы и определяющее соотношение для сопутствующего вектора тензора моментных напряжений. Рассматриваемая модель среды Коссера специального вида по структуре дифференциальных уравнений эквивалента расширенной системе уравнений Максвелла [1, 2]. В отличие от классических уравнений электромагнетизма, при данном подходе в дифференциальных уравнениях получены дополнительные источниковые слагаемые. Другое отличие заключается в том, что закон Гаусса для магнитного поля определен в форме тензорного уравнения для вектора магнитного заряда и тензора электромагнитной индукции, что позволяет в явной форме учесть наличие постоянных магнитов в среде.

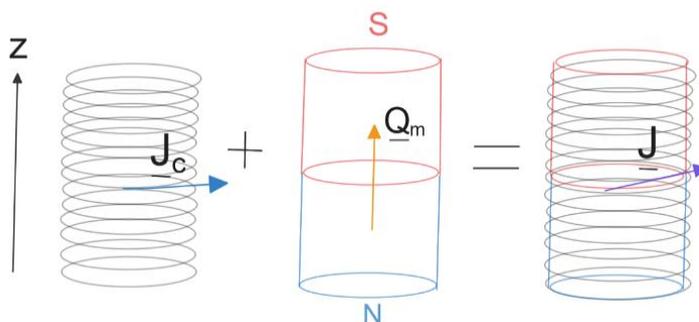


Рис. 1. Общая схема решения задачи магнитостатики

На основе модифицированной системы уравнений Максвелла решена задача магнитостатики для катушки с сердечником (Рис. 1). Построено аналитическое решение для тензора электромагнитной индукции на основе тензорной декомпозиции Гельмгольца [3], а также получено аналитическое решение модифицированной системы уравнений Максвелла для магнитной индукции. Качественно описан эффект усиления поля при добавлении в катушку сердечника.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №-23-11-00363.

Литература

1. Ivanova E. A. On a new theory of the Cosserat continuum with applications in electrodynamics //Recent Approaches in the Theory of Plates and Plate-Like Structures. – 2022. – С. 75-87.
2. Ivanova E. A. Modeling of physical fields by means of the Cosserat continuum //ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 2023. – Т. 103. – №. 4. – С. e202100333
3. Dassios G., Lindell I. V. On the Helmholtz decomposition for polyadics //Quarterly of Applied Mathematics. – 2001. – Т. 59. – №. 4. – С. 787-796.

НОВЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Шевченко В.Я., Перевислов С.Н., Сычев М.М.

НИЦ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей", Санкт-Петербург, Россия
perevislov@mail.ru

Разработан новый керамический материал – композит алмаз-карбид кремния («Идеал»), который в сравнении со стандартными материалами на основе корунда, SiC и В₄С обладает наибольшими механическими свойствами.

Проведена работа по оценке воздействия звуковых, ударных волн и баллистических свойств на бронеконструкции, включающие керамику «Идеал».

Решающее значение имеет взаимодействие керамики с ударной волной. Поэтому для оценки надежности бронеконструкции необходимо изучить распространение ударных волн в керамике и бронеконструкции, выбрать максимально надежный вид керамического материала-брони и определить оптимальную конструкцию бронепанели.

Типичная броня представляет из себя пластину из многокомпонентных слоев керамики, резины, подложки из сплава АМг6, СВМП или арамидной ткани, а также 2 лицевых кевларовых слоя ткани, разделенных слоем углепластика и задний эпоксидный слой. Иногда конструкция заключена в жесткую рамку. Максимально эффективная работа бронеконструкции заключается в локализации всей энергии ударной волны в керамическом слое и гашение этой энергии, до минимального уровня.

В момент удара волны сжатия распространяется от точки контакта по поверхности в глубь бронеконструкции и в ударник. Ударные волны сжатия в конечном итоге отражаются в виде волн растяжения от задней поверхности керамики. Во время удара в керамике возникают два вида напряжений: межслойное растяжение и напряжение сдвига, вызывающие разрушение керамики. По мере того, как ударник пробивает броню с передней стороны, выпуклость задней поверхности будет расти. Разрушение керамики позволяет быстрее рассеивать энергию, что помогает разрушить ударник и остановить его внутри брони.

Для большинства керамик упругая волна, возникающая вследствие высокоскоростного удара, состоит из поверхностных волн (Релеевская волна), сдвиговых волн (S-волна) и волн сжатия (P - волна). Волновая энергия нагружения грубо разделяется в таком соотношении: Релеевская волна 67 %, S-волна – 26 % и волна сжатия (P – волна) – 7 %.

Общая картина удара включает несколько процессов. Ударник подвергается торможению за счет разрушения керамики (Герцевого образования радиальных и круговых трещин) и разрушения ударника. Соответственно в керамике происходит образование коноиды разрушения, радиальных и круговых трещин. Такой конус называют конусом Герца. Именно в этой области происходит суперпозиция проходящих и отраженных волн, приводящая к резкому возрастанию энергии напряжения и разрушению (дроблению) керамики. Определяющим механизмом является хрупкое разрушение.

При динамическом нагружении скорость звука являются главным фактором, определяющим возможность снижения энергии разрушения. Отсюда можно построить зависимость для ряда керамических материалов по степени их сопротивления динамическому нагружению (рис. 1).

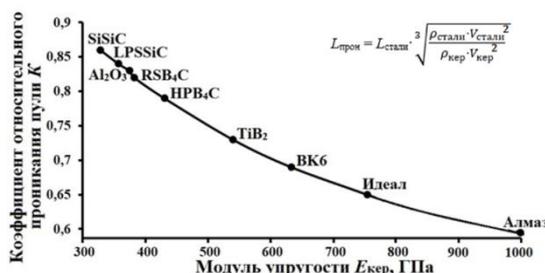


Рис. 1. Зависимость коэффициента относительного проникновения пули в керамику от ее модуля упругости

Самый лучший материал, это Алмаз; «Идеал» не уступает по свойствам монокристаллическому алмазу. Материал «Идеал» получают из алмазных порошков методом пропитки пористых заготовок жидким кремнием.

По сравнению со стандартными материалами реакционно-спеченными карбидом кремния и карбидом бора керамика «Идеал» показала наивысшие механические и динамические характеристики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-73-30019.

ФУНКЦИЯ ГРИНА ДЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО ОПЕРАТОРА В УПРУГОМ ВОЛНОВОДЕ НА ВИНКЛЕРОВСКОМ ОСНОВАНИИ

Перель М.В.¹, Эрбаш Б.²

1 - Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия

2 - Эскишехирский Технический Университет, Турция

m.perel@spbu.ru

Мы разрабатываем подход к изучению волноводных задач для волн различной природы, основанный на сведении волновых уравнений к уравнению типа Шредингера

$$K(x)\Psi = -i\Gamma \frac{\partial \Psi}{\partial x}.$$

Здесь $K(x)$ -- самосопряженный дифференциальный по z оператор на поперечном сечении волновода, зависящий от x как от параметра; Γ -- самосопряженная обратимая матрица. Эта форма записи уравнений позволяет использовать для задач распространения волн результаты, полученные при решении квантово-механических проблем. Такой подход применялся в [1] при изучении перевозбуждения нормальных волн в нерегулярном волноводе Земля-ионосфера, волновыми уравнениями являлись уравнения Максвелла. Общая схема построения решений для слабо нерегулярных волноводов в адиабатическом случае и при наличии перевозбуждения мод предложена в [2], где для случая волноводных задач получены формулы, аналогичные квантово-механическим формулам Ландау-Зинера. Для упругого изотропного слоя с отсутствием напряжений на границе такая запись уравнений упругости, включающих в себя закон Гука, использовалась в [3] при описании отражения волн в нерегулярном упругом слое вблизи сечения отсечки и в [4] при изучении адиабатических мод в упругом слое, лежащем на Винклеровском основании. Мы продолжаем эту работу. Монохроматические волны частоты ω в плоском изотропном упругом слое $-1 \leq z \leq 1$, $-\infty < x < \infty$ описываются уравнениями Ламе с граничными условиями $\sigma_{13} = \sigma_{33} = 0$ при $z = 1$ и $\sigma_{13} = 0$, $\sigma_{33} = \theta u_3$ при $z = -1$, здесь σ_{ij} -- тензор напряжений, u_1 и u_3 -- смещения в направлениях x и z . Уравнения упругих волн и закон Гука сводятся к системе четырех уравнений относительно неизвестной функции $\Psi = (-i\omega u_1, -i\omega u_3, \sigma_{11}, \sigma_{13})^T$. Было выяснено, см. [4], что нормальные волны определяются в терминах собственных значений β_n и собственных элементов φ_n "поперечной" спектральной задачи $K \varphi_n = \beta_n \Gamma \varphi_n$.

В настоящей работе мы находим функцию Грина "поперечного" оператора и решаем уравнение

$$K\Phi - \beta\Gamma\Phi = F,$$

где β - параметр. Такое уравнение возникает в старших порядках адиабатического разложения решения, см. [4]. Особенностью задачи является то, что мы находим решения не только неоднородных уравнений упругости, но неоднородность также возникает в соотношении между напряжениями и деформациями.

Этот результат может быть полезен при рассмотрении задач термоупругости, а также в задачах с наличием распределенной нагрузки на границах волновода.

Литература

1. М.В. Перель // Перевозбуждение мод в анизотропном волноводе Земля-ионосфера на трансэкваториальных трассах при наличии двух близких точек вырождения, Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 33:11 1990. 1208-1216
2. Fialkovsky, M. Perel // Mode transformation for a Schrödinger type equation: Avoided and unavoidable level crossings, J Math Phys, 61:4 2020. 043506
3. M.V. Perel, J.D. Kaplunov, G.A. Rogerson // An asymptotic theory for internal reflection in weakly inhomogeneous elastic waveguides, Wave motion, 41:2 2005. 95-108
4. B. Erbaş, N. Ege, M.V. Perel // Adiabatic normal modes in a slowly irregular elastic waveguide resting on a Winkler foundation, 2023 Days on Diffraction (DD). IEEE, 2023. 1—7

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЧНО НАСЫЩЕННОГО ПОРОУПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С БАРЬЕРОМ В ВИДЕ ТРАНШЕИ

Петров А.Н., Игумнов Л.А., Белов А.А., Быченков В.А.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, Россия
andrey.petrov@mech.unn.ru*

Исследуется возможность снижения интенсивности поверхностных волн установкой барьера в виде открытой траншеи на основе решения пространственной задачи динамической теории пороупругости методом граничных элементов.

Приводится гранично-элементное решение задачи о действии динамической нагрузки на деформируемое частично насыщенное пороупругое полупространство с волновым барьером в виде траншеи в форме прямоугольного параллелепипеда. Рассматривается воздействие силового механического скачка по времени на участке дневной плоскости полупространства в форме квадрата, расположенном на заданном расстоянии от траншеи. Дневная плоскость полупространства без нагруженного квадрата и граница траншеи задается как свободная от механических силовых воздействий. Выделенная граница лицевой плоскости считается проницаемой. Граница траншеи рассматривается следующей: нулевые поровые давления смачивающего и несмачивающего наполнителей и случай нулевых потоков смачивающего и несмачивающего наполнителей.

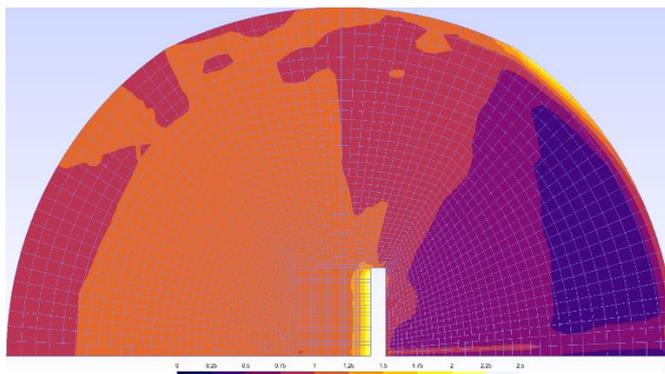


Рис. 1. Тепловая карта коэффициента уменьшения амплитуды при глубине траншеи 2м.

Математическая модель представляется системой дифференциальных уравнений линейной трехмерной динамической теории пороупругости для трехфазной модели материала в изображениях по Лапласу. Вводится обобщенный пятикомпонентный вектор изображений перемещений, который объединяет изображения трехкомпонентного вектора перемещений скелета и два изображения компоненты давления. Строятся матрицы фундаментальных и сингулярных решений для начальной задачи трехмерной частично насыщенной пороупругой среды, с помощью которых выводятся интегральные представления для линейризованной модели частично насыщенной пороупругой среды. После регуляризации с использованием интегралов типа интегралов Гаусса граничные интегральные уравнения численно решаются с помощью гранично-элементной технологии.

Приводятся результаты численного анализа влияния коэффициента насыщенности пороупругого материала на волновые картины в полупространстве при наличии волнового барьера, влияние глубины и ширины траншеи на волновые картины в полупространстве, влияния граничных условий на границе барьера для случаев проницаемых и непроницаемых границ на волновые картины в полупространстве. Оценивается эффективность экранирования поверхностных волн барьером на основе значений коэффициента уменьшения амплитуды. Приводятся карты коэффициента уменьшения амплитуды при различных значениях коэффициента насыщенности пороупругого материала полупространства и геометрических размерах барьера (рис. 1).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00138).

ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

Арутюнян А.Р., Петручок А.И., Судьенков Ю.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
a.arutyunyan@spbu.ru

В настоящее время всё больше и больше в различные сферы нашей жизни внедряются полимерные и композиционные материалы на их основе. Данные материалы, в отличие от металлов, обладают большей лёгкостью, коррозионной прочностью и меньшей плотностью. Исследования эволюции механических характеристик полимерных конструкционных материалах являются важной задачей материаловедения, позволяющей повысить безопасность производственных объектов, установить наличие критических дефектов и устранять браки на начальных стадиях производства.

Диаграмма растяжения, построенная по деформации образца, характеризует поведение материала при деформировании, что даёт возможность проводить анализ неупругих явлений в твёрдом теле по продольным деформациям. Такого же рода анализ можно провести по записям поперечных деформаций, на изменение которых в большей степени сказывается перестройка микроструктуры деформируемого тела.

Для исследования изменения структуры материалов используются различные методы диагностики, в том числе и неразрушающие методы контроля, которые позволяют проводить исследование материалов без их разрушения. В данной работе используется оптико-акустический (ОА) метод. Применение данного метода для исследования структуры материалов, в частности, рассматривалось в работах [1-3]. С использованием ОА метода в работе исследуются изменения коэффициента поперечных деформаций, скоростей продольных и поперечных волн. Также в работе исследуется энергетический баланс в ходе механических испытаний с использованием тепловизионных методов.

Рассматривается теория предложенная В.А. Кузьменко [4]. Согласно данной теории работа внешних сил при деформировании твердых тел W представляется как сумма энергии, затраченной на объемные деформации W_v и энергии, затраченной на сдвиговые деформации W_s ($W = W_v + W_s$). При этом доли работ изменения объема W_v/W и деформаций сдвига W_s/W определяются изменением коэффициента поперечных деформаций. Тепловая и скрытая энергии деформации в этом случае также могут быть разделены на объемные и сдвиговые части.

При этом следует отметить, что коэффициент поперечной деформации определяется деформациями, происходящими одновременно во взаимно перпендикулярных направлениях, ортогональных направлению действия внешней силы, то есть обусловлен действиями внутренних сил. Этот факт выражает его потенциальную чувствительность к структурным перестройкам при деформировании материалов [5-7].

Одновременная регистрация тепловыделения и изменения коэффициента поперечных деформаций ОА методом позволили оценить вклад работ изменения объема и деформаций сдвига в энергетический баланс при квазистатическом растяжении образцов полимерных материалов. Полученные результаты продемонстрировали вклад сдвиговых деформаций в изменение скрытой энергии на стадиях линейного и нелинейного поведения полимеров при деформировании. Наблюдается существенно нелинейный характер изменений удельной энергии объемных деформаций и удельной энергии сдвиговых деформаций, который определяется нелинейным характером изменения коэффициента поперечных деформаций.

Литература

1. А. А. Карабутов, Л. И. Кобелева, Н. Б. Подымова, Т. А. Чернышева // Техническая акустика, 8 2008. 2–13
2. А. Р. Арутюнян, Б. А. Зимин, Ю. В. Судьенков // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 1, 3 2008. 88–96
3. Ю. В. Судьенков // Физика твёрдого тела, 62:1 2020. 125–130
4. В. А. Кузьменко // Развитие представлений о процессе деформирования материалов. 1968
5. А. П. Гусенков, В. В. Зацаринный, Р. М. Шнейдерович // Механические методы испытаний. Заводская лаборатория, 4 1971. 464–468.
6. А. А. Ильюшин // Пластичность. 1948. 376 с.
7. В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский // Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. 1987. 236 с.

УПРАВЛЕНИЕ СВЁРТЫВАНИЕМ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Пикалов Р.С.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Россия
pickalovrs@gmail.com*

Космические тросовые системы способны решать широкий класс практических задач: доставка грузов, создание искусственной гравитации, изменение орбиты и осуществление транспортных операций, захват и удаление объектов космического мусора [1]. При этом многие подобные проекты требуют использование тросов переменной длины, в частности задачи увода космического мусора с околоземных орбит. Одна из возможных схем увода предполагает захват тросом космического мусора, после чего трос свёртывается и обеспечивает безопасное сближение с последующей стыковкой космического аппарата - буксира с объектом космического мусора. После стыковки, они движутся как единое целое.

Неустойчивость колебаний троса является основной трудностью в реализации процесса свёртывания при осуществлении сближения с буксиром. При свёртывании с постоянной скоростью, трос начинает наматываться на буксир. Это может привести к выходу из строя буксира, разрыву тросовой связи и столкновению буксира с уводимым объектом. Вопрос разработки законов управления тросом для осуществления безопасного и эффективного сближения является актуальной задачей, требующей детального изучения и решения. Анализ научной литературы посвященной рассматриваемой проблеме показал, что вопрос разработки законов управления свёртыванием троса достаточно хорошо исследован и проработан для случаев круговых орбит, но отсутствуют эффективные решения для эллиптических орбит. В связи с этим, задача получения закона управления способного реализовывать свёртывание на эллиптических орбитах представляет практически интерес, ее решение существенно расширит область возможного применения подобных систем как в задачах уборки космического мусора, так и в миссиях с тросовыми системами, предполагающими управление длиной троса.

В работе рассмотрено плоское орбитальное движение системы буксир – космический мусор по эллиптической орбите. Построена математическая модель данной системы. С ее помощью разработан закон управления свёртыванием тросовой системы. Доказана асимптотическая устойчивость управляемого движения на эллиптической орбите. Проведена серия численных экспериментов с целью изучения влияния параметров закона управления и эксцентриситета на динамику системы во время свёртывания троса. Результаты показывают, что предложенный закон управления [2] решает задачу сближения буксира с космическим мусором на эллиптической орбите. Полученные результаты могут быть использованы при подготовке миссий по уводу космического мусора с помощью тросовых систем и выполнения операций, связанных со свёртыванием троса.

Литература

- 1 V. S. Aslanov, A.S. Ledkov // Dynamics of the Tethered Satellite Systems. 2012. 350 p.
- 2 S. Ledkov, R. S. Pikalov // Nonlinear Control of Tether Retrieval in an Elliptical Orbit, Russian Journal of Nonlinear Dynamics, 19:2 2023. 201–218

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДАЛЬНО-ЛОКАЛИЗОВАННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Пискун Н.В., Лукин А.В., Попов И.А.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия
nmojgova@yandex.ru*

Модально-локализованные акселерометры, основанные на мониторинге отношения амплитуд колебаний по разным степеням свободы системы, демонстрируют на порядки более высокую чувствительность

по сравнению с датчиками с частотным выходом [1]. Наиболее распространенными являются модально-локализованные датчики с несколькими чувствительными элементами (чаще всего балочными), в которых измеряемой величиной является отношение амплитуд двух резонаторов. При этом, значительный научный и практический интерес представляет изучение уникальных спектральных (модальных и резонансных) свойств микромеханических систем с проектируемыми возмущениями геометрии, в частности балок с начальной погибью [2,3].

При проектировании микромеханических датчиков конечно-элементное (КЭ) моделирование не является всеобъемлющим инструментом, так как КЭ расчеты не позволяют проводить качественный (параметрический) анализ режимов работы прибора. Следовательно, существует необходимость в построении компактных моделей (моделей пониженного порядка, reduced order modelling) датчика, которые являются вычислительно эффективными и при этом учитывают конкретные конструкционные свойства и условия работы устройства [4]. При простых геометрических формах чувствительного элемента может быть использован аналитический подход к решению данной задачи, однако реальные устройства не всегда имеют такую форму. Другой подход к созданию компактных моделей состоит в использовании результатов КЭ моделирования, что позволяет учесть реальную геометрию устройства, в том числе с учетом технологических несовершенств.

В данной работе представлена реализация методики синтеза моделей пониженного порядка на примере микромеханического модально-локализованного акселерометра с чувствительным элементом в виде балки с начальной погибью. Реализованный подход позволяет алгоритмически строить модели пониженного порядка для акселерометров на основе результатов нескольких прогонов методом конечных элементов. Полученные результаты сравниваются с полученными ранее аналитическими результатами [5] на основе метода Галеркина для математической модели балки Бернулли-Эйлера с начальной погибью.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10009, <https://rscf.ru/project/21-71-10009/>.

Литература

1. Yang J., Zhong J., Chang H. A Closed-Loop Mode-Localized Accelerometer // J. Microelectromech. Syst. 2018. V. 27. № 2. P. 210 – 217.
2. Kessler Y., Liberzon A., Krylov S. Flow Velocity Gradient Sensing Using a Single Curved Bistable Microbeam // J. Microelectromech. Syst. 2020. V. 29. № 5. P. 1020 – 1025.
3. Najjar F., Ghommem M., Abdel-Rahman E. Arch microbeam bifurcation gas sensors // Nonlin. Dyn. 2021. V. 104. P. 923 – 940.
4. Baur U., Benner P., Feng L. Model order reduction for linear and nonlinear systems: a system-theoretic perspective // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2014. – Т. 21. – №. 4. – С. 331-358.
5. Indeitsev, D. A., et al. "Model of a Micromechanical Mode-Localized Accelerometer with an Initially Curved Microbeam as a Sensitive Element." Mechanics of Solids 58.3 (2023): 779-792.

ОПТИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТА ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ МЕТАЛЛОВ ЗА СЧЕТ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА

Плехов О.А., Бартоломей М.Л., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Манухина К.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия
roa@icmm.ru

Хорошо известно, что создание остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое материала приводит к изменению характера процесса зарождения и распространения усталостных трещин. Лазерная ударная проковка (LSP) является одним из наиболее эффективных методов создания значительных остаточных сжимающих напряжений в металлах на более 1 миллиметра. Реализация метода требует использования импульсного лазера высокой энергии в сочетании с решением комплекса физических и механических проблем. Во время процесса LSP металлическая поверхность обрабатываемой детали подвергается воздействию наносекундных высокоэнергетических лазерных импульсов, которые индуцируют в ней упругопластические волны. Распространение упругопластических волн в материале обрабатываемой детали приводит пластическому деформированию поверхностного слоя и, как следствие, возникновению благоприятных остаточных напряжений. Остаточные напряжения, создаваемые LSP, могут достигать амплитуды до -1 ГПа.

В данной работе теоретически и экспериментально исследуется влияние LSP на формирование остаточных напряжений в образцах титана (BT6), алюминия (Д16) и меди (М1Т). Теоретическое описание эффекта лазерного воздействия на вещество включает решение нескольких связанных физическо-механических задач. Первая задача - испарение материала (образование плазменного факела). Плазма расширяясь генерирует волну сжатия в обрабатываемом материале с амплитудой, значительно превышающей предел упругости Гюгонио. Вторая задача - распространение упругопластической волны в материале с характерной длительностью в несколько десятков наносекунд. Третья задача - расчёт самоуравновешенного поля остаточных напряжений в образце, вызванного пластически деформированным поверхностным слоем. Четвертая задача заключается в моделировании влияния остаточных напряжений поля на процессы зарождения и распространения усталостных трещин. Каждая из задач требует отдельного научного исследования.

На данном этапе работы проведено детальное исследование зависимости максимального давления и длительности импульса напряжения от параметров электромагнитного воздействия для всех исследованных материалов. Параметры импульса определяются по данным прямого измерения скорости свободной поверхности на основе фотонного доплеровского велосиметра (PDV). PDV позволяет измерять скорость свободной поверхности мишени в диапазоне от 5 м/с до 1380 м/с с точностью до 2 м/с. Конструкция позволяет проводить одновременно измерение в четырёх точках на поверхности образца с частотой дискретизации 10 Гбит/с. На рисунке 1 представлены характерные результаты измерения скорости свободной титановых образцов при различных амплитудах воздействия.

В результате проведённой работы создана база экспериментальных данных для верификации численных моделей распространения упругопластических волн при наносекундном электромагнитном воздействии и определены оптимальные параметры для реализации технологии LSP для исследованных материалов.

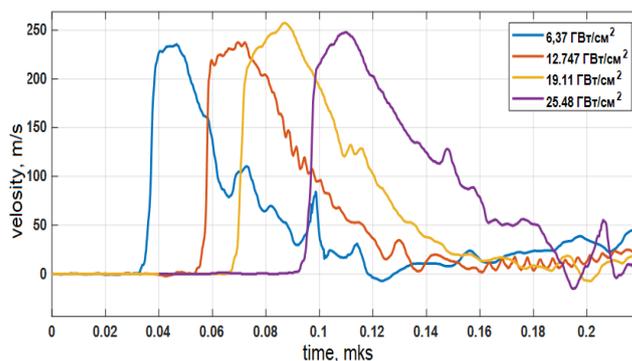


Рис. 1. Профиль скорости свободной поверхности при различных плотностях электромагнитного воздействия (для наглядности графики показаны со смещением вдоль оси времени).

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ПРИ ЗАДАННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ СО СТОРОНЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Пономарева С.Н., Гребенников А.С., Томилина Т.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
ponomareva@imash.ac.ru

В последнее время все большее значение приобретают космические аппараты (КА), в состав которых в качестве полезной нагрузки входит комплекс научной аппаратуры (КНА) для изучения физических явлений в космосе. В конструкции таких КА предусматривается специальная термостабилизированная платформа (ТСП) для размещения КНА, отдельные приборы могут располагаться и в других местах КА в зависимости от их функционала. При этом каждый физический эксперимент в космосе - это уникальная задача, требующая учета многих факторов, в том числе и лимит времени, в течение которого надо разработать соответствующий прибор. Вследствие этого параметры физического эксперимента зачастую не полностью учитываются, а конструктивные решения получаются неоптимальными, с большими запасами по массе и/или по прочности. Иногда такой подход к конструированию служит причиной неустановки научного прибора на борт.

Известно, что на этапе выведения КА на траекторию полета возникают большие механические

нагрузки, которые передаются и на приборы. Основным требованием со стороны разработчиков КА к бортовой аппаратуре, определяющим ее конструкцию, является способность прибора выдерживать экстремальные механические нагрузки и при этом проводить научные исследования в соответствии с поставленной целевой задачей. По этим критериям вырабатываются соответствующие требования для конструкторско-доводочных механических испытаний разрабатываемых приборов в ходе наземной экспериментальной отработки. В рамках современного подхода механические требования задаются в виде спектральных характеристик: для вибрации это спектральная плотность мощности ускорения (psd , $\text{g}^2/\text{Гц}$), а для удара - спектр ударного отклика конструкции ($\text{shock response spectrum SRS}$, g) на ударное возбуждение, которое в данном случае должно подбираться под заданный SRS таким образом, чтобы на местах крепления прибора к КА измеренные ускорения соответствовали рассчитанному по соответствующему алгоритму SRS.

В данной работе предлагается метод адаптивной разработки космических приборов на основе функциональных требований по проведению научных исследований и заданных требований по применению на борту КА (по уровням нагрузок, по массе, габаритам, условиям на интерфейсе) с учетом результатов численного моделирования и натурных испытаний опытных образцов. Приведены первые результаты по разработке эффективных численных моделей на базе метода конечных элементов и методов моделирования механического воздействия на прибор со стороны КА, их реализация в процессе стендовых испытаний. Представлен ударный стенд на основе плиты на упругом основании, разработанный в ИМАШ РАН, для реализации ударного воздействия, со стороны КА, соответствующего заданному спектру SRS.

Приведены примеры конструкций для российских физических приборов, которые успешно прошли наземную экспериментальную отработку и летные испытания в соответствии с заданными механическими воздействиями со стороны КА в проектах НАСА «Mars-Odyssey», «LRO», «MSL» (с марсоходом Кьюриосити), в проектах ЕКА «TGO» и «VeriColombo», и в российском проекте «Луна-Глоб» (КА «Луна 25»).

Исследования проводились в рамках Темы № FFG-2023-0002

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В НЕКОТОРЫХ МЕТАМАТЕРИАЛАХ

Порубов А.В.

Институт проблем машиноведения РАН, Россия
alexey.porubov@gmail.com

Нелинейные локализованные волны деформации представляют особый интерес для исследований, поскольку они могут переносить значительную энергию, и это важно для анализа деформационно-прочностных свойств. Возможность переноса энергии без потерь связана с воздействием не только нелинейности, но и дисперсии. Разработка новых обобщенных моделей материалов с управляемой внутренней структурой, нелинейных локализованных процессов деформации с целью определения влияния нелинейности и дисперсии на возможность управления внутренними параметрами и достижения необходимых деформационно-прочностных свойств метаматериалов, все более востребована в создании новых конструкций и механизмов.

В настоящей работе асимптотически исследуется ряд цепочечных моделей метаматериала. В континуальном пределе используется асимптотическая процедура, позволяющая расщепить связанные нелинейные уравнения в частных производных и получить модельное уравнение для нелинейных волн деформации. Модельные уравнения могут обладать аналитическими решениями в виде бегущей локализованной волны постоянной формы. Существование таких решений зависит от параметров модели метаматериала. Численно исследуется возможность генерации локализованных волн деформации. Обсуждается возможность управление нелинейно-упругими свойствами метаматериала для достижения требуемого характера локализации нелинейных волн деформации.

Предварительные результаты получены в работах [1,2].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № FFNF-2024-0002)

Литература

1. Alexey V. Porubov, Nonlinearity and Dispersion in Extended Mass-in-Mass Metamaterials In: H. Altenbach and V. Eremeyev (eds.), *Advances in Linear and Nonlinear Continuum and Structural Mechanics*, Advanced Structured Materials 198 (2023) pp. 369-384
2. Porubov A.V. //Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 119 (2023) 107095.

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД КАК СЛЕДСТВИЕ ПЕРЕПРОИЗВОДСТВА ЭНТРОПИИ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА ВЯЗКИХ И ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБЕ

Потапов А.Г.

ООО "Газпром ВНИИГАЗ", Россия
gregor1108@yandex.ru

В докладе рассматриваются возможные причины возникновения и развития ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) при течении вязких и вязко-пластичных жидкостей.

Гипотеза Н.Н. Моисеева. «Уравнения движения вязкой жидкости, по-видимому, допускают целый спектр возможных почти периодических решений и им при известных условиях соответствует целая система возможных установившихся течений жидкости». Приняв эту гипотезу в качестве рабочей, для стационарных течений различных сред запишем уравнение Дарси-Вейсбаха в следующем виде [1].

$$\frac{1}{\rho} dP_{ij} \approx \lambda_{ij} \frac{v_{ij}^2}{2D} dx, \quad (1)$$

где P – давление; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ – плотность жидкости; v – средне-расходная скорость потока; D – диаметр трубы; i – индекс течения, при $i=1$ – ламинарное течение Пуазейля, $i=2, \dots$ – стационарные базовые турбулентные течения; j – индекс скорости течения.

Тренды $\lambda_{ij} = f(Re)$ при $i=1$ и $i=2$ имеют общую точку бифуркации, для вязкой жидкости $Re_b = 1000$. При течении вязко-пластичных жидкостей с увеличением параметра Хедстрема характерные точки смещаются в сторону больших чисел Рейнольдса

Определение И. Пригожина: «...в стационарном состоянии положительное производство энтропии компенсируется отрицательным потоком энтропии...Состояние равновесия соответствует частному случаю, когда производство энтропии и поток энтропии обращаются в нуль». Состояние равновесия наступает, когда $d\Phi = 0$, при этом $T = const$ и $P = const$, условия стационарного состояния когда $d\Phi=0$ при условии $T \neq const$ и $P \neq const$. В этом случае для простой системы при совместном анализе объединенного уравнения первого и второго закона термодинамики и уравнения Дарси-Вейсбаха (1) получим следующее соотношение.

$$S_{ij} \approx \lambda_{ij} \frac{v_{ij}^2}{2D} dx, \quad (2), \quad \text{где } S - \text{энтропия системы, Дж/К.}$$

Используя уравнение (3), можно получить следующие соотношения для условий:

$$\lambda_{11} = \lambda_{22} \quad (S_{22}/S_{11}) \approx (Re_{22}/Re_{11})^2 = n_\lambda^2 \quad (3)$$

$$v_{11} = v_{22} \quad (S_{21}/S_{11}) \approx (\lambda_{21}/\lambda_{11}) = n_v \quad (4)$$

Для оценки зависимости отношений энтропий от числа Рейнольдса при условии (4)

$$\frac{d(S_{21}/S_{11})}{dRe} = k_v (S_{21}/S_{11}) \quad (5)$$

Перепроизводство. Решаем уравнение (5) при начальном условии в точке бифуркации $Re = Re_b$,

$$\Delta S_v / S_{11} = \exp[k_v (Re - Re_b)] - 1, \quad (6)$$

где $\Delta S_v = S_{21} - S_{11}$ величина перепроизводства энтропии.

В пределах ЛТП можно определить три характерные точки. Уровни перепроизводства энтропии равны: в точке бифуркации $(\Delta S_v / S_{11})_b \sim 0\%$; кризиса $(\Delta S_v / S_{11})_c \sim 60\%$; стабилизации $(\Delta S_v / S_{11})_s \sim 100\%$ и являются общими для вязких и вязко-пластичных жидкостей.

Заключение. Установлено, что ЛТП вязких и вязко-пластичных жидкостей в трубе обусловлен перепроизводством энтропии ламинарного потока. В пределах ЛТП определены три характерные точки: бифуркации (Re_b); кризиса (Re_c) и стабилизации (Re_s) нового (турбулентного) режима. Показано, что уровни перепроизводства энтропии в этих точках не зависят от параметра Хедстрема.

Литература

1. Природа и время жизни локализованных возмущений при ламинарно-турбулентном переходе течения вязкой жидкости в трубе.//Вести газовой науки. М.: ГазпромВНИИГАЗ, 2022.-№2.С. 46-52.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ В СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧАХ

Прозорова Э.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
e.prozorova@spbu.ru

Предметом настоящего исследования является изучение влияния момента количества движения в механике сплошных сред и кинетической теории, анализ положений, лежащих в основе классических формулировок теории. Изменение момента влечет появление дополнительной силы, которая может играть роль малого возмущения, влияющего на устойчивость структуры. Полученные эффекты могут сказаться при критических и около критических режимах работы самолетов, при сближении самолетов, ракет, в различных устройствах, в строительных конструкциях, а также при некоторых естественных процессах. Величина дополнительной силы определяется значением градиента физических величин (плотности, скорости, количества движения) и структурой изучаемого объекта. В случае динамического формирования структуры изменяется положение центра инерции, что влечет за собой изменение момента количества движения. В некоторых работах строительной механики возникновение дополнительной силы за счет распределенного момента, возникающего за счет градиентов физических величин, учитывается. В общем случае влияние не рассматривается. В статическом случае возникновение момента возникает при неравномерном распределении параметров. Обтекание тел всегда сопровождается большими градиентами плотности, скоростей, давлений, энергии. Следовательно, уточнение математических моделей является актуальной задачей. Мы рассматриваем наиболее общие открытые нестационарные системы, являющиеся объектами исследования в механике сплошной среды и в кинетике. Математическое моделирование таких объектов вызывает сложности, так как их описание представляется системой нелинейных нестационарных уравнений. Выполненный математический анализ уравнений механики сплошной среды с исходным несимметричным тензором напряжений, показал, что в плоском случае для четырех неизвестных в классической формулировке мы имеем три уравнения: два уравнения из условия равновесия напряжений и одно уравнение- условие равновесия момента. Таким образом, мы нуждаемся в замыкании задачи с помощью дополнительного условия. В классическом варианте таким условием является условие симметрии тензора напряжений. Часто уравнения, полученные для равновесного режима, переносятся на открытые неравновесные системы, используются уравнения гиперболического типа и уравнение Лапласа. Анализ показывает, распределенный момент играет существенную роль во всех неравновесных процессах. Рассматриваются новые свойства и примеры из кинетической теории, механики жидкости и газа, теории упругости. Исследуются эффекты скольжения газа и жидкости около кристаллических металлических поверхностей. Автор придерживается физического определения точки.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАВИТАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

Прокофьев В.В., Очеретяный С.А., Филатов Е.В., Топейцев Г.В.

Институт механики МГУ, Москва, Россия
vlad.prokof@yandex.ru

Исследуются различные режимы течения в гидравлической системе, содержащей вентилируемую каверну, с отрицательным числом кавитации в широком диапазоне поддувов газа. При сравнительно небольших величинах поддува, унос газа связан со структурами, развивающимися на неустойчивой границе в кормовой части каверны. При увеличении поддува появляются низкочастотные кавитационные автоколебательные режимы со значительными пульсациями давления, как в каверне, так и во всей гидравлической системе. Показана возможность использования режима автоколебаний для создания генератора периодических импульсных струй.

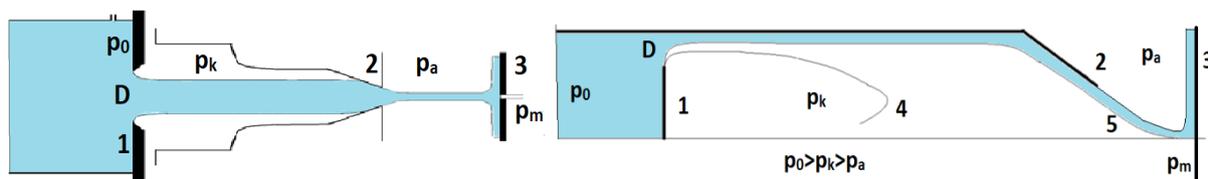


Рис. 1

рис. 2

На рис. 1 показана простейшая схема исследуемого течения – кавитатор 1 (пластина, диск) находится в канале (или трубе) постоянного сечения. Канал заканчивается сужением, через которое жидкость в виде струи истекает в атмосферу с давлением p_a и взаимодействует с жестким экраном 3. За кавитатор осуществляется поддув газа (образуется вентилируемая каверна), при умеренных поддувах образуется обычная каверна 4, замыкающаяся внутри тубы (на рис. 1 по схеме Эфроса с возвратной струйкой). С ростом поддува число кавитации приближается к предельному, зависящему от загромождения канала, длина каверны растет – хвостовая часть каверны приближается к выходу из канала. Заметим, что давление в каверне p_k больше p_a и по отношению к внешнему давлению это есть каверна с отрицательным числом кавитации – знак кривизны границы каверны меняется, поверхность раздела фаз становится неустойчивой в смысле Релея-Тейлора. На рис.1 (позиция 5) схематически показан предельный случай замкнутой каверны. Исследования показали, что в этом режиме течения реализуется высокочастотная генерация импульсных струй за счет развития Релей-Тейлоровских двухфазных структур, в результате на экране 3 генерируются довольно интенсивные импульсы давления. При этом давление в каверне остается примерно постоянным и струйное течение выше хвостовой части каверны также стационарно. При дальнейшем увеличении поддува газа стационарная каверна становится разомкнутой, в реальности течение становится нестационарной (периодическое смыкание-размыкание каверны), возникает низкочастотный автоколебательный режим течения во всей системе (частоты на порядок ниже Релевских). Показано, что в этом режиме может быть реализован дискретный (помпажный) режим генерации струй. При дальнейшем увеличении поддува реализуется режим с периодическим выбросом газа в область перед кавитатором, при этом частота автоколебаний заметно падает, а интенсивность ударного воздействия на экран 3 может даже возрасти. Показано, что путем изменения формы кавитатора (клин, конус) можно значительно увеличить эффект ударного воздействия на экран 3 в этом режиме. Схема, показанная на рис. 1 была экспериментально реализована в плоской постановке, на рис. 2 показана схема течения, реализованная в осесимметричной постановке. Здесь изменена топология течения – струя, истекающая из отверстия в диафрагме 1 находится в центре воздушной каверны. Показано, что и в этом случае возникают качественно те же режимы генерации низкочастотных импульсных струй, что и в случае течения с центральной каверной. Несмотря на принципиальное отличие течения в области взаимодействия струи с конической выходной насадкой сопла, при малых поддувах газа здесь также реализуется высокочастотный режим генерации импульсных струй.

Итак, показана возможность использования режима автоколебаний для создания генератора периодических импульсных струй. В отличие от известных импульсных установок, периодический режим прерывистого истечения жидкости реализуется здесь при постоянных параметрах, подаваемых в систему жидкости и газа, без применения каких-либо механических устройств. Исследовано влияние параметров генератора на эффективность его работы. Нужно сказать, что по сравнению со стационарным режимом в нестационарном случае количество параметров течения существенно увеличивается – существенно влияют объем каверны и даже акустические свойства подводящего воду трубопровода. Диапазон существования различных режимов и эффективность работы генератора зависят также от соотношения сопротивлений кавитатора и выходного сопла. Кроме того, при одинаковых условиях наблюдается существование различных частотных мод автоколебаний, от которых также существенно зависит эффективность генератора.

ГИДРОМЕХАНИКА КРОВОТОКА ПРИ АНЕВРИЗМЕ АОРТЫ

Простомолотов А.И., Везуб Н.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия
aprosto@inbox.ru

Кровь представляет собой взвесь клеток в водном растворе, в котором 92% составляет вода [1]. В крови присутствуют клетки нескольких типов, но основные – эритроциты, концентрация которых очень высокая –

примерно $5 \times 10^6 \text{ мм}^{-3}$. Эритроциты – это красные клетки, которые содержат белок – гемоглобин. Вязкость крови меняется так же, как её растворителя – воды. Характерным свойством эритроцитов является тенденция к образованию агрегатов в виде «монетных» столбиков. Механизм образования столбиков до конца не выяснен, но считается, что эритроциты притягиваются друг к другу локализованными на их поверхностях «заряженными» частями. Процесс агрегации протекает при наличии асимметричных макромолекул (фибриногена и глобулинов), с повышением концентрации которых процесс агрегации ускоряется. Таким образом, цельную кровь можно рассматривать как ньютоновскую жидкость, в которой взвешены эритроциты. Процесс оседания эритроцитов имеет важное диагностическое значение. На практике используется процентное соотношение доли эритроцитов в единице объема крови – гематокрит. Существенное изменение гематокрита свидетельствует о заболеваниях.

В данной работе рассматривается течение крови в брюшной части аорты, имеющей нарост в виде аневризмы (Рис. 1). Применяется трехмерная математическая модель для расчета течения и массопереноса. В сечении 1 задается условие втекания крови, в сечениях 2 – 4 кровь вытекает. Кровь рассматривается как водный раствор клеток эритроцитов. Процесс их агломерации на внутреннюю поверхность аневризмы – 6 рассматривается по аналогии с осаждением неорганической примеси на твердую поверхность кристалла [2].

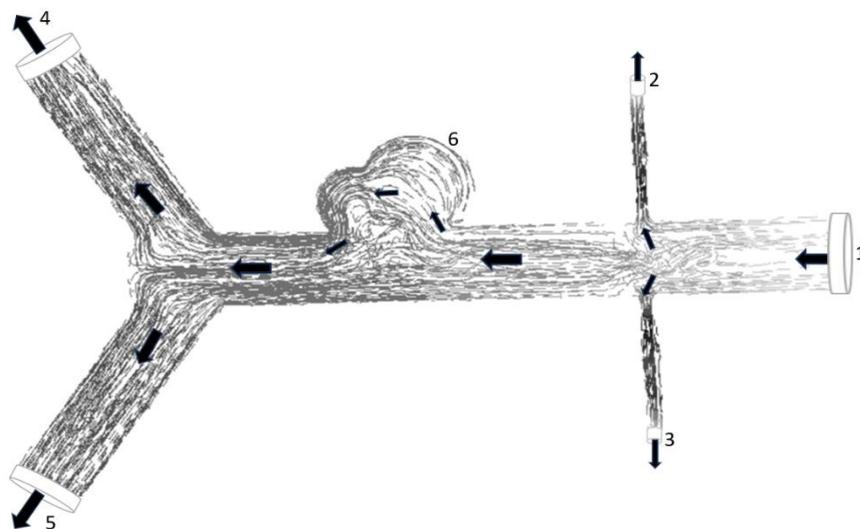


Рис. 1. Течение крови в аорте, в её разветвлениях и в аневризме: 1 – входное отверстие, 2 и 3 – ответвляющиеся мелкие сосуды, 4 и 5 – раздвоение аорты, 6 – аневризма в виде сдвоенных шаров разного диаметра, погруженных в тело аорты.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124013000674-0).

Литература

1. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. Москва: Мир, 1983. 400 с.
2. Вerezub N.A., Prostomolotov A.I. Гидромеханика при выращивании кристаллов из водно-солевых растворов // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15, № 1. С. 98-114. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.1.8>

МЕХАНИКА ДЕФЕКТОВ В БЕЗДИСЛОКАЦИОННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Простомолотов А.И., Вerezub Н.А.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Россия
aprosto@inbox.ru*

Рассматривается оптимизация двух технологических процессов: выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского (Рис. 1а) и быстрой высокотемпературной обработки (БТО) вырезаемых пластин из этих монокристаллов (Рис. 1б). Для метода Чохральского вопросы влияния различных сборок

теплового экрана на температурное поле в растущем монокристалле кремния являются актуальными. Этому посвящен ряд патентов ведущих фирм-производителей монокристаллического кремния. Их важность особенно актуальна для выращивания бездислокационных монокристаллов кремния большого диаметра с контролируемой природой, размером и распределением первичных ростовых микродефектов. Для теплового узла отечественной установки Редмет-90М предложена специальная конструкция теплового экрана с водяным охлаждением [1].

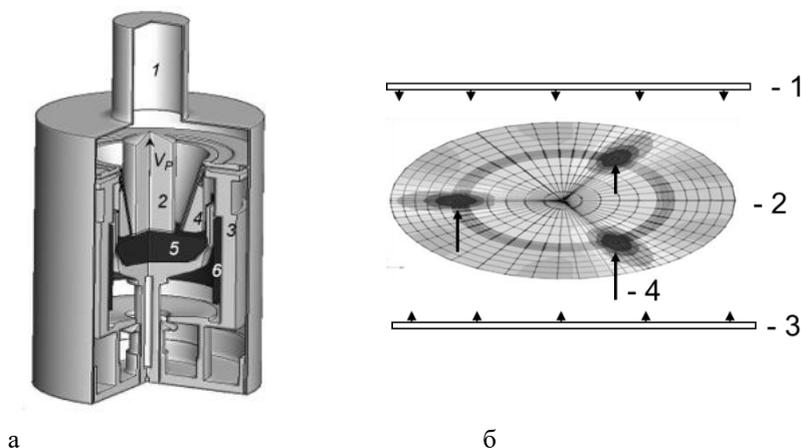


Рис. 1. Схемы процессов: а – Редмет-90М: 1 – корпус, 2 – кристалл, 3 и 4 – экраны, 5 – расплав; б – нагреватель; б – БТО: 1 и 3 – лампы нагрева, 2 – пластина, 4 – игольчатые опоры и напряжения от них (см. изолинии).

В данной работе проведена тепловая оптимизация конструкции этого теплового узла Редмет-90М на основе сопряженной математической модели. При моделировании дефектообразования во время выращивания монокристалла и при БТО пластин кремния для расчета концентраций вакансий и межузельных атомов кремния применялась диффузионно-рекомбинационная модель. Рассматриваемая задача касается анализа возможности получения бездефектного слоя в пластинах бездислокационного монокристаллического кремния при БТО. Предполагается возможность эффективного воздействия на профиль распределения плотности кислородных преципитатов по толщине путем управления аналогичными профилями распределения вакансий и межузельных атомов. Анализируются экспериментальные зависимости суммарной плотности дефектов по толщине пластины для образцов, подвергшихся БТО и последующим термообработкам, полученные разными методами и профиль плотности вакансионных кластеров, рассчитанный в данной работе. Установлено, что распределение расчетной плотности вакансионных кластеров достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным в приповерхностном слое пластины.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124013000674-0).

Литература

1. Простомолотов А.И., Везуб Н.А. Механика процессов получения кристаллических материалов. М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2023. 568 с. <https://doi.org/10.61726/5600.2024.15.25.001>

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ФИЛЬТРАЦИИ НЕФТИ В МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПАХ

Пряжников М.И., Пряжников А.И., Жигарев В.А., Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
arrivent@yandex.ru

Выполнено микрофлюидное исследование процесса вытеснения нефти из микрофлюидного чипа, имитирующего горную породу, с помощью различных жидкостей заводнения. В качестве вытесняющих жидкостей были рассмотрены суспензии наночастиц, а также растворы ПАВ и полимерные растворы, модифицированные наночастицами. Получены систематические данные о физико-химических свойствах,

разработанных нефтewытесняющих флюидов с наночастицами различного размера и материала, включая углеродные нанотрубки. Получены зависимости вязкости, реологических и микрореологических характеристик кинетики дестабилизации, межфазного натяжения, краевого угла смачивания от концентрации, размера и материала наночастиц.

Проведены фильтрационные эксперименты на микрофлюидной установке (см. рис.1). Она включает в себя контроллер давлений, герметичные пробирки с исследуемой вытесняющей жидкостью, сенсоры расхода и давления, микроскоп и цифровая камера. Проведена визуализация режимов нефтewытеснения. По картинкам распределения доли оставшейся нефти и вытесняющей жидкости выполнен анализ. Получены зависимости коэффициента вытеснения от концентрации, размера и материала наночастиц, от концентрации и вида поверхностно-активных веществ и полимеров.

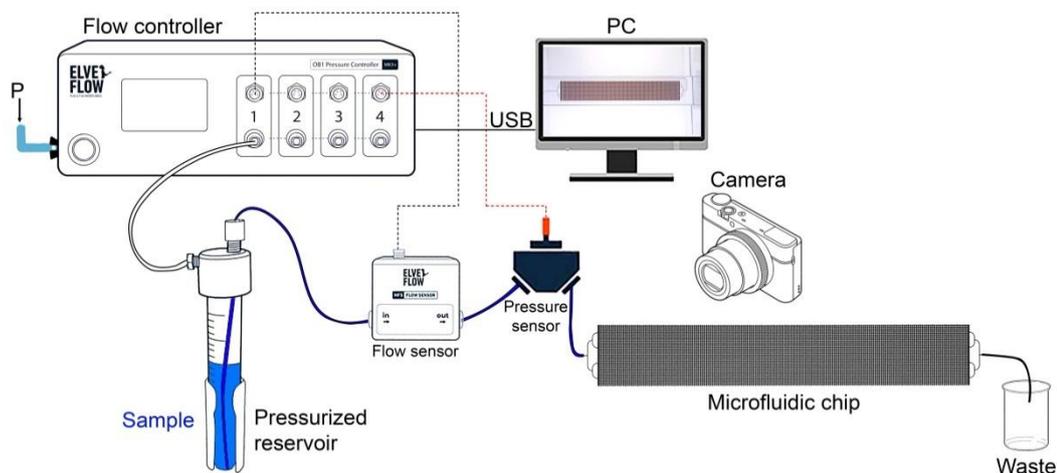


Рис. 1. Установка по исследованию процесса вытеснения нефти из микрофлюидного чипа, имитирующего горную породу.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ КОМПОЗИТА CU/TiC+TiB₂

Пугачева Н.Б., Вичужанин Д.И.

*Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург, Россия
nata5-4@yandex.ru*

В последние годы внимание исследователей привлекают композиты, получаемые в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Особое внимание заслуживают композиты с медной матрицей, обладающей повышенной тепло- и электропроводностью, а также хорошей пластичностью. В данной работе исследован композит, состоящий из медной матрицы и армирующих частиц TiC и TiB₂ размерами 2 – 7 мкм, хаотично распределенными в объеме. Композит характеризуется повышенной твердостью (40 - 60 HRC) и износостойкостью. Подробно химический и фазовый составы композита, а также его стойкость к абразивному изнашиванию рассмотрена в работе [1]. Технология синтеза и условия горячей пластической деформации композита детально описаны в работе [2]. Экспериментально установлено, что горячая пластическая деформация композита реализуется за счет динамической рекристаллизации медной матрицы. Наиболее благоприятными условиями для горячей пластической деформации является температура деформации в интервале 750 – 800 °С и давление 150 МПа. Для сохранения целостности композита рекомендовано проводить деформацию в стальной оболочке, обеспечивающей формирование сжимающих напряжений по всему объему композита, включая поверхностные слои.

Для выбора технологии горячей деформации было проведено конечно-элементное моделирование многостадийной горячей прокатки образцов композита Cu/TiC+TiB₂ размерами 10 x 10 x 55 мм с

использованием метода конечных элементов. В модели использовано 12000 конечных элементов. Многостадийная прокатка выбрана с точки зрения исключения опасности появления трещин в композите. Для обеспечения деформации в условиях всестороннего сжатия образец помещали в стальную оболочку. При моделировании принималась изотропная, упруго – пластическая модель материала с деформационным упрочнением. Деформирующий инструмент (валки) принимался как абсолютно жесткое тело. Использовался ассоциированный закон пластического течения. Для описания трения между деформирующим инструментом и заготовкой использовали закон трения Зибеля. Коэффициент трения принимался равным 0,3. Так как процесс симметричный, то моделировали только половину ширины заготовки. По результатам моделирования установлено, что распределение деформаций по сечению образца композита равномерно. Рассмотрен вариант второго прохода с поворотом заготовки на 90 градусов. При этом образец в стальной оболочке, прошедший первую прокатку, поворачивали на 90 градусов в двух направлениях: в первом направлении образец в оболочке повернули на бок для смены плоскости деформирования (провели кантование), а во втором направлении прокатку стали осуществлять поперек образца для сохранения его пропорций. При этом плоскость симметрии модели изменилась и стала проходить по нижним граням образца и оболочки. Показано, что деформации после двухступенчатой прокатки с поворотом образца распределены равномерно по сечению композита.

Полученные результаты позволили рекомендовать для практической реализации горячую прокатку композита. Поскольку в результате СВС получали сэндвич-пластины, внутри которых формировался композит, а снаружи была стальная оболочка, предложено проводить горячую прокатку получаемых сэндвич-пластин. При этом стальная оболочка должна обеспечить всестороннее сжатие композита и препятствовать его растрескиванию. Во избежание появления трещин при прокатке на каждом этапе степень обжатия заготовки должна быть минимальна, истинная деформация не должна превышать 0.2. Горячую деформацию сэндвич-пластин реализовали на прокатном стане дуо в четыре прохода с общей деформацией 0.6.

Синтез композита и исследования его микроструктуры и физикомеханических свойств выполнены за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-29-00188, <https://rscf.ru/project/22-29-00188>), а численное моделирование горячей прокатки композита выполнено по государственному заданию (тема № 124020700063-3).

Литература

1. Н.Б., Пугачева, Ю.В. Николин, Т.М. Быкова, Е.И. Сенаева//Физика металлов и металловедение, 123:1 2022. 47 – 54.
2. N. Pugacheva, D. Kruchkov, T. Bykova, D. Vichuzhanin//Materials, 16:8 2023. 320.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛАХ

Пшеничнов С.Г., Коровайцева Е.А.

*Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия
serp56@yandex.ru*

Важным направлением в области изучения динамики неоднородных вязкоупругих материалов является развитие аналитических и численно-аналитических методов решения соответствующих динамических задач. Неоднородные вязкоупругие тела могут быть как кусочно-однородными, так и состоять из функционально-градиентных материалов (ФГМ) с непрерывной зависимостью параметров от координат. Отдельные результаты в данной области были известны еще полвека назад [1], современные же достижения частично отражены, например, в работах [2-4], причем подавляющее большинство публикаций последнего десятилетия посвящено исследованию гармонических волн и колебаний. Целью настоящей работы является развитие метода решения начально-краевых задач вязкоупругости для неоднородных тел на основе предыдущих результатов [5-7].

Рассмотрена нестационарная динамическая задача линейной вязкоупругости с ограниченной областью распространения возмущений (что не всегда означает ограниченность самого тела). Область состоит из конечного числа однородных подобластей, которые ставятся в соответствие однородным компонентам, составляющим тело. На контакте соседних компонентов выполнены кинематические и динамические условия непрерывности. Наследственные свойства материалов компонентов описываются интегральными

соотношениями Больцмана-Вольтерра и все ядра релаксации у всех материалов считаются не зависящими друг от друга, но выражающимися конечной суммой экспонент. При определенных условиях решение такой задачи сводится к поиску собственных значений задачи о свободных колебаниях рассматриваемого тела [5, 7]. В данной работе изучены свойства спектрального множества и с учетом его локализации на комплексной плоскости предложена новая форма представления решений нестационарных задач вязкоупругости. Разложение по некоторому подмножеству собственных форм свободных колебаний дополнено интегралом по замкнутому контуру вокруг всех конечных предельных точек спектра. Это существенно облегчает расчеты при большом количестве однородных компонентов тела с неодинаковыми вязкоупругими ядрами.

Рассмотрены нестационарные задачи для тел, состоящих из вязкоупругих ФГМ. Использован метод, применявшийся другими авторами лишь в задачах стационарных и состоящий в замене ФГМ аппроксимирующей слоисто-однородной структурой, что позволяет использовать решения задач для кусочно-однородных тел. В работе [6] правомерность применения такого метода в нестационарных задачах подтверждена расчетами для конкретных примеров, однако там вязкоупругие ядра не зависели от координат, выбирались из другого класса и представление решения было иным.

Теоретические положения данной работы дополнены результатами расчетов параметров переходных волновых процессов, соответствующих различным задачам с конкретными исходными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-29-00164, <https://rscf.ru/project/24-29-00164/>.

Литература

1. Сабодаш П.Ф. // Распространение продольных вязко-упругих волн в трехслойной среде. Механика полимеров, 1. 1971. 151 – 156.
2. Borchardt R.D. //Viscoelastic Waves and Rays in Layered Media. Cambridge: Cambr. Univ. Press. 2020. 450 p.
3. Жаворонок С.И. // Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 1. Механика композиционных материалов и конструкций, 27: 2. 2021. 227 – 260.
4. Жаворонок С.И. // Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 2. Механика композиционных материалов и конструкций, 28: 1. 2022. 36 – 86.
5. Пшеничнов С. Г. // Динамические задачи линейной вязкоупругости для кусочно-однородных тел. Изв. РАН. МТТ, 1. 2016. 79 – 89.
6. Pshenichnov S., Ivanov R., Datcheva M. //Transient Wave Propagation in Functionally Graded Viscoelastic Structures. Mathematics. MDPI, 10. 2022. 4505.
7. Pshenichnov S., Korovaytseva E., Bazhlekova E., Datcheva M. // Dynamic problems for piecewise homogeneous viscoelastic bodies. Advanced Structured Materials, 186. 2023. 227–243.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ВАН ДЕР ПОЛЯ-МАТЬЕ-ДУФФИНГА

Рамазанов И.Р., Корнеев И.А., Вадивасова Т.Е., Слепнев А.В.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
ibadulla.ramazanov@yandex.ru*

Работа посвящена изучению взаимодействия диффузионно связанных осцилляторов ван дер Поля – Матье – Дуффинга. Благодаря наличию параметрического воздействия и кубической нелинейности данная система демонстрирует достаточно сложную динамику. Осцилляторы ван дер Поля – Матье – Дуффинга могут проявлять автоколебательный либо параметрический характер, а добавление кубической нелинейности приводит к наклону резонансной характеристики и смещению частоты основного параметрического резонанса. Исследование двух диффузионно связанных осцилляторов ван дер Поля – Матье – Дуффинга показало, что наличие параметрического воздействия приводит к появлению областей синхронизации на половине частоты параметрического воздействия, введение кубической нелинейности приводит к смещению областей параметрических колебаний, смещению частоты основной гармоники синхронных колебаний, а также к расширению области хаотических колебаний на границе синхронных и несинхронных режимов. Основные режимы колебаний отмечены на плоскости параметров расстройка частоты – сила связи, показаны механизмы переходов между отмеченными режимами колебаний.

Исследование частично поддержано грантом Российского научного фонда № 20-12-00119, <https://rscf.ru/project/20-12-00119/>.

IN SILICO ПРЕДСКАЗАНИЕ РЕЖИМОВ РОСТА КРИСТАЛЛОВ И ТОНКИХ ПЛЁНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Редьков А.В.¹, Троценко Д.И.², Урсуненко Н.С.³

1 - ИИМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

3 - Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
avredkov@gmail.com

Несмотря на то, что к настоящему времени разработаны мощные цифровые инструменты для поиска и предсказания кристаллической структуры новых веществ с искомыми свойствами [1], внедрение подобных материалов в промышленность по-прежнему происходит крайне медленно. Основная проблема заключается в сложности разработки технологии синтеза и промышленного ростового оборудования, поскольку для этого необходимо проводить многочисленные эксперименты по определению материальных констант, оптимальных условий для получения кристалла с нужной кристаллической структурой, дефектностью, однородностью, и чистотой от примесей. Таким образом, крайне актуальной остается разработка новых цифровых подходов и инструментов [2], которые позволили бы упростить анализ и оптимизацию процесса синтеза без необходимости проведения большого числа дорогостоящих реальных экспериментов.

В докладе представлен новый генеративный подход, разработанный для описания эпитаксиального роста кристалла или тонкой пленки с учетом всех возможных сопутствующих кинетических явлений, упругих напряжений, и возникающих ростовых неустойчивостей на примере роста из газовой фазы. Подход состоит в использовании высокопроизводительного атомистического GPU-моделирования ростового процесса для генерации массива данных о том, как и в каком режиме протекает рост при тех или иных условиях, какую морфологию и свойства имеет растущая поверхность. После получения синтетического массива данных о росте к нему применяются различные методы машинного обучения для обработки и обобщения полученных численно результатов и выявления основных зависимостей. В настоящем докладе описывается применение многомерных регрессионных моделей, конволюционных нейросетей для классификации морфологий, а также генеративно-состязательных нейросетей для прямой генерации морфологии поверхности при произвольных ростовых условиях (включая упругие напряжения) без проведения дополнительных ресурсоемких вычислений.

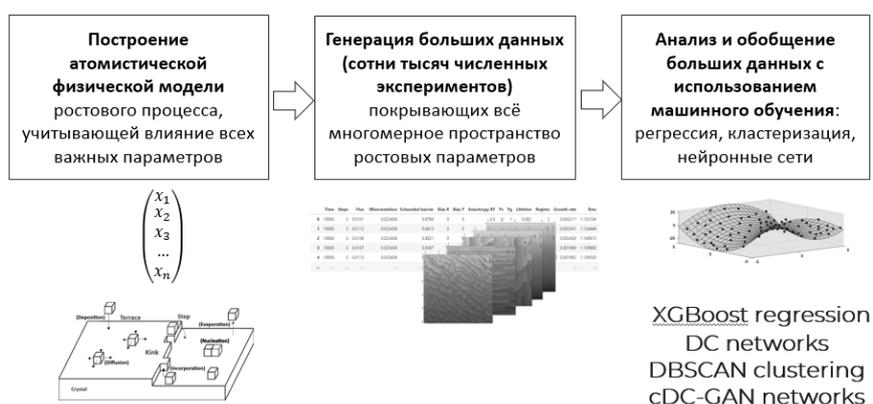


Рисунок 1. Схематическое изображение этапов генеративного подхода: выбор ростовой модели, генерация больших данных о росте при различных условиях, применение методов ML для обобщения и систематизации морфологий и свойств процесса в пространстве ростовых условий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИИМаш РАН.

Литература

1. Oganov A. R., Glass C. W. // J. Chem. Phys., 2006, **124**, 244704.
2. Hill, Adam R. et al. // Chemical Science, 2021, **12**, 1126-1146.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ В РАМКАХ СТАТИСТИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Роготнев А.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Россия
rogotnev.a@icmm.ru

Клетки ткани постоянно подвергаются различным внешним физическим воздействиям, способным повлиять на функциональные свойства как отдельных клеток, так и ткани в целом [1]. Изменение механики ткани и её составляющих сопровождается, а иногда и вызывает различные патологии. Так процесс онкогенеза и распространения опухоли влечет за собой изменение термических и механических свойств раковых тканей [2]. Поэтому актуальной является разработка математической модели поведения биологической ткани, позволяющей описать её термодинамические и кинетические свойства с учетом коллективного поведения структурных элементов представительного объема ткани. Модель формулируется на основе статистико-термодинамического подхода, описание которого можно найти в [3]. Для структурного элемента ткани вводится микроскопический параметр порядка, описывающий деформационное поведение данного элемента. Макроскопический параметр определяется путём осреднения введенного микроскопического параметра по представительному объему ткани. Согласно разрабатываемой модели в приближении самосогласованного поля выводится структурный параметр термализации неравновесной системы, характеризующий «эффективную температуру» данной системы и отражающий статистическую автомодельность поведения ансамбля структурных элементов ткани. Установлены закономерности критичности для различных диапазонов введенного структурного параметра и предложены феноменологические представления для свободной энергии. В ходе численного моделирования кинетики ткани установлены типы автомодельных решений и соответствующие им моды структурных элементов ткани при различных диапазонах параметра «эффективной температуры». Полученные автомодельные решения могут иметь характер конечно-амплитудных флуктуаций в виде бризеров, мод автосолиitonного типа, диссипативных структур с обострением [3].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственный контракт № 124020200116-1)

Литература

1. А.В. Кобелев, Л.Т. Смолюк, Р.М. Кобелева, Ю.Л. Проценко // Нелинейные вязкоупругие свойства биологических тканей. 2012. 244 с.
2. A.V. GK et al. // Journal of Biological Engineering, 17:1 2023. 68.
3. О.Б. Наймарк // Физическая мезомеханика, 6:4 2003. 45-72.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА ТВЭЛА С УЧЕТОМ РАСТРЕСКИВАНИЯ МАТЕРИАЛА ТАБЛЕТОК

Аронов П.С., Галанин М.П., Родин А.С.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Россия
rals@bk.ru

Решена задача математического моделирования участка тепловыделяющего элемента, включающего в себя N топливных таблеток и соответствующий им кусок оболочки, в осесимметричной и трехмерной постановках. Математическая модель включала в себя стандартное уравнение теплопроводности и уравнения механического равновесия системы тел [1] в рассматриваемые моменты времени. В тепловой задаче в таблетках задавалась объемная мощность тепловыделения, которая являлась постоянной по пространству, а по времени менялась по линейному закону от нуля до номинального значения, после чего оставалась постоянной. Между внешними поверхностями таблеток и внутренней поверхностью оболочки происходил теплообмен с заданным коэффициентом теплоотдачи. В механической задаче учитывалось контактное взаимодействие для $N-1$ контактной пары таблетка/таблетка (торцы тел) и N контактных пар таблетка/оболочка (боковые поверхности тел) с условием скольжения без трения. В модели предполагалось, что оболочка являлась

термоупругопластическим телом, а таблетка – термоупругим телом с учетом растрескивания материала. Для описания пластических деформаций применена модель течения [1], для описания растрескивания – модель размазанных трещин [2]. В работе использованы реалистичные модели материалов, взятые из открытой библиотеки MATPRO.

Для численного решения задачи применен метод конечных элементов, для учета контактного взаимодействия тел использован метод Нейман-Дирихле (один из вариантов метода декомпозиции области). Проведены расчеты, описывающие выход твэла на номинальную мощность, для участка из 10 таблеток с учетом (расчет 1) и без учета (расчет 2) эффекта растрескивания топливных таблеток. На рис. 1 показаны распределения окружных напряжений (в МПа) на участке области, соответствующем 5-й и 6-й таблеткам, в финальный момент времени для осесимметричного расчета.

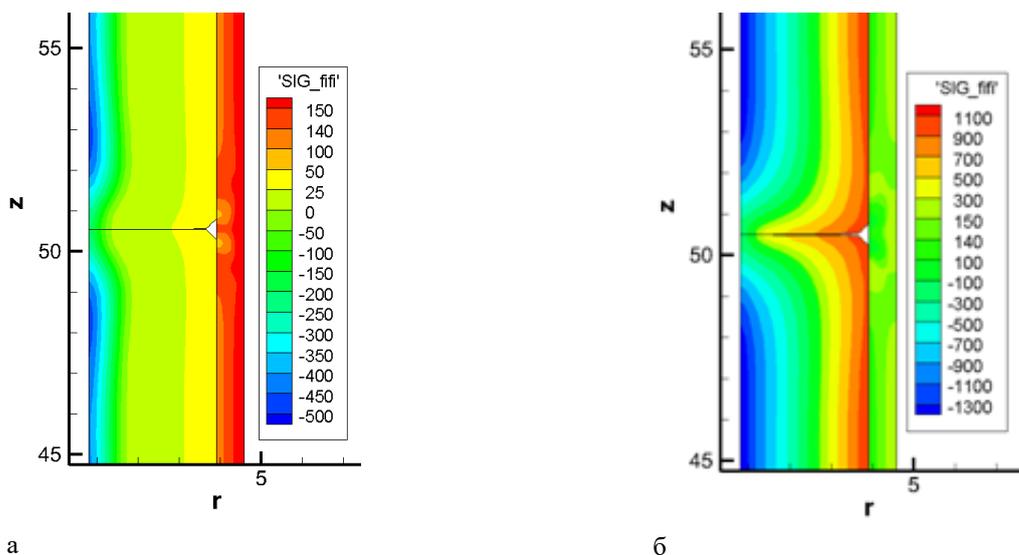


Рис. 1. Распределения окружных напряжений в участке области: а – расчет 1, б – расчет 2

Сравнение результатов показало, что без учета растрескивания в результате нагрева ближе к внешней поверхности таблеток возникают растягивающие окружные и осевые напряжения порядка 1 ГПа (рис. 1.б). Реальный материал не способен выдержать подобные нагрузки. Примененная модель растрескивания позволила снизить уровень растягивающих напряжений в таблетках до 20-30 МПа (рис. 1.а). Более подробно результаты расчетов приведены в [2].

Литература

1. В.С. Зарубин, Г. Н. Кувыркин // Математические модели механики и электродинамики сплошной среды. 2008. 512 с.
2. М. П. Галанин, А. С. Родин // Решение связанной задачи термомеханического контакта элементов твэла, Прикладная механика и техническая физика, 65:2 2024. 99–109

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ АЛЮМИНИЯ АД31 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Родионов Е.С., Лупанов В.Г., Погорелко В.В., Майер А.Е., Майер П.Н.

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия
rodionoves.pgd@gmail.com

Автоматизация поиска оптимальных параметров модели материала, то есть обучения модели под конкретный материал, является актуальной задачей, поскольку позволяет существенно сократить время калибровки численной модели, а также повысить точность подбора коэффициентов. Несмотря на существенный прогресс в описании динамических деформаций, в том числе и с помощью феноменологических моделей поведения материала, необходимо создание и параметризация физически обоснованных моделей пластичности, способных работать в широком диапазоне скоростей деформации и учитывать различное исходное состояние

металла (твердое, мягкое). Их преимуществом является то факт, что в отличие от эмпирических моделей при изменении исходной структуры материала нет необходимости снова подбирать все коэффициенты модели. Модель дислокационной пластичности [1] позволяет учитывать такие микромеханические параметры, как плотность подвижных и неподвижных групп дислокаций, их образование и аннигиляцию, а также описывать микроструктурные изменения в металлах в процессе пластической деформации.

Обучение модели проводится по наборам экспериментальных данных. Проведены тесты Тейлора по высокоскоростному соударению классических цилиндров, а также профилированных образцов (рис. 1), позволяющих достигать больших пластических деформаций со скоростями деформации до 10^5 с^{-1} . Эксперименты проведены для сплава алюминия АД31 (6063). Для численного моделирования используется модель дислокационной пластичности с учетом кинетики дислокаций, реализованная в трехмерной постановке с помощью метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) [2]. Для параметризации модели дислокационной пластичности используется современный подход машинного обучения [3], сочетающий искусственные нейронные сети в качестве эмулятора трехмерной численной модели и статистический метод Байеса для выбора наборов параметров, наилучшим образом описывающих эксперимент.

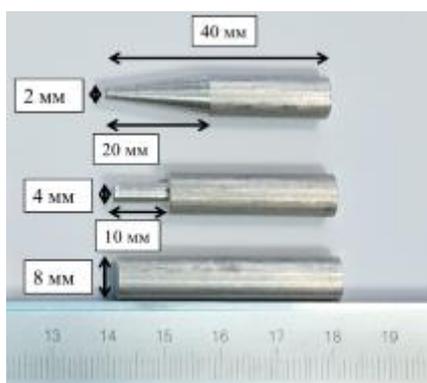


Рис. 1. Форма ударников до деформации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-11-20153-П, <https://rscf.ru/project/23-11-45024/>.

Литература

1. E. Mayer, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, P. N. Mayer // Modeling of plasticity and fracture of metals at shock loading, J. Appl. Phys, 113:19 2013 193508
2. E. S. Rodionov, V. G. Lupanov, N. A. Grachyova, P. N. Mayer, A. E. Mayer // Taylor impact tests with copper cylinders: experiments, microstructural analysis and 3D SPH modeling with dislocation plasticity and MD-informed artificial neural network as equation of state, Metals 12:2 2022 264
3. E. S. Rodionov, V. V. Pogorelko, V. G. Lupanov, P. N. Mayer, A. E. Mayer // Modified Taylor impact tests with profiled copper cylinders: Experiment and optimization of dislocation plasticity model, Materials 16:16 2023 5602

ВАЛИДАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Романенко Е.И.^{1,2}, **Банщикова И.А.**^{2,3}

1 - ФАУ «СибНИИ им С.А. Чаплыгина», Новосибирск, Россия

2 - ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
Новосибирск, Россия

3 - ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск,
Россия

yevgeny.romanenko@yandex.ru

Современный процесс разработки летательных аппаратов будет все больше опираться на виртуальные испытания. Системы автоматизированного проектирования/черчения (CAD) и решения инженерных задач (CAE) имеют решающее значение для успешной разработки виртуальной модели исследуемого объекта.

Их основными преимуществами по сравнению с традиционными методами являются относительно легкое изменение компьютерной модели, а также многократная возможность проведения компьютерного моделирования и расчетов, что позволяет сравнивать альтернативные варианты на ранней стадии, без необходимости изготовления дорогостоящих прототипов и проведения трудоемких испытаний.

Модели конечных элементов, используемые для виртуального испытаний (ВИ), могут быть чрезвычайно сложными. Поэтому необходимо обеспечить доверие к виртуальным испытаниям на всех уровнях исследования. Существует необходимость в понимании места виртуального эксперимента в устоявшейся технологии обеспечения прочности авиационных конструкций, для которой расчёты на прочность всегда были неотъемлемой составной частью. Чем виртуальные испытания отличаются от традиционных расчётов? Расчёт на прочность — это разовая процедура, дающая детерминированную величину характеристики прочности, например величину критической нагрузки потери устойчивости. Испытаниям же подвергается, как правило, несколько образцов, получаемые результаты имеют разброс. Обработывая результаты, можно получить как среднюю величину характеристик прочности, так и характеристики разброса, которые необходимы для обеспечения надёжности изделия. Если говорить о замене натурных испытаний виртуальными, то, очевидно, одним из требований к виртуальным испытаниям должна быть вариативность их результатов. Виртуальное тестирование является и всегда будет приближением к реальности. Фактические конструкции самолетов всегда будут иметь дефекты материалов, различия в производственных процессах и диапазон допусков при сборке, что приведет к возникновению напряжений и изменчивости жесткости и прочности.

Планер летательного аппарата состоит из отдельных деталей, соединенных между собой. Благодаря соединительным кронштейнам самолет приобретает целостность и жесткость, бывают они съемные и несъемные. Расчет таких узлов вызывает определённые трудности, связанные со сложностью определения точной нагрузки, приходящей на кронштейн, со сложной геометрией кронштейнов, вследствие чего проектируются они под гораздо большую нагрузку. Поскольку в авиационной конструкции главная задача конструктора спроектировать наиболее прочную конструкцию при наименьшей массе, то необходимо знать разрушающую нагрузку детали. Определить разрушающую нагрузку можно только проведя натурный эксперимент до разрушения, потому что типовые расчеты проводят в упругой зоне и получают разрушающую нагрузку со значительно большим запасом прочности.

Разработана программа, реализующая алгоритм определения разрушающей нагрузки с использованием метода конечных элементов в пакете ANSYS. Проведена валидация алгоритма на типовых для авиации кронштейнах с проушиной, объектом исследования являлась проушина, к ней прикладывалась нагрузка. Исследовались три типа кронштейнов, два изготовлены из высокопрочной легированной стали 30ХГСА, один из алюминиевого сплава Д16т. Проведены испытания до разрушения, определены экспериментальные разрушающие нагрузки. Для определения численной разрушающей нагрузки проведен виртуальный эксперимент с использованием разработанного алгоритма. Различия разрушающих нагрузок, определенных натурным и виртуальным способом, составило в пределах от 3 до 12%.

УТОЧНЕНИЕ АППРОКСИМАЦИИ ЛАГРАНЖЕВЫМИ ПОЛИНОМАМИ К ОЦЕНКЕ МАСШТАБНЫХ ЭФФЕКТОВ МИКРОПОЛЯРНОЙ СРЕДЫ

Романов А.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
atomicra@ya.ru

Для исследования масштабных эффектов в микрополярных средах формулируется вариационный принцип Лагранжа и методом Ритца краевая задача приводится к системе линейных алгебраических уравнений в тензорно-блочном виде. Для уточнения аппроксимации поля перемещений и микровращений лагранжевыми полиномами используется обобщённый метод редуцированного и селективного интегрирования. Численное решение вариационной модели апробируется на аналитическом решении задачи о кручении цилиндрического микрополярного изотропного тела и сравнивается с результатами эксперимента. Это позволяет сделать вывод, что микрополярные среды демонстрируют существенные масштабные эффекты, а предложенный подход аппроксимации кинематических полей обладает лучшей точностью, в том числе для почти несжимаемой среды.

МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДИСЛОКАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Романов А.Е.

Университет ИТМО, Россия
alexey.romanov@niuitmo.ru

Решёточно-рассогласованные упруго-деформированные (напряжённые) полупроводниковые гетероэпитаксиальные слои являются ключевыми элементами приборов и устройств современной микроэлектроники: транзисторов, фотодиодов, светодиодов, лазерных диодов и т.д. Во многих случаях релаксация механических напряжений в гетероструктурах приводит к формированию дислокаций несоответствия (ДН) (misfit dislocations) на гетерограницах и проникающих дислокаций (ПД) (threading dislocations) в объеме слоёв. Наличие ПД негативно влияет на работу различных устройств микроэлектроники и оптоэлектроники, поскольку ПД оказываются в активной области таких устройств. Релаксация в напряженных гетерослоях также приводит к их растрескиванию, изменению морфологии поверхности и изгибу во время роста и/или при процессировании.

Нами исследована зависимость упругих деформаций, механических напряжений и пьезоэлектрической поляризации гетерослоев InxGa1-xN и AlyGa1-yN , полученных на подложках GaN, а также слоев различных фаз Ga2O3 на подложках Al2O3 от кристаллографической ориентации плоскости роста. Расчеты показывают [1], что для напряженных слоев InxGa1-xN и AlyGa1-yN , эпитаксиально согласованных с подложкой GaN, пьезоэлектрическая поляризация становится равной нулю для неполярных ориентаций, а также в полуполярной ориентации, примерно наклоненной под 45° к c -плоскости вюрцитной кристаллической структуры III-нитридов. При учете спонтанной поляризации угол, при котором полная поляризация равна нулю, для слоев InxGa1-xN увеличивается незначительно. Для гетероэпитаксиальных слоев AlyGa1-yN эффект спонтанной поляризации становится существенным и дает смещение точки пересечения до приблизительно 70° от стандартной полярной ростовой ориентации. Приведены результаты аналогичного анализа для гетероэпитаксиальных слоев тригональной фазы α - Ga2O3 на подложке α - Al2O3 и орторомбической фазы κ - Ga2O3 на подложке κ - Al2O3 [2]. В последнем случае предсказана кристаллография плоскостей роста, обеспечивающая минимальный уровень механических напряжений и отсутствие поляризационных эффектов в исследованных гетероструктурах.

При изучении поведения ПД выявлены основные процессы, ответственные за снижение их плотности: (i) относительное движение ПД и (ii) реакции между ПД [3]. Первый вариант движения ПД реализуется в напряженных слоях, когда скользящая в объеме слоя ПД производит новый сегмент ДН на гетерогранице, уменьшая таким образом напряжение несоответствия в слое. Второй вариант эффективного движения ПД имеет место даже в релаксированных слоях, когда точка, в которой наклонная ПД встречает поверхность слоя, смещается в латеральном направлении при росте слоя. Для снижения плотности ПД важны реакции аннигиляции и слияния дислокаций. Для количественного описания отмеченных выше процессов были выведены уравнения «кинетики-реакции» для плотностей ПД и ДН, которые были проанализированы как аналитически, так и численно [3-4].

Результаты моделирования механических напряжений и дислокаций в тонкопленочных материалах электроники и оптоэлектроники сопоставлены с экспериментальными данными по релаксации напряжений в типичных системах пленка/подложка для гетероструктур полупроводниковых соединений AlInGa и SiGe в ориентациях типа $\{001\}$ и $\{111\}$, III-нитридов, выращенных как в полярной, так и полуполярной ориентациях, а также слоев Ga2O3 на подложках Al2O3 в различных фазовых модификациях.

Работа выполнена при поддержке МинОбрНауки РФ в рамках проекта по тематике научных исследований № 2019-1442, код научной темы FSER-2020-0013.

Литература

1. A.E. Romanov et al. // Strain-induced polarization in wurtzite III-nitride semipolar layers, J. Appl. Phys., 100:2 2006. 023522
2. M. Smirnov et al. // Stress-strain state and piezoelectric polarization in orthorhombic Ga2O3 thin films depending on growth orientation. Mater. & Design, 226:11 2022. 111616
3. A.E. Romanov et al. // An approach to threading dislocation "reaction kinetics", Appl. Phys. Lett. 69:10 1996. 3342-3344
4. A.E. Romanov et al. // Threading dislocation reduction in strained layers // J. Appl. Phys. 85:1 1999.182-192

ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ: ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В КУРСАХ ПО МЕХАНИКЕ

Романовская Е.М., Берестова С.А., Савина Е.А.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия
e.m.romanovskaia@urfu.ru*

В современном мире технологии давно стали неотъемлемой частью образования. В частности, дополненная реальность (AR) открывает перед преподавателями и студентами новые возможности для обучения и понимания таких сложных предметов, как механика. Однако, несмотря на потенциал AR, многие учебные курсы по механике до сих пор остаются традиционными и не используют эти инновационные технологии.

В работе рассмотрены преимущества использования AR на примере учебного курса динамика механических систем и показано, как эта технология может существенно улучшить процесс обучения. Для преподавателя AR представляет собой инструмент, который поможет сделать учебный процесс более интерактивным, доступным и привлекательным для студентов. С помощью AR можно создавать виртуальные модели и симуляции, которые помогут студентам наглядно представить сложные концепции и легче усвоить материал. Для студента использование AR в учебном процессе открывает новые возможности для самостоятельного изучения материала, обогащая его опыт и помогая лучше усвоить механику. С помощью AR студенты могут взаимодействовать с виртуальными объектами, выполнять практические задания и участвовать в интерактивных уроках. Для образовательного учреждения использование AR в учебных курсах по механике может привести к улучшению качества образования, повышению интереса студентов к изучаемому материалу и увеличению эффективности обучения.

Литература

1. Динамика механических систем: ЭОП/ С. А. Берестова, Е. М. Романовская, Е. А. Савина; Уральский федеральный университет, 2021. -URL: <https://elearn.urfu.ru/course/view.php?id=6275>.
2. Е. М. Романовская, С. А. Берестова, Е. А. Савина // Конструирование курса «Динамика механических систем» в среде электронного обучения Moodle / Среда электронного обучения Moodle для образования: проблемы, вопросы качества, решения : материалы II Всероссийской научно-практической онлайн-конференции, Новосибирск, 23–25 мая 2023 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный педагогический университет, 2023. – С. 43-46.

МЕХАНИКА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Рощева Т.А., Берестова С.А., Романовская Е.М.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия
t.a.roshcheva@urfu.ru*

В традиционном понимании математика считается фундаментальной наукой, которая предоставляет аналитический инструментарий для теоретической механики. Однако отношения между этими дисциплинами более взаимозависимы и симбиотичны. И механика может дать вполне внятные инструменты для построения математических теорий.

Примером такого внедрения механики в математику может стать использование формулы Эйлера для получения формул Френе в дифференциальной геометрии. Такие построения можно отнести к элементам междисциплинарного подхода в образовании, способствующего формированию у студентов целостного понимания мира.

НАЧАЛЬНО-КРАЕВАЯ ЗАДАЧА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ В УПРУГОМ ТЕЛЕ

Рублев И.А., Фрейдин А.Б.

Институт Проблем Машиноведения РАН, Россия
ilya_rublev@mail.ru

В рамках данной работы исследуется задача распространения плоского фронта химической реакции в упругих телах. Считаем, что реакция локализована на фронте и поддерживается диффузией вещества V^* через область уже превращенного материалом V^+ . Диффундирующий компонент реакции проникает в область с превращенным материалом через внешнюю поверхность тела и полностью потребляется химической реакцией на ее фронте.

Процесс превращения протекает в два этапа. На первом этапе происходит накопление диффундирующего компонента V^* в исходном материале V^- . По достижении на внешней границе критического значения концентрации (равновесной концентрации C_{eq}) начинается второй этап, в рамках которого происходит отщепление от внешней границы и дальнейшее распространение фронта реакции, которое поддерживается диффузией вещества V^* . Равновесная концентрация C_{eq} зависит от напряжений, порождаемых деформацией превращения и внешней нагрузкой, и соответствует нулевому значению нормальной компоненты тензора сродства, используемого для описания влияния кинетики на систему (см. обзор [1] и приведенный в нем список литературы).

На этапе распространения фронта реакции задача рассматривалась в нескольких постановках, в числе которых:

- Диффузия через непревращенный материал не происходит
- Диффузия происходит как через превращенный, так и через непревращенный материалы, но запасенный диффундирующий компонент, находящийся в области непревращенного материала, не учитывается в кинетическом уравнении
- Диффузия происходит через превращенный и непревращенный материалы, и диффундирующий компонент в непревращенном материале, влияет на скорость фронта, а также со стороны непревращенного материала, т. е. концентрации с обеих сторон суммируются

Рассматриваемая задача является связанной: напряжения влияют на скорость фронта реакции, а перемещение фронта, сопровождающееся собственными деформациями превращения, приводящими к возникновению механических напряжений, которые в свою очередь зависят от положения фронта.

В результате решения задачи для этапа накопления диффундирующего компонента были получены распределения концентрации вещества в системе в разные моменты времени. Также, было проанализировано влияние параметра диффузии и коэффициента переноса, собственной деформации превращения, модулей упругости компонентов реакции и внешней деформации на время начала реакции.

Далее на этапе распространения фронта реакции для всех постановок задачи были получены скорости фронтов реакции в зависимости от их положения для разных коэффициентов диффузии и переноса, констант скоростей реакции. Для полученных скоростей фронта реакции была исследована конкуренция между механическим и химическим вкладами энергий. Проведено сравнение полученного решения с решением задачи в постановке квазистационарной диффузии. Выявлено, что учет нестационарности особенно сильно влияет на начальный этап продвижения фронта. По окончании переходного процесса решение выходит на стационарный режим.

Были проведено исследование режимов контроля реакций: диффузионного и химического.

Также были определены концентрации диффундирующего компонента на фронте реакции по мере его продвижения по телу при различных вкладах химических энергий. Во всех случаях на начальном (переходном) этапе наблюдается сильное расхождение в постановках квазистационарной и нестационарной диффузии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009–8).

Литература

1. Freidin A. B., Vilchevskaya E. N. Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: Encyclopedia of Continuum Mechanics. Altenbach H., Öchsner A. (eds) Springer, Berlin, Heidelberg, 2019.

ELASTIC PROPERTIES OF MODEL GRANULAR MATERIALS

Ру Ж.-Н.

*Лаборатория Навье, университет Густава Эйфеля, Школа мостов - Национальный центр научных исследований, Франция
jean-noel.roux@univ-eiffel.fr*

Results are presented on the elastic properties of granular materials, as explored in numerical studies of simple model materials by the “discrete element method” (DEM), which vary in density, stress states, and other internal state parameters [1]. Elastic or quasielastic responses are obtained as stable contact networks are probed with negligible friction effects, which happens in practically meaningful situations for very small strain increments. Elastic moduli, at the macroscopic scale, or contact stiffnesses at the contact network scale, have limited influence on macroscopic constitutive laws ruling quasistatic deformation and inertial flow. The elastic moduli nevertheless provide useful indirect information on internal variables such as coordination and fabric.

Singularities in the tensor of elastic moduli are related to the proximity of failure in the microscopic sense (contact network), but not in the macroscopic sense (yield condition). Such an incipient failure of the contact structure may entail anomalously small moduli, which relate to the smallness of force indeterminacy with a weak, depleted contact network. Elastic properties are also useful in the characterization of the directional dependence of incremental stress-strain response, a key ingredient in the identification of instabilities causing localization phenomena.

References

1. Roux J.-N. et al. Elasticity and Mechanical Behaviour of Granular Materials: Some Insights from Numerical Studies of Simple Systems // Views on Microstructures in Granular Materials. – 2020. – С. 185-224.

О ТЕМПЕ РАЗВИТИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ГЕОМАССИВАХ С ВЯЗКОУПРУГОСТЬЮ МАКСВЕЛЛОВСКОГО ТИПА

Рыжак Е.И., Синюхина С.В.

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
e_i_ryzhak@mail.ru*

Исследуется вопрос о влиянии вязкости на темп развития гравитационной неустойчивости в аномально стратифицированных вязкоупругих геосистемах. Под стратификацией понимается зависимость плотности и других механических параметров геоматериала от глубины, т.е. от вертикальной координаты z , отсчитываемой в направлении силы тяжести (рис. 1). Аномальной считается такая стратификация, при которой плотность уменьшается с глубиной. Геоматериалы считаются несжимаемыми, и для них принимается модель вязкоупругости Максвелла, поскольку при огромной вязкости, присущей геоматериалам значительной части земных недр, вязкоупругость типа Фойхта несовместима с известными динамическими явлениями в устойчивых геосистемах. Исследуется неустойчивость геосистем, занимающих области произвольной формы при условии отсутствия смещений на границе (рис. 1). Наряду с вязкоупругими системами рассматриваются упругие системы сравнения, занимающие те же области с теми же граничными условиями, и характеризующиеся теми же значениями сдвиговых жесткостей и тем же аномальным распределением плотности по глубине, что и исследуемые вязкоупругие системы. Получены двусторонние оценки инкремента нарастания наиболее быстрой моды потери устойчивости для вязкоупругих систем, справедливые при любой вязкости. Установлено, что наибольший инкремент нарастания для вязкоупругой системы всегда превосходит наибольший инкремент нарастания для неустойчивой упругой системы сравнения (он определяется инерционными свойствами последней в совокупности со степенью закритичности параметров, характеризующих ее неустойчивое положение равновесия). При неограниченном увеличении вязкости наибольший инкремент нарастания для вязкоупругой системы стремится сверху к соответствующему инкременту для неустойчивой упругой системы сравнения. Проведенный анализ подтверждает тот факт, что исследование неустойчивости упругих систем сравнения [1], с учетом огромной вязкости геоматериалов, может служить методической основой для исследования неустойчивости вязкоупругих геосистем [2,3].

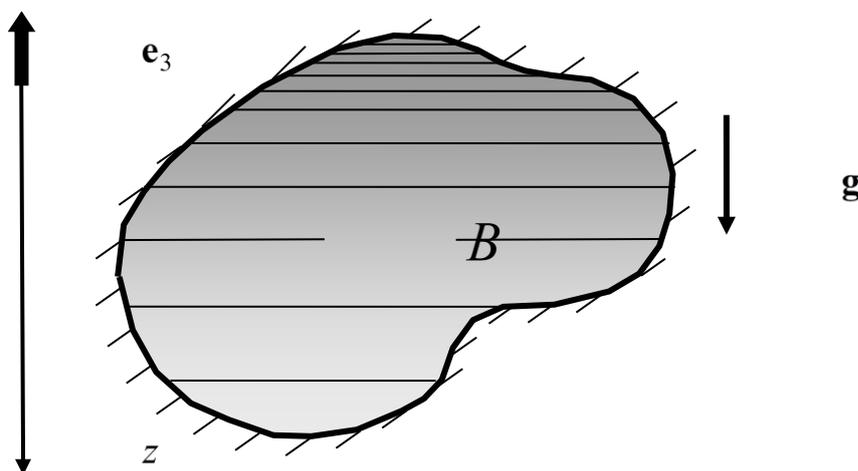


Рис. 1. Исследуемый anomalно стратифицированный геомассив.

Литература

1. Ryzhak E.I., Sinyukhina S.V. On stability and instability of stratified elastic solids in a gravity field // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2022. V. 142, 103990.
2. Рыжак Е.И., Синюхина С.В. К вопросу о темпе процессов развития неустойчивости в геосистемах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2022. Т. 506. №2. С. 236–242.
3. Рыжак Е.И., Синюхина С.В. О влиянии вязкости на развитие неустойчивости в anomalно стратифицированных геосистемах // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2023. Т. 508. № 2. С. 258-264.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВДАВЛИВАНИЯ КЛИНА В ПЛАСТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Рябинина А.Ю., Сахаров А.Н., Брюханов И.А.

Московский Государственный Университет, Москва, Россия
alina.giabinina@math.msu.ru

Работа посвящена исследованию задачи о вдавливании клина в пластическое полупространство и анализу изменения зеренной структуры в этом процессе. На машине Zwick100kN проводились эксперименты по вдавливанию стального клина в медные образцы с различным размером зерна. Для определения механических свойств меди было проведено исследование на растяжение и сжатие. Осуществлен метод DIC, с помощью которого было построено поле деформаций на торце образца. Так же проведено численное моделирование процесса вдавливания, учитывающее и сжатие и резание металла.

Известное решение Р. Хилла для идеально пластического материала, основано на гипотезе об автомодельности задачи. Проведенные эксперименты позволяют предположить, что в данной задаче эта гипотеза неверна. Анализ поля деформаций (DIC) показал, что по крайней мере на торце образца происходит качественная перестройка (Рис.1): вначале внедрения граница зоны пластичности больше соответствует упругому решению, а при дальнейшем внедрении образуется жесткая область по ходу клина, что больше соответствует решению по идеально пластической схеме.

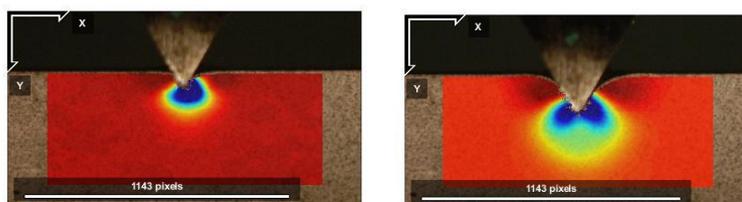


Рис. 1. Результаты DIC

Рассмотрение образцов под микроскопом показало (Рис. 2), что зона деформаций под кончиком клина оказывается больше для меди с большим размером зерна.

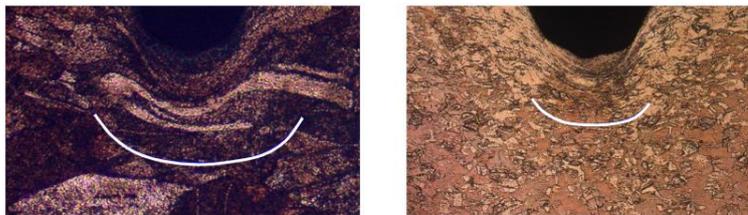


Рис. 2. Зона деформаций под острием клина

Поскольку теоретические модели подразумевают исключительное разрезание металла, а в эксперименте наблюдается и его сжатие, был разработан метод моделирования, учитывающий оба процесса

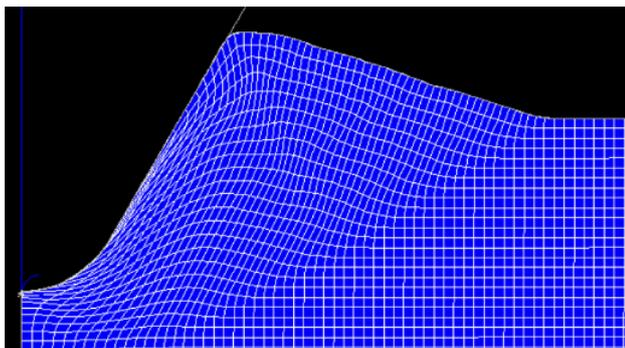


Рис. 3. Деформации в численном решении

ДИФФЕРЕНЦИРУЕМЫЕ ГРАФОВЫЕ РЕШАТЕЛИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ НАСТРАИВАЕМЫХ ПРОКСИ-МОДЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рябов А.А., Шумилин С.С., Явич Н.Б., Бурнаев Е.В., Вановский В.В.

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия
a.ryabov@skoltech.ru

В связи с высокими вычислительными затратами современного численного моделирования возникает потребность в подходах, позволяющих упростить задачу при сохранении приемлемой точности [1,2,3]. В данной работе мы предлагаем оригинальный алгоритм огрубления неструктурированной сетки, основанный на применении дифференцируемого графового решателя для метода конечных объемов (МКО) [4]. Мы демонстрируем работу разработанного алгоритма (рис. 1) на параболическом уравнении, описывающем течение легкосжимаемой жидкости в пористой среде, а также на гиперболическом волновом уравнении. Результаты показывают, что в рассматриваемых сценариях мы сократили количество точек сетки до 10 раз, сохранив при этом высокую точность моделирования. Предложенный подход может быть применен для построения настраиваемых прокси-моделей, а также моделирования произвольной нестационарной системы, описываемой дифференциальными уравнениями в частных производных.

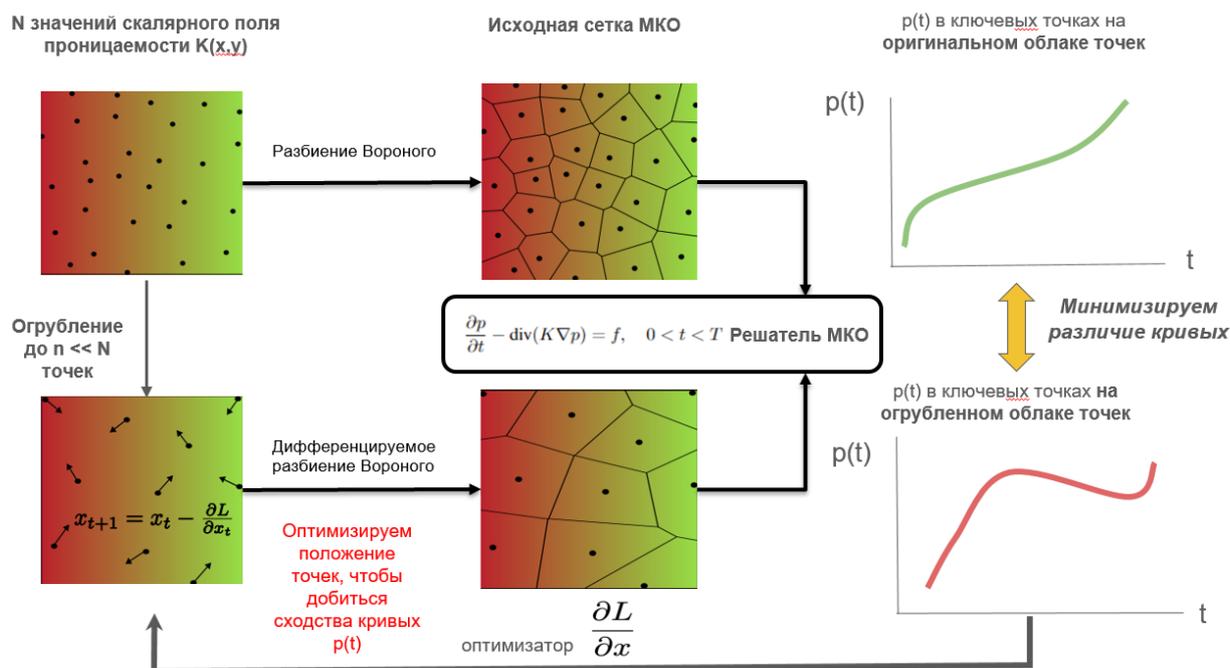


Рис. 1. Схематическое представление разработанного метода. Основная идея подхода заключается в том, чтобы уменьшить количество точек в исходном поле, но сохранить качество моделирования в ключевых точках. Для этой цели минимизируется отличие динамики решения в ключевых точках огрублённого и исходного облаков точек.

Данная работа поддержана Аналитическим центром при Правительстве РФ (договор субсидирования 000000D730321P5Q0002, грант №70-2021-00145 от 02.11.2021).

Литература

1. Qi, D. and Hesketh, T. An analysis of upscaling techniques for reservoir simulation. *Petroleum Science and Technology*, 23(7–8):827–842, July 2005. ISSN 1532-2459. doi: 10.1081/lft-200033132.
2. Kerschen, G., Golinval, J.-c., Vakakis, A. F., and Bergman, L. A. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: an overview. *Nonlinear dynamics*, 41:147–169, 2005.
3. Guo, M. and Hesthaven, J. S. Data-driven reduced order modeling for time-dependent problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345:75–99, March 2019. ISSN 0045-7825. doi: 10.1016/j.cma.2018.10.029. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2018.10.029>.
4. Shumilin S., Ryabov A., Yavich N., Burnaev V., Vanovskiy V. Self-Supervised Coarsening of Unstructured Grid with Automatic Differentiation. *International Conference of Machine Learning (ICML 2024)*, accepted.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Рябокоть Е.П., Турбаков М.С., Кожевников Е.В., Гузев М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия
riabokon.evgenii@gmail.com

Введение

Разработка месторождений углеводородов сопровождается ухудшением проницаемости околоскважинной зоны пласта (ОЗП). Для восстановления фильтрационных характеристик ОЗП помимо прочих применяются методы воздействия на горной породе акустическими вибрациями (АВ). Восстановление проницаемости от АВ объясняется эффектами мобилизации капиллярно зацементированной нефти, снижением вязкости флюида и др. [1]. Подобные эффекты широко освещены и физически обоснованы в теоретических

работах. Для демонстрации восстановления проницаемости породы при фильтрации в поле АВ проведены лабораторные исследования.

Методика проведения эксперимента

Исследования выполнены на разработанном лабораторном стенде, позволяющем продемонстрировать эффект мобилизации парафинов в поровых каналах от АВ на образец горной породы при фильтрации пластового флюида. Торцы образца являются стенкой скважины, а камера представляет собой полость скважины. Жидкость за счет градиента давления в образце (моделируется депрессия на пласт) поступает в камеру (моделируется скважина). В направлении противоположном направлению фильтрации жидкости из камеры (скважины) распространяются упругие колебания, вызванные возвратно-поступательным движением рабочей поверхности излучателя Ланжевена (моделируется АВ на горную породу ОЗП излучателем колебаний, размещенным в скважине напротив интервала продуктивного пласта).

Результаты

За счет возникающего относительного смещения матрицы породы и частиц парафинов происходит разбивание скоплений парафинов, блокирующих поры. Критерием эффективности обработки является отношение проницаемости в конце обработки к проницаемости перед первой обработкой $k_{eff} = k'/k_0$. Обработка эффективна при $k_{eff} \geq 1$. Разработана модель, описывающая изменение k_{eff} от частоты АВ.

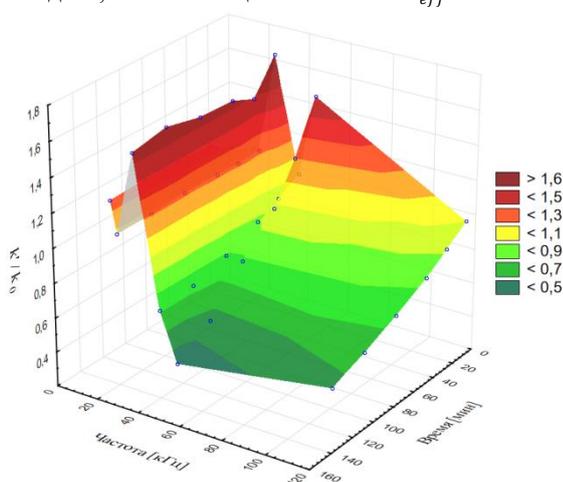


Рис. 1. Зависимость эффективной проницаемости породы от частоты и времени воздействия акустическими вибрациями.

Заключение

Величина восстановления проницаемости горных пород зависит от параметров АВ (в т.ч. частоты).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00447, <https://rscf.ru/project/22-19-00447/>.

Литература

1. Hamidi, H., Sharifi, H.A., Wisdom, O.E., Rafati, R., Mohammadian, E., Azdarpour, A., Giles, P.W., Wilhelm, F.P., Ricardo, S.L., Cota, N., Cruz, G.D., Ibrahim, R., Damiev, M., Tanujaya, E., 2021. Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results. *Ultrasonics* 110, 106288.
2. Riabokon E., Gladkikh E., Turbakov M., Kozhevnikov E., Guzev M., Yin Q., Wu J., Startsev D. Acoustic vibration restoration of rock permeability while crude oil filtration containing paraffins, *Geoenergy Science and Engineering*, Vol. 238, 2024, 212865.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ИМИТАТОРА ЛУННОГО РЕГОЛИТА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Томилина Т.М.¹, Лысенко А.М.^{1,2}, Савватимова П.Р.^{1,2}

1 - Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

2 - Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

poli.savvatimova@mail.ru

В последние годы задача исследования дальнего космоса за пределами околоземных орбит перешла на новую стадию - его освоения. В связи с этим активно обсуждается вопрос о создании обитаемых баз на Луне с необходимой инфраструктурой, для создания которой рассматривается возможность использования местных ресурсов. Первым кандидатом на роль строительного материала стал поверхностный лунный грунт – реголит, который, в основном состоит из пылевых частиц, и свойства его хорошо изучены [1]. Однако, для подтверждения пригодности реголита для практического применения необходимо изучить какими физико-механическими свойствами могут обладать изготовленные из него строительные элементы, и какая технология при этом может быть использована. Имеются публикации, в которых представлены небольшие образцы, полученные из имитаторов лунного реголита при помощи лазерных аддитивных технологий, и только в отдельных работах, например, в [2], приводятся сведения о механических испытаниях, но без учета особенностей технологического процесса и свойств исходного материала. В данном докладе представлены результаты экспериментального исследования физико-механических свойств опытных образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из порошковых композиций - имитаторов реголита, изготовленных на основе измельченной каменной крошки габбро-диабазы (ГД) с параметрами фракционности: ГД 50-100 мкм и ГД 100-140 мкм [3].

В ходе исследований было сплавлено более 150 тестовых образцов на 3D принтере Concept Laser Mlab cusing-100 (лазер Yb:YAG с максимальной мощностью 100 Вт. Получены зависимости свойств образцов от величины подводимой энергии, которая изменялась в диапазоне 12 – 25 Дж/мм³, при этом измеренная твердость образцов имела значения: 330 – 830 HV для ГД 50-100 и 690 – 830 HV для ГД 100-140; максимальные значения прочности на сжатие для образцов из обеих композиций достигали 17-20 МПа при общей тенденции увеличения прочности образцов с увеличением плотности энергии. На рис. 1 показаны образцы, сплавленные на 9-ти режимах (слева) и характер деформации образца при испытаниях на сжатие (справа).

Полученные на данном этапе результаты показали, что по технологии СЛС из порошков с выделенной фракционностью возможно изготовить строительные элементы с объемной плотностью около 1.8 г/см³ и истинной плотностью вещества 2.6 г/см³ с пределом прочности на сжатие около 10 МПа (известные значения для керамического кирпича), и можно ожидать таких же значений при переработке лунных ресурсов *in-situ*.

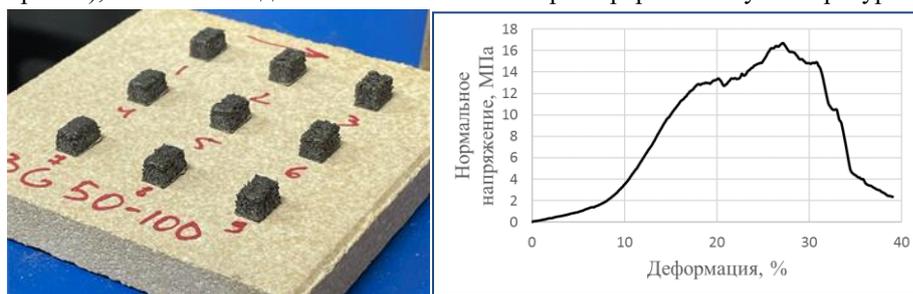


Рис. 1. Тестовые образцы на подложке, размеры (длина, ширина, высота): 7.5×5×6 мм³ и график деформации.

Литература

1. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Москва: б.и., 1975.
2. Goulas A., Binner J.G.P., Engstrom D.S. et al. Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components // Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications. 2018. P. 1–16.
3. Ким А.А., Лысенко А.М., Томилина Т.М. Изучение свойств образцов из имитатора лунного реголита, полученных методом селективного лазерного сплавления // Космические исследования (в печати). Т.62, №5, 2024.

ОПИСАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ

Сайтова Р.Р., Арутюнян А.Р.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
rigastr@yandex.ru

В настоящее время высокоэнтропийные сплавы активно исследуются в качестве конструкционных материалов нового поколения. В связи с этим, необходимо получить всестороннее понимание их поведения, в частности, в условиях ползучести. Эти аспекты механических свойств особенно важны, так как сопротивление ползучести определяет использование сплавов при высоких температурах. Поскольку постоянно ведется поиск материалов с превосходными свойствами, высокоэнтропийные сплавы, полученные путем металлургии пяти или более металлических элементов в равных или почти равных количествах, становятся классом революционных материалов. Десятилетие целенаправленных исследований показало, что многие высокоэнтропийные сплавы обладают непревзойденными свойствами по сравнению с традиционными сплавами, например, высокой термической и микроструктурной стабильностью [1], высокой твердостью [2], высокой прочностью в широком диапазоне температур [3] и превосходной стойкостью к износу [4], коррозии [5], усталости [6], разрушению [7] и высокотемпературному разупрочнению [8]. Учитывая эти достоинства, активно исследуются возможности применения таких сплавов в различных областях, особенно в машиностроении (например, в газотурбинных двигателях). Среди многих показателей производительности глубокое понимание поведения ползучести высокоэнтропийных сплавов имеет решающее значение и необходимо для их применения в сложных инженерных приложениях.

В работе для описания ползучести и длительной прочности высокоэнтропийных сплавов используется концепция поврежденности [9]. Рассматривается сжимаемая среда и учитывается закон сохранения массы. Сформулирована система взаимосвязанных кинетических уравнений для скорости ползучести и параметра поврежденности. Параметр поврежденности задается в виде отношения текущей плотности материала к начальной. Получены точные и приближенные аналитические решения этих уравнений. Построены теоретические кривые ползучести и длительной прочности и дано сравнение с экспериментальными результатами для сплава CrMnFeCoNi [10]. Показано, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Таким образом, предложенная система взаимосвязанных кинетических уравнений позволяет описывать поведение высокоэнтропийных сплавов в условиях ползучести и длительной прочности.

Литература

1. S. Guo, C. Ng, J. Lu, and C. Liu // Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys, *J. Appl. Phys.*, 109:10 2011. 103505
2. K.M. Youssef, A.J. Zaddach, C. Niu, D.L. Irving, C.C. Koch // A novel low-density, high-hardness, high-entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures. *Mater. Res. Lett.*, 3:2 2014. 95–99
3. O. Senkov, S. Senkova, C. Woodward // Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high entropy alloys, *Acta Mater.*, 68 2014. 214–228
4. C-Y. Hsu, T-S. Sheu, J-W. Yeh, S-K. Chen // Effect of iron content on wear behavior of AlCoCrFexMo0.5Ni high-entropy alloys, *Wear*, 268:5-6 2010. 653–659
5. Y.Z. Shi, B. Yang, P.K. Liaw // Corrosion-resistant high entropy alloys. A review, *Metals*, 7:2 2017. 43
6. M.A. Hemphill, T. Yuan, G.Y. Wang, J.W. Yeh, C.W. Tsai, A. Chuang, P.K. Liaw // Fatigue behavior of Al0.5CoCrCuFeNi high entropy alloys, *Acta Mater.*, 60 2012. 5723–5734
7. B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E.H. Chang, E.P. George, R.O. Ritchie // A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications, *Science*, 345:6201 2014. 1153–1158
8. O.N. Senkov, G.B. Wilks, D.B. Miracle, C.P. Chuang, P.K. Liaw // Refractory high-entropy alloys, *Intermetallics*, 18 2010. 1758–1765
9. A.R. Arutyunyan, R.R. Saitova // Exact and approximate solutions of the system of interrelated equations of the theory of creep and long-term strength, *Journal of Physics: Conference Series*, 2231:1 2022. 012001
10. M.-G. Jo, J.-Y. Suh, M.-Y. Kim, H.-J. Kim, W.-S. Jung, D.-I. Kim, H. N. Han // High temperature tensile and creep properties of CrMnFeCoNi and CrFeCoNi high-entropy alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 838 2022. 142748

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИССОЦИАЦИИ И РЕКОМБИНАЦИИ В ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЕ НА КОАЛЕСЦЕНЦИЮ И ДЕКОАЛЕСЦЕНЦИЮ ПРОВОДЯЩИХ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Сайфуллин Д.Д., Чирков В.А., Васильков С.А.

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия
d.sayfullin@spbu.ru

Принцип работы электродегидратора основан на объединении мелких проводящих капель, взвешенных в диэлектрическом масле или нефти, в более крупные, за счёт воздействия на эмульсию электрическим полем высокой напряженности. Взаимодействие двух отдельных капель — сложное мультифизическое явление, и часто необходимо принимать ряд упрощений для математического описания подобных процессов и определения условий объединения капель. Например, проводимость дисперсионной среды в моделях часто принимается равной нулю. Целесообразность такого предположения сомнительна, поскольку процессы диссоциации–рекомбинации в масле и последующее образование слоев ионов разных знаков вокруг капель приводят к увеличению напряженности электрического поля на их поверхностях [1]. Цель настоящей работы — изучение того, как процессы диссоциации–рекомбинации в дисперсионной среде влияют на результат взаимодействия двух одинаковых капель с радиусом R от 0.3 до 2 мм в случае коалесценции, то есть объединения, и декоалесценции, то есть исхода, не приводящего к объединению капель. В частности, рассматривается также случай, когда подвижности ионов разных знаков отличаются.

Результаты исследования получены с использованием численного моделирования в COMSOL Multiphysics. Двухфазная жидкость описана при помощи произвольного Лагранжево–Эйлера метода. Расчеты производятся в два этапа (сближение капель и эволюция формы капель после касания), чтобы описать изменение топологии задачи в момент, когда две капли объединяются в единую структуру.

Исследование проведено для эмульсии «дистиллированная вода—оливковое масло» с варьированием электропроводности последней. Изменение проводимости осуществлялось путём определения безразмерного параметра $P_R = \frac{\sigma_0 R}{b E_{cp} \epsilon \epsilon_0}$, где σ_0 — электропроводимость масла, R — радиус капли, b — подвижность ионов, E_{cp} — средняя напряжённость электрического поля, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость масла и ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Было получено, что в сравнении с моделью абсолютно непроводящей дисперсионной среды ($P_R = 0$) максимальное влияние объёмного заряда на изолированную каплю наблюдается при $P_R \approx 1.7$, а в системе двух взаимодействующих капель — при $P_R \approx 17$. Эти «критические» значения P_R не зависят от R и E_{cp} . При этом, исходя из анализа пороговой напряжённости перехода от коалесценции к декоалесценции, а также распределения разделившихся капель по формам и размерам в случае декоалесценции, «относительное смещение» исходов не превышает 4%, то есть наличие объёмного заряда в системе эквивалентно увеличению средней напряжённости поля не более чем на 4%.

В случае, когда подвижности ионов отличаются, асимметричное распределение заряда приводит к быстрому поступательному движению капель в одном направлении и ЭГД течению, направленному в противоположную сторону. Из-за этого динамика капель становится гораздо более сложной — в некоторых случаях сопротивление, вызванное ЭГД течением, может превзойти силу дипольного притяжения капель для одной из них, из-за чего расстояние между каплями будет только увеличиваться, и они не коснутся.

Численное моделирование, в отличие от эксперимента, позволяет наблюдать за распределением объёмного заряда, благодаря чему результаты экспериментальных исследований становятся более объяснимыми. На основе проведённых исследований можно заключить, что в случае равных подвижностей влияние объёмного заряда незначительно. В случае же сильно отличающихся подвижностей при $P_R \in 1 \div 20$ динамика капель сильно изменяется, и эти случаи требуют пристального внимания в дальнейшем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-79-10078, <https://rscf.ru/en/project/22-79-10078/>.

Литература

1. V. Chirkov, I. Dobrovolskii, S. Vasilkov // The interaction between two electrohydrodynamics phenomena when an electric field affects a two-phase immiscible liquid, Phys. Fluids 33, 043310 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0046386>

КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШУНТА БЛЭЛОКА-ТАУССИГА НА ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ДЕТЕЙ С ВРОЖДЕННЫМИ ПОРОКАМИ СЕРДЦА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТА-МОДЕЛИ

Кучумов А.Г.^{1,2}, Ракишева И.О.², Голуб М.В.¹, Дорошенко О.В.¹, Сайченко Н.Д.¹,
Шехмамиев Р.М.³, Скрипка Н.А.¹

1 - Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

2 - Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
Россия

3 - Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии им. С.Г. Суханова, Пермь, Россия
nikita-s03@mail.ru

Быстрое развитие биомедицинской инженерии требует эффективных и позволяющих принимать решения быстро биомеханических моделей, что необходимо для повышения эффективности принятия решений при лечении. Среди вошедших в практику и показавших свою эффективность вариантов хирургического лечения цианотических врожденных пороков сердца, таких как тетрада Фалло, атрезия клапана легочной артерии и некоторых других, следует выделить создание межсистемного шунта, в частности, модифицированного шунта Блэлока-Тауссига (Blalock–Taussig). Однако его установка несёт достаточно высокие риски (смертность от 2,3% до 16%) и необходимы дополнительные инструменты для их снижения.

В докладе представляются результаты по классификации и анализу влияния геометрии аорты и при необходимости параметров шунта Блэлока-Тауссига (диаметр и место установки) на гемодинамические характеристики: скорости, давление, касательные напряжения (WSS), индекс колебаний касательных напряжений (OSI), относительное время пребывания (RRT). Общий принцип работы мета-модели приведен на Рис. 1. Для построения метамодели используются данные о геометрии аорты и отходящих артерий [1], а также результаты моделирования гемодинамики с помощью вычислительной гидродинамики [2]. С применением алгоритмов машинного обучения строится классификатор, который позволяет описывать ключевых зависимостей между диагнозом, геометрическими и гемодинамическими характеристиками.



Рис. 1. Общий принцип построения мета-модели.

В результате такая метамодель прогнозирует гемодинамические характеристики без привлечения CFD-симуляций. Данная методика может стать частью инновационного программного продукта для принятия решений с целью клинической реализации на практике.

Работа выполнена при поддержке гранта Кубанского научного фонда № МФИ 20.1/12.

Литература

1. А.Г. Кучумов Применение методов вычислительной гидродинамики в решении актуальных задач сердечно-сосудистой хирургии. В сборнике: Сборник научных трудов VII Съезда биофизиков России: в двух томах. Сборник материалов съезда. Т.1. Краснодар, 2023. С. 23-24.
2. A.G. Kuchumov, O.V. Doroshenko, M.V. Golub, I.O. Rakisheva, N.D. Saychenko, R.M. Shekhmametyev // Numerical method for geometrical features extraction and identification of patient-specific aorta models in pediatric congenital heart disease, Mathematics, 11:3 2023. 2871.

ВЯЗКОСТНОЕ ПАЛЬЦЕОБРАЗОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ФЛЮИДНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Саламатин А.А.^{1,2}, Халиуллина А.С.²

1 - ИММ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Россия

2 - Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

arthur.salamatin2@gmail.com

Одним из применений процессов сверхкритической флюидной экстракции (СФЭ) является извлечение ценных натуральных соединений – триацилглицеридов (масла) – из растительного сырья [1,2]. Для этого сырье измельчается и помещается в цилиндрический аппарат кругового сечения, где формируется стационарный зернистый слой. Через него прокачивается растворитель (экстрагент) при известном объемном расходе. Он пропитывает сырье, растворяет в себе масло и выносит его к выходному сечению аппарата. Зернистый слой, как правило, считается монодисперсным [3].

Математическая модель процесса экстракции включает уравнение баланса массы в поровом пространстве зернистого слоя. Оно содержит источниковый член, характеризующий межфазный массообмен. Аналитическое выражение источникового члена следует из внутренней подмодели массопереноса в масштабах индивидуальной частицы. Часто она формулируется на основе приближения сужающегося ядра (SC – shrinking core) [4-6].

В данной работе исследуется пальцеобразование в условиях, характерных для СФЭ. Эффект возникает при замещении смешивающихся жидкостей с разными вязкостями и плотностями. Одним из механизмов образования пальцев является наличие градиентов вязкости. В случае смешивающихся жидкостей речь идет о фильтрации раствора с переменной концентрацией. В условиях СФЭ явление осложняется массообменом между раствором и стационарным зернистым слоем, в результате которого масло переходит из твердой стационарной фазы в подвижную фазу фильтрующегося растворителя и изменяет его компонентный состав.

В данной работе предпринимается попытка исследования влияния пространственной неоднородности свойств фильтрующего раствора на процессы экстракции. Изначально задача, описывающая СФЭ из высокомасличного сырья, формулируется в двумерной осесимметричной постановке. При этом последовательный учет специфики условий СФЭ позволяет добиться существенного упрощения общей модели. В результате снижается размерность задачи, упрощается ее анализ при сохранении достаточной общности описания процесса. Новая формулировка позволяет учесть нелинейность поля давления, вызванную перепадом вязкости раствора в зернистом слое. На основе полученных уравнений исследуется влияние параметров процесса, а именно дисперсии, вязкости, объемного расхода и размеров аппарата, на динамику развития фронта вытеснения насыщенного раствора.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-71-00080.

Литература

1. Ф. М. Гумеров // Сверхкритические флюидные технологии. Экономическая целесообразность. 2019. 440 с.
2. L. Fiori, D. Basso, P. Costa // J. Supercrit. Fluids, 47 2008. 174–181.
3. J. M. del Valle // J. Supercrit. Fluids. 96 2015. 180–199.
4. M. Goto, B. C. Roy, T. Hirose // J. Supercrit. Fluids. 9 1996. 128–133.
5. Р. Н. Максудов, А. Г. Егоров, А. Б. Мазо // Сверхкритические Флюиды Теория и Практика. 3 2008. 39–48. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11914138> (accessed March 29, 2022).
6. А. А. Саламатин // Сверхкритические Флюиды Теория и Практика. 11 2016. 41–53.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ УРОТРОПИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ФИЛЬТРУЮЩЕГОСЯ ГАЗА С ПОЛУЧЕНИЕМ ГОРЮЧИХ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Салганский Е.А., Зайченко А.Ю., Подлесный Д.Н., Салганская М.В., Цветков М.В.,
Цветкова Ю.Ю.

ФИЦ ПХФиМХ РАН, Черноголовка, Россия
sea@icp.ac.ru

В работе экспериментально исследовалась газификация твердого пористого горючего при фильтрации через него высокотемпературных газообразных продуктов. В качестве твердого горючего использовался сублимирующий материал - уротропин. Показано, что с увеличением начальной температуры фильтрующегося газа время газификации уротропина снижается, увеличивается интенсивность процесса газификации горючего, что приводит к увеличению потока продуктов газификации уротропина. В интервале температур 470-500 К происходила интенсивная газификация уротропина, при этом температура выходящих газообразных продуктов изменялась слабо.

РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ ИЗ ГРАФЕНА НА ОСНОВЕ МОМЕНТНО-МЕМБРАННОЙ ТЕОРИИ УПРУГИХ ТОНКИХ ТЕЛ

Саркисян С.О.¹, Жамакочян К.А.¹, Саркисян Л.С.²

1 - Ширакский государственный университет, Армения

2 - Институт Механики НАН Армении, Армения

s_sargsyan@yahoo.com

Развитие нанотехнологий вызвало большой интерес к механическим устройствам для применения их в современных фундаментальных и прикладных физических экспериментах (детектирование малых масс, сверхмалых перемещений, измерять силы между индивидуальными биомолекулами, исследовать процессы на атомном уровне).

Известно, что в большинстве случаев механические резонаторы представляют собой кантилевер (балка, закреплённая на одном конце) или мостик (балка, закреплённая на обоих концах), изготовленный с помощью определённых монокристаллических материалов. В настоящее время альтернативой этим традиционным механическим резонатором является графен (или углеродная нанотрубка).

Отметим, что в работе [1] устанавливается моментно-мембранная теория упругих тонких пластин как континуальная теория деформационного поведения листа графена (численно определены жёсткостные характеристики этой теории не используя понятие толщины пластинки, т.е. графена).

В данной работе излагается одномерная моментно-мембранная теория упругих тонких пластин для листа графена при его поперечном изгибе (т.е. соответствующая теория упругой тонкой балки):

Уравнения движения

$$\frac{\partial N_{13}}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial L_{12}}{\partial x} - N_{13} = J_0 \frac{\partial^2 \Omega_2}{\partial t^2}, \quad (1)$$

Геометрические и физические соотношения

$$\Gamma_{13} = \frac{\partial w}{\partial x} + \Omega_2, \quad k_{12} = \frac{\partial \Omega_2}{\partial x}; \quad N_{13} = D_* \Gamma_{13}, \quad L_{12} = D' k_{12}. \quad (2)$$

Здесь, w - прогиб стержня, Ω_2 - свободный поворот точек оси балки, Γ_{13} - поперечные сдвиги, k_{12} - кривизна оси балки, N_{13} - поперечное усилие, L_{12} - изгибающий момент (от моментных напряжений), ρ_0 - линейная плотность, J_0 - линейная плотность инерции вращения; D_* и D' - жёсткостные характеристики балки (ρ_0, J_0, D_*, D' - численно определены для графена в работе [1]). В постановке этой задачи рассматриваются

граничные условия как в случае кантилевера, так и в случае мостика.

Применяя, что временная зависимость прогиба w и свободного поворота Ω_2 имеет гармонический характер, построено общее решение поставленных граничных задач, дан вывод частотного уравнения, выполнен расчёт частот и форм собственных колебаний (при расчётах применяются пакеты ЭВМ для аналитических преобразованиях и решении сложнейших трансцендентных уравнений).

Расчёты показывают, что наименьшая частота собственных колебаний рассматриваемой нанобалки находится в области Гегагерцевой зоне (по сравнению отметим, что у кварцевых резонаторов это частота находится в Мегагерцевой зоне); поэтому будем считать обоснованной идею о том, что лист графена можно использовать для создания наномеханического резонатора нового поколения, и тогда моментно - мембранная теория упругих тонких балок (пластин) могла представлять собой научной базой для проектирования и расчёта этих измерительных систем.

Работа выполнена в рамках контракта N: 10-12/23-I/SHSU финансируемого Комитетом по высшему образованию и науке РА.

Литература

1. С.О. Саркисян // Стержневая и континуально-моментная модели деформаций двумерных наноматериалов. Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. №2. С 109-121.

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ КОРРИГИРУЮЩЕЙ ОПЕРАЦИИ ДЛЯ ПАЦИЕНТА РАННЕГО ВОЗРАСТА СО СКОЛИОТИЧЕСКИМ ИСКРИВЛЕНИЕМ

Сафронова А.А.¹, Жмайло М.А.¹, Маслов Л.Б.^{1,2}, Боровков А.И.¹

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

2 - Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Россия
annasaf39945844@gmail.com

Исправление искривления позвоночного столба на фоне недоразвитого позвонка происходит с помощью установки фиксирующей конструкции. Данная операция сопряжена со сложностями из-за раннего возраста пациентов [1, 2]. Перед хирургами стоит сложная задача выбора протяженности конструкции, которая бы обеспечивала радикальную коррекцию патологии и при этом сохраняла надежность [3]. Данная задача является сложной из-за большого разнообразия таких параметров как степень искривления, сопутствующие заболевания, локализация недоразвитого позвонка, возраст пациента. Использование цифровых моделей для имитации хирургического вмешательства может помочь рассмотреть клинические сценарии в зависимости от степени патологии и индивидуальных особенностей пациента. Рассмотрен случай пациента трех лет со сколиотическим искривлением 34° по Коббу. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния биомеханической системы позвонки-эндофиксатор при коррекции сколиоза. Расчет позволил определить максимальное значение напряжений в костных структурах и имплантате во время устранения искривления.

Литература

1. Feng Y, Hai Y, Zhao S, Zang L. Hemivertebra resection with posterior unilateral intervertebral fusion and transpedicular fixation for congenital scoliosis: results with at least 3 years of follow-up. Eur Spine J. 2016;25(10):3274-3281. <https://doi.org/10.1007/s00586-016-4556-7>
2. Peng X, Chen L, Zou X. Hemivertebra resection and scoliosis correction by a unilateral posterior approach using single rod and pedicle screw instrumentation in children under 5 years of age. J Pediatr Orthop B. 2011;20(6):397-403. <https://doi.org/10.1097/bpb.0b013e3283492060>
3. Vissarionov SV, Syundyukov AR, Nikolaev NS, Kuzmina VA, Korniyakov PN, Maksimov MN, Mikhailova IV. The use of intraoperative neurophysiological monitoring in dorsal resection of hemivertebrae. Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery. 2021;9(3):267-276. DOI: <https://doi.org/10.17816/PTORS61946>

ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

**Сахаров Д.И.¹, Цгоев Ч.А.¹, Братенков М.А.¹, Травников В.А.¹, Середкин А.В.^{1,2},
Калинин В.А.¹, Мулляджанов Р.И.^{1,2}**

1 - Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

2 - Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

d.sakharov@g.nsu.ru

В последнее время, слияние подходов классического моделирования и машинного обучения привело к появлению нового перспективного инструмента – физически-информированных нейронных сетей (PINN) [1]. Ключевыми преимуществами PINN, по сравнению с традиционными численными решателями, являются:

- возможность работы без построения сложных нерегулярных/регулярных расчетных сеток;
- устойчивость к шуму и ошибкам в экспериментальных данных;
- простое внедрение экспериментальных данных.

Более того, использование численных методов для расчета сложных задач, например, связанных с характеристиками турбулентных потоков, может приводить к нехватке вычислительных ресурсов в случае экстремальных параметров течения или необходимости параметрического исследования. В то же время, подходы на основе PINN могут оказаться потенциально эффективными как в качестве полноценного решателя, так и в рамках гибридных методов, объединяющих нейросетевые и классические подходы.

На данный момент современные исследования в области PINN сосредоточены на изучении механизмов управления параметрами нейронной сети и процессом обучения с целью улучшения точности прогнозов. Это направление исследований актуально, поскольку часто достигаемая точность прогнозов оказывается недостаточной для надежного использования в практических приложениях. Работы в этой области стремятся выявить оптимальные стратегии настройки и обучения нейронных сетей, чтобы максимизировать их предсказательную способность и обеспечить их пригодность для решения сложных задач в различных областях науки и инженерии.

В рамках данного исследования изучается эффективность применения существующих модификаций PINN и их комбинаций на примере ряда модельных задач, в том числе, двумерной стационарной задачи Навье — Стокса с препятствием и задачи одномерной конвекции [2]. Особое внимание уделяется анализу влияния различных методов стабилизации процесса обучения нейросети, функции активации и метода сэмплирования точек на качество итоговой аппроксимации, а также подходам, расширяющим возможности PINN. Результаты исследования демонстрируют:

- влияние адаптивных и статических алгоритмов сэмплирования точек на качество итогового решения;
- возможность варьирования параметра задачи – предлагается подход, при котором в процессе обучения модель аппроксимирует сразу множество решений физической задачи, например, при различном числе Рейнольдса в уравнении Навье-Стокса;
- как постепенное усложнение задачи или плавный переход к плохой обусловленности позволяет PINN лучше «понять» физику, что способствует улучшению обобщающей способности и качества модели.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-79-30075-П. Вычислительные ресурсы предоставлены в рамках госзадания Института теплофизики СО РАН (FWNS-2022-0009).

Литература

1. M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, Volume 378, 2019, Pages 686-707, ISSN 0021-9991.
2. Krishnapriyan, A., Gholami, A., Zhe, S., Kirby, R., Mahoney, M. W. Characterizing possible failure modes in physics-informed neural networks, *Advances in Neural Information Processing Systems* 34, 2021, (pp. 26548–26560).

ИСПЫТАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ НАВОДОРОЖЕННОЙ СТАЛИ 20

Седова Ю.С., Полянский В.А.

*Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
sedova.yus@mail.ru*

В нашей стране ежегодно поступает большое число сообщений об авариях теплоэнергетических систем, в том числе о поломках и отказах элементов и конструкций на котельных предприятиях. В большинстве случаев они оказываются связаны с водородным охрупчиванием сталей теплотехнического оборудования, в том числе стенок котлов, перегородок и труб. Эти ситуации особенно опасны, потому как накопленный в металле водород может индуцировать бездеформационные повреждения, которые происходят без утонения стенки в зоне разрушения и каких-либо других предвестников.

Для измерения механических характеристик материала стенок, расчетов на прочность и оценки остаточного ресурса конструкций проводят механические испытания трубной продукции и определяют их соответствие требованиям технических условий. Согласно основным регламентирующим документам [1,2] при приемке изделий и при обследовании котлов, выяснении причин аварий и продлении ресурса работы определяют временное сопротивление на растяжение (предел прочности) σ_B , характеризующее предел текучести напряжение $\sigma_{0,2}$ и относительное удлинение δ путем проведения механических испытаний образцов, вырезанных продольно оси трубы. Вместе с тем исследования разрушенных при эксплуатации труб поверхностей нагрева показали, что измеренные таким образом параметры оказываются не информативны [3]. Кроме того, в тонкостенных трубах, работающих под внутренним давлением, возникают окружные напряжения, в два раза превышающие осевые [4]. В случае толстой стенки (при отношении диаметра трубы к толщине стенки менее 12,5) разница в максимальных окружных и продольных напряжениях будет еще значительнее. Отсюда очевидно, что регламентированные руководящими документами механические испытания в случае котельных труб не предусматривают нагружение металла в направлении максимальных рабочих механических напряжений, что может приводить к ошибкам в оценке рабочих характеристик труб и оценке их остаточного ресурса. В то же время было установлено [4], что накопленный в процессе эксплуатации водород неравномерно распределяется в трубах поверхностей нагрева, эта разница увеличивается со временем и в критических случаях наблюдается пятикратное превышение его содержания в местах концентрации. В свою очередь, это приводит к еще большим особенностям напряженно-деформированного состояния трубы, наиболее четко прослеживаемым при исследовании ее полного поперечного сечения.

На основании этого наиболее целесообразным и одновременно простым методом оценки механических свойств труб и оценки их остаточного ресурса представляется испытание равномерных кольцевых образцов, вырезанных из труб, на цилиндрических или полумонолитных оправках.

В данной работе представлено численное исследование поведения кольцевых образцов, выполненных из стали 20, при их испытании на растяжение. Выполнено сравнение напряженно-деформированного состояния и отмечены особенности разрушения насыщенных водородом и ненаводороженных металлических образцов. Обсуждаются преимущества проведения предложенного метода механических испытаний против стандартных методик испытаний на растяжение вырезанных из труб продольных образцов.

Литература

1. ТУ 14-3Р-55-2001 Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. М.: РНИИТП, 2001. - 8 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила осуществления эксплуатационного контроля металла и продления срока службы основных элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций», утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020 №535.
3. Рудаченко А.В., Саруев А.Л. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.
4. Количественная оценка концентрации водорода в металлургической продукции при входном контроле и в процессе эксплуатации энергетического оборудования и материалов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.); рук. Нечаева А. В. - Омск, 2023. - 285 с. - № НИОКР-ИЛ-01-2023.

О ПРИМЕНЕНИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ К ЗАДАЧЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Селиванов Ю.С.^{1,2}, Матвеев К.А.²

1 - ФАУ "СибНИИ им.С.А. Чаплыгина", Новосибирск, Россия

2 - ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,

Новосибирск, Россия

u.s.selivanov@mail.ru

Топологическая оптимизация конструкций – вид оптимизации, при котором определяется оптимальное распределение материала внутри заданного объема с учетом дополнительных ограничений. На сегодняшний день существуют такие основные методы топологической оптимизации, как SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), метод установления уровня (level-set method), методы однонаправленной и двунаправленной топологической оптимизации (ESO/BESO methods)[1]. Еще одним из подходов к оптимизации является использование нейронных сетей и современных методов глубокого обучения[1].

Целью оптимизации топологии является нахождение оптимальной компоновки структуры в пределах заданной области. Единственными известными в данной задаче являются нагрузки, граничные условия, объем конструкции, а также, возможно, некоторые дополнительные конструктивные ограничения. Постановка задачи методом конечных элементов области записывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \min C &= F^T \cdot U \\ G_0(\rho) &= \frac{\sum_i v_i \rho_i}{V_0} - f \leq 0 \\ 0 &\leq \rho_i \leq 1, i = 1, \dots, N \end{aligned} \right\}$$

Здесь ρ обозначает вектор проектных переменных длины N , F – вектор узловых нагрузок, U – вектор узловых перемещений, f – желаемая часть результирующего объема.

В данной работе использована нейронная сеть, состоящая из 5 слоев, в которых находится по 20 нейронов. Для каждого нейрона 4-х первых слое была выбрана функция активации LeakyReLU[2], для последнего слоя выбрана функция softMax[3], которая имеет столько выходов, сколько входов. Перепишем постановку задачи с помощью метода квадратичных штрафов:

$$L(w, \alpha) = F^T U + \alpha \left(\frac{\sum_i v_i \rho(w)_i}{V_0} - f \right)^2$$

На рисунке 1 представлен алгоритм проведения оптимизации с помощью нейронных сетей.



Рисунок 1 – Алгоритм топологической оптимизации с помощью нейронных сетей

На рисунке 2 представлены результаты оптимизации с помощью алгоритма (слева) и с помощью пакета Ansys Workbench (справа) для $f = 0,7$. Значения целевой функции равны $5,59 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $7,10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ для результата, полученного с помощью алгоритма и с помощью пакета Ansys Workbench соответственно.

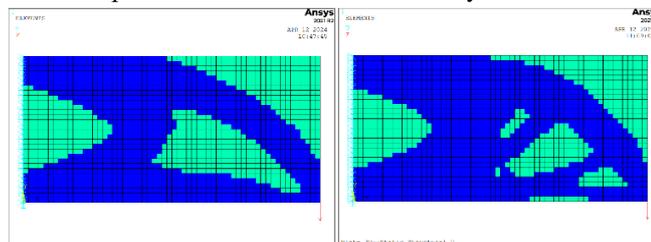


Рисунок 2 – Результаты оптимизации

Литература

1. Seungyeon Shin, Dongju Shin, Namwoo Kang, Topology optimization via machine learning and deep learning: a review, Journal of Computational Design and Engineering, Volume 10, Issue 4, August 2023, Pages 1736–1766
2. Lu Lu, Yeonjong Shin, Yanhui Su & George Em Karniadakis. (2020). Dying ReLU and Initialization: Theory and Numerical Examples. Communications in Computational Physics. 28 (5). 1671-1706.
3. Николенко С., Кадурын А., Архангельская Е. Глубокое обучение. — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.: ил.

О КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ И АНАЛИТИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ ОДНОМЕРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ

Селин Н.А.¹, Удалов П.П.¹, Лукин А.В.¹, Попов И.А.¹, Полеткин К.В.²

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*2 - Технологический университет Хэфэя, Китай
selin-nikita@mail.ru*

В работе рассматривается модель плоских движений прямоугольного кольца в электромагнитном поле двух катушек индуктивности. Проводится верификация аналитических выражений собственных и взаимных индуктивностей системы прямоугольное кольцо - катушки индуктивности с численными результатами, полученными в программных комплексах Comsol Multiphysics, Ansys Electronics. Представлен подход к исследованию нелинейной динамики электромагнитного бесконтактного подвеса вблизи положения равновесия с применением асимптотических методов.

Вопросы исследования нелинейной динамики электромагнитных (индукционных) подвесов представлены в работах [1-3]. Несмотря на многообразие обсуждаемых вопросов, в них не освещаются вопросы, посвященные сравнению аналитического и численных решений для проводящих контуров, произвольно расположенных в пространстве.

Чувствительная часть электромагнитного подвеса, выполненная в форме прямоугольного кольца, при воздействии на нее пандеромоторных сил в нормальном режиме эксплуатации должна находиться в состоянии устойчивого равновесия (при это наблюдается т.н. электромагнитная левитация [4]) относительно неподвижной опоры без механического контакта. Устройства, основанные на принципе электромагнитной левитации, обладают такими характеристиками, как большее время безотказной работы, долговечность, помехозащищенность [5].

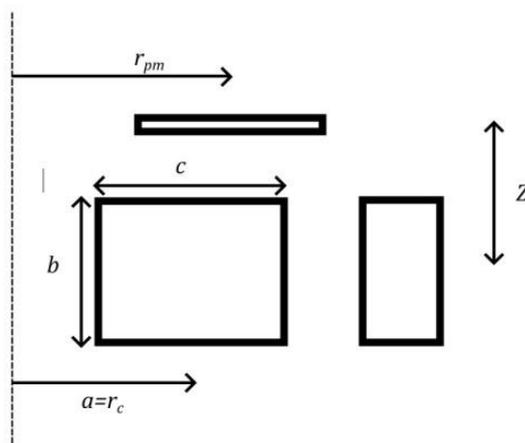


Рис. 1. Схематическое изображение электромагнитного подвеса. Обозначения: 1-левитационная катушка, 2-стабилизирующая катушка, 3-ИМ.

Литература

1. Воронков В.С., Поздеев О.Д., Сандалов В.М. О динамике магнитного подвеса// Изв. вузов Электромеханика, 1974, N 10, С. 10821089.
2. Kirill V Poletkin, Vlad Badilita, Zhiqiu Lu, Ulrike Wallrabe, Christopher Shearwood, Micro-machined inductive contactless suspension: Technology and Modeling // Chapter September 2017
3. Beams J.W., Hulburt C.W., Lotz W.E. Jr., Montague R.M. Jr. Magnetic suspension balance// Review of Scientific Instruments, 1955, Vol.26. N 12, pp. 11811185.
4. Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме, том I и II, М., 1989.
5. Kirill Poletkin Levitation Micro-Systems Applications to Sensors and Actuators // Springer Nature Switzerland AG 2021

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

Селютина Н.С.^{1,2}

1 - *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
2 - *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
nina.selutina@gmail.com

При низких скоростях деформации порядка 0.0001-0.01 1/с в монокристаллах и на высоких скоростях деформации 100-10000 1/с в поликристаллических металлах наблюдается скоростная чувствительность материала к приложенной нагрузке, имеющая монотонный или немонотонный (появление эффекта «зуба текучести») характер. В работе предлагается без учета механизма пластического деформирования прогнозировать динамическое пластическое деформирование монокристаллов и поликристаллических материалов, на основе релаксационной модели пластичности. Определяя главную характеристику модели – характерное время релаксации, можно определить зависимость динамического предела текучести от скорости деформации. В работе сравниваются порядки времен релаксации для алюминия, меди, никеля и серебра для монокристаллических и поликристаллических образцов с временами релаксации доминирующих механизмов пластического деформирования. Показано, что вводя структурных зависимости для времен релаксации и предела текучести металла можно автоматически вычислять зависимость динамического предела текучести от размера зерна.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 220–5156–2191).

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ АНИЗОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ТИПА ТИМОШЕНКО

Сердюк Д.О., Федотенков Г.В.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия*
d.serduk55@gmail.com

Объектом исследования является неограниченная тонкая цилиндрическая оболочка типа Тимошенко радиуса R и постоянной толщиной h с упруго-инерционным наполнителем, характеризующимся жесткостью основания c и массовым коэффициентом m_f . Материал оболочки упругий и анизотропный. В рассматриваемом случае симметрии упругой среды полагается, что материал оболочки обладает одной поверхностью симметрии, геометрически совпадающей со срединной поверхностью оболочки [1]. В терминологии кристаллов такой тип анизотропии соответствует моноклинной симметрии. При этом уравнения движения анизотропной оболочки содержат девять независимых компонент тензора упругих постоянных: $c_{11}, c_{12}, c_{16}, c_{22}, c_{26}, c_{44}, c_{45}, c_{55}, c_{66}$. Движение оболочки рассматривается в цилиндрической системе координат $ORz\alpha$. В начальный момент времени t оболочка находится в невозмущенном состоянии, затем на её боковую поверхность действует нестационарное давление $p(z, \alpha, t)$, изменяющееся как по координатам так и по времени.

Исследование нестационарной динамики анизотропной цилиндрической оболочки, а именно волн нормальных перемещений, тангенциальных перемещений и углов отклонений выполнено с применением метода функций Грина (фундаментальных решений). Суть метода заключается в связи искомых решений с нагрузкой при помощи интегральных операторов типа свёртки по пространственным переменным и времени.

Для построения фундаментальных решений применены интегральное преобразование Лапласа по времени (с учетом начальных условий), интегральное преобразование Фурье по продольной координате и разложение в экспоненциальные ряды по угловой координате. Обратное интегральное преобразование Лапласа находится с помощью вычетов. Оригинал по Фурье построен численно в двух вариантах. В первом варианте применен метод, основанный на связи интеграла Фурье и ряда Фурье на переменном интервале. Во втором варианте использован метод интегрирования быстро осциллирующих функций.

В качестве примера на рис. 1 а, б представлено фундаментальное решение для нормального перемещения в моменты времени 0.3 мс и 0.5 мс.

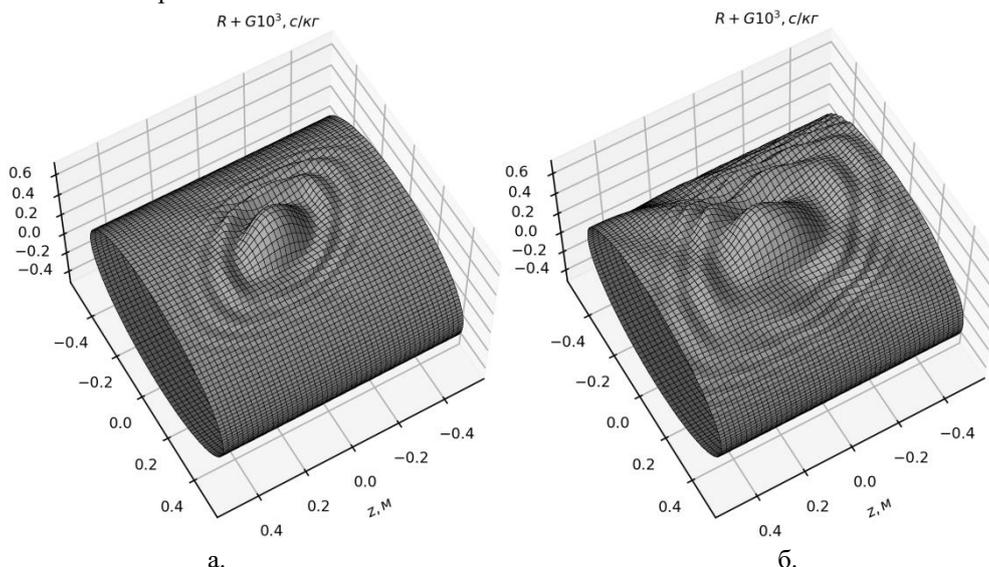


Рис. 1. Фундаментальное решение для нормального перемещения анизотропной цилиндрической оболочки Тимошенко с упруго-инерционным наполнителем: а – момент времени 0.3 мс, б – момент времени 0.5 мс

Оболочка выполнена из графит-эпоксидного композиционного материала [2] с плотностью 1850 кг/м^3 и следующими независимыми компонентами тензора упругих постоянных (в ГПа): $c_{11} = 16.06$, $c_{12} = 13.86$, $c_{16} = 5.46$, $c_{22} = 39.39$, $c_{26} = 14.74$, $c_{44} = 15.53$, $c_{45} = 6.51$, $c_{55} = 8.01$, $c_{66} = 12.29$. Размеры оболочки и параметры основания следующие: $R = 0.5 \text{ м}$, $h = 0.01 \text{ м}$, $c = 300 \text{ Па/м}$, $m_f = 30 \text{ кг/м}^2$.

Результаты, приведенные на рис. 1, демонстрируют асимметричный характер распространения волн, что согласуется с рассматриваемой симметрией упругой среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00389, <https://rscf.ru/project/23-29-00389/>.

Литература

1. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах: Учеб. пособие.: Для вузов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 472 с.
2. Vishnuvardhan J., Krishnamurthy C.V., Balasubramaniam K. Determination of material symmetries from ultrasonic velocity measurements: A genetic algorithm based blind inversion method // Composites Science and Technology, 2008. Vol. 68, Iss. 3–4, p. 862-871. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.08.014

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СЕТОК ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ВОДЫ С РАСПЛАВОМ

Сиваков Н.С., Якуш С.Е.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
sivakov@ipmnet.ru

Решение многих научно-технических проблем связано с необходимостью изучения многофазных

систем, в том числе исследования динамики межфазных границ с учетом фазовых переходов. Так, при тяжелых авариях на АЭС возможен прямой контакт высокотемпературного расплава с водой, приводящий к формированию трехфазной смеси расплава, пара, и воды, в которой потенциально может происходить паровой взрыв [1]. Полномасштабное экспериментальное изучение взаимосвязанных явлений при таких сценариях весьма затруднительно, поэтому эксперименты зачастую производят в лабораторных условиях [2]. Поэтому развитие методов численного моделирования многофазных течений стало одним из приоритетных направлений.

Целью данной работы является трехмерное численное моделирование теплофизических и гидродинамических процессов при взаимодействии струи вскипающей жидкости с расплавленным металлом и валидация полученных численных результатов на экспериментальных данных [2]. Моделирование проводилось при помощи программного пакета с открытым кодом OpenFOAM, в котором реализован авторский расчетный модуль *fciDyMFoam*, основанный на методе VOF для отслеживания межфазных границ. В отличие от предыдущей работы [3], для лучшего разрешения тонкой структуры течений в области высоких градиентов (на межфазных границах) расчет ведется на многоуровневых адаптивных сетках (метод AMR). Это позволяет разрешать мелкие капли и пузырьки, возникающие при взаимодействии, при этом сохраняя довольно крупные расчетные ячейки в областях отсутствия взаимодействия, экономя вычислительные ресурсы.

В работе моделируется одно из испытаний эксперимента [2]. Начальная расчетная сетка содержит примерно 1 миллион кубических ячеек, в ходе расчета путем автоматического измельчения число ячеек достигает более 18 миллионов. При этом удается уменьшить линейный размер кубической ячейки в области взаимодействия (Рис. 1б) до 140 мкм, по сравнению с работой [3], где минимальный размер ячейки составлял 250 мкм. Развитие каверны в расплаве приведено на Рис. 1. Наблюдается фрагментация расплава и его перемешивание с водой. Произведено сравнение количественных результатов с экспериментальными данными по относительной глубине и ширине каверны. Результаты моделирования сравнивались с зарубежными расчетными кодами (multi-fluid модели). Сделаны выводы о влиянии адаптивных сеток на процесс формирования трехфазной смеси и возможностях адекватного воспроизведения сложных многофазных течений численными методами.

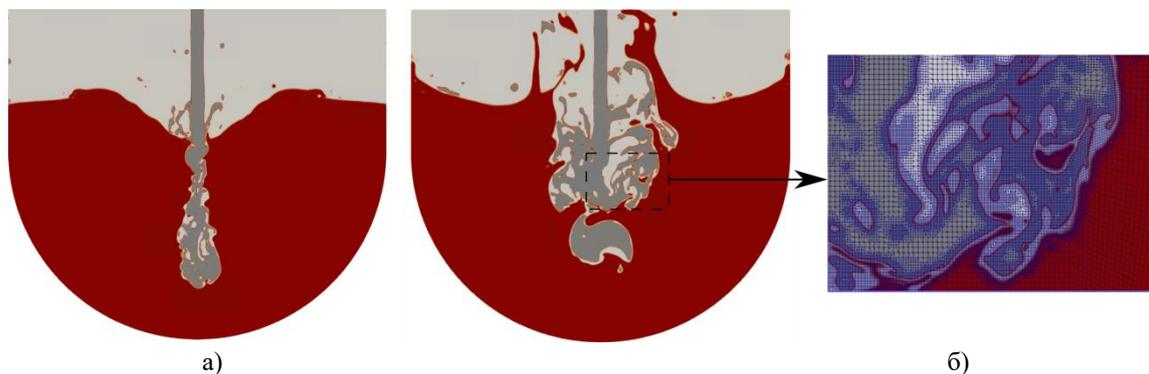


Рис. 1. Многофазное взаимодействие (темный цвет – расплав, серый – вода, светлый – пар): а) момент времени 0.12 с; б) момент времени 0.2 с (справа показан фрагмент адаптивной расчетной сетки)

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМех РАН (№ госрегистрации 124012500440-9).

Литература

1. В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш // Теплофизика и гидродинамика паровых взрывов. 2020. 276 с.
2. Y. Sibamoto, Y. Kukita, H. Nakamura // Visualization and measurement of subcooled water jet injection into high-temperature melt by using high-frame-rate neutron radiography. Nucl. Technol. 2002. V.139. P. 205–220.
3. S.E. Yakush, N.S. Sivakov, O.I. Melikhov, V.I. Melikhov // Three-phase VOF modeling of water jet – molten metal interaction. Nucl. Eng. Des. 2024. V. 418. Article 112893. P. 1-18.

КВАЗИСПУТНИКИ И МИНИЛУНЫ

Сидоренко В.В.

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия
vvsidorenko@list.ru

Происходившее в последние десятилетия быстрое развитие средств и методов астрономических наблюдений привело не только к увеличению числа открываемых астероидов – были выявлены прежде неизвестные типы их динамического поведения. Одним из наиболее неожиданных событий можно считать обнаружение астероидов, сочетающих движение вокруг Солнца с длительным пребыванием в окрестности одной из планет. В зависимости от того, пересекает астероид сферу Хилла планеты или нет, подобные объекты подразделяют на квазиспутники [1] и минилуны [2].

В квазиспутниковом режиме даже в моменты максимального сближения расстояние между астероидом и планетой существенно превосходит размеры сферы Хилла и, таким образом, движение астероида является слабо возмущенным гелиоцентрическим (рис. 1). Это позволяет проводить аналитические исследования квазиспутниковых движений методами теории возмущений [3-6].

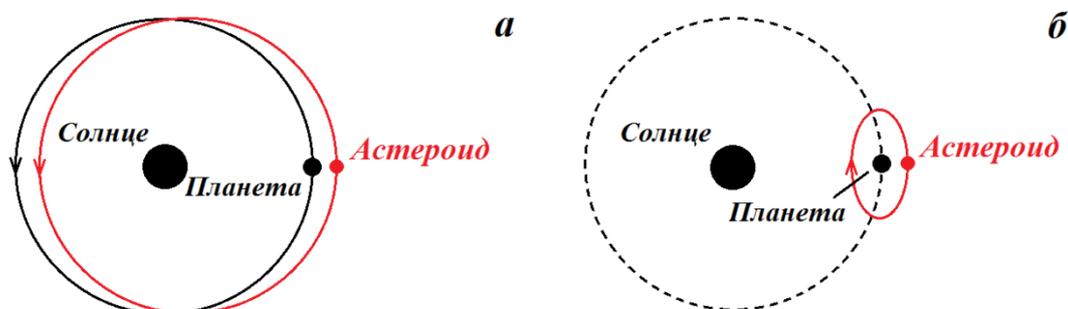


Рис. 1. Орбитальное движение планеты и ее квазиспутника: (а) - движение в гелиоцентрической системе отчета, оси которой сохраняют ориентацию в абсолютном пространстве; планета движется вокруг Солнца по круговой орбите, квазиспутник - по эллиптической, (б) - движение планеты и квазиспутника во вращающейся системе координат, сохраняющей неизменным направление «Солнце-планета».

Достаточно достоверно установлено, что следующие астероиды являются квазиспутниками Земли: (164207) 2004GU9, (277810) 2006FV35, 2013LX28, 2014OL339, (469219) Камо'оалева, 2020PP1, 2022Y G, 2023FW13. В докладе предполагается обсудить качественные свойства динамики этих квазиспутников, установленные на основе простой модели – двукратно осредненной ограниченной круговой задачи трех тел «Солнце-Земля-астероид».

Объекты, именуемые минилунами, совершают несколько оборотов вокруг планеты по орбитам, существенным образом пересекающим сферу Хилла. Известно, что минилунами Земли были астероиды 2006RH120 и 2020CD3. Движение минилун возмущается существенно сильнее, чем движение квазиспутников. Сильные возмущения затрудняют исследование динамики минилун аналитическими методами. Ряд важных результатов о возможном количестве минилун у Земли и продолжительности пребывания объектов в режиме минилун получены с помощью численных расчетов.

Литература

1. Kogan A. Yu.: Quasi-satellite orbits and their applications // Proceedings of the 41st Congress of the International Astronautical Federation / ed. by R. Jehn. 1990. 90–97.
2. Bolin B., Jedicke R., Granvik M. et al.: Detecting Earth's temporarily-captured natural satellites-Minimoons // Icarus. **241**, 2014. 280–297.
3. Mikkola S., Innanen K.: Orbital stability of planetary quasi-satellites // The Dynamical Behavior of Our Planetary System / ed. by R. Dvorak, J. Henrard. 1997. 90–97.
4. Namouni F.: Secular interactions of coorbiting objects // Icarus. **137**, 1999. 293–314.
5. Namouni F., Christou A. A., Murray C. D.: Coorbital dynamics at large eccentricity and inclination // Phys. Rev. Lett. **83**, 1999. 2506–2509.
6. Sidorenko V. V., Neishtadt A. I., Artemyev A. V., Zelenyi L. M.: Quasi-satellite orbits in the general context of dynamics in the 1:1 mean motion resonance: perturbative treatment // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. **120**, 2014. 131–162.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ПАРАМЕТРОВ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ НЕУРАВНОВЕШЕННЫХ РОТОРОВ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ ДВУХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ В ПРОТИВОФАЗНОМ РЕЖИМЕ КОЛЕБАНИЙ

Сизиков В.С.

Институт проблем машиноведения РАН, Россия
sizikovvs@ya.ru

Задача оценки устойчивости режимов движения двух плоских рабочих органов, совершающих противофазные колебания по эллиптическим траекториям, имеет важное прикладное значение для задания режимов технологической обработки сред сжимающимися усилиями в замкнутом рабочем объеме. Противофазный режим колебаний рабочих органов обеспечивает периодическое объемное сжатие обрабатываемой среды, необходимое для создания деформаций в среде для перемешивания, оттирки и других процессов переработки зернистых и жидких сред, связанных с интенсивным силовым воздействием на слой материала в продольном канале.

Проблема устойчивости самосинхронизации вращения двух дебалансных вибровозбудителей, установленных на двух рабочих органах, соединенных между собой упругими элементами и образующими продольный канал с колеблющимися стенками, представляет интерес для выбора режимов работы технологических машин для вибрационной обработки различных сред методом виброобъемного деформирования [1]. Важной особенностью исследуемой механической системы является влияние инерционных (моментов инерции и масс рабочих органов), силовых (возмущающей силы вибровозбудителей) и жесткостных (характеристик упругих элементов взаимодействия и опорных пружин) параметров колебательной системы на границы областей устойчивых режимов противофазной вибрации рабочих органов, обеспечивающих рабочий процесс обработки среды.

Для оценки стабильности самосинхронизации дебалансных вибраторов в ряде технологических машин и устройств традиционно применяют метод прямого разделения движений, позволяющий по средней за период разности кинетической и потенциальной энергий системы оценивать устойчивость простого синхронного режима вращения неуравновешенных роторов вибровозбудителей с заданным относительным сдвигом фаз [2]. Это позволяет обеспечивать запас устойчивости режимов колебаний в противофазе вибрационных рабочих органов технологических машин, делая их малочувствительными к колебаниям условий подачи технологического сырья и его свойств, например, в вибрационных щековых дробилках [3].

В настоящей работе методом прямого разделения движений впервые исследуется устойчивость самосинхронизации двух роторов вибровозбудителей на рабочих органах, совершающих плоскопараллельные противофазные колебания в поперечном и синфазные колебания в продольном направлениях по эллиптическим траекториям. Результаты работы могут быть использованы при определении конструктивных и режимных параметров технологических аппаратов с двумя противофазно колеблющимися плоскими рабочими органами для обработки материалов сжимающимися усилиями в продольном канале.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (рег. номер: 124040800009-8).

Литература

1. В. С. Сизиков // К выбору конструкции аппарата для механоактивации и оттирки минеральных зернистых сред, Обогащение руд, 3:405 2023. 49–56
2. И. И. Блехман // Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. 2013. 640 с.
3. Л. А. Вайсберг, Л. П. Зарогатский, В. Я. Туркин // Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. 2004. 306 с.

ФЛАТТЕР КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Синицын А.А.¹, Алгазин С.Д.^{1,2}

1 - МГУ им. М.В. Ломоносова

*2 - Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН, Россия
art@sinityn.info*

Рассматривается флаттер конической оболочки конечной длины. Приведен современный алгоритм без насыщения применительно к задаче флаттера конической оболочки, рассмотрены конкретные расчеты, демонстрирующие его высокую эффективность.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК МУНТ НА ПАРАМЕТРЫ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ НА УГЛЕВОДОРОДНОЙ ОСНОВЕ

Скоробогатова А.Д.¹, Лысакова Е.И.¹, Пряжников М.И.¹, Минаков А.В.^{1,2}

1 - Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*2 - Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
taisvivat@mail.ru*

В работе были исследованы углеводородные (УВ) буровые растворы, модифицированные многостенными углеродными трубками (МУНТ). В качестве многостенных использовались нанотрубки Таунит-МД производства компании Нанотех Центр (Тамбов, Россия). Внутренний диаметр этих МУНТ составляет 5–15 нм, а внешний 8–30 нм. Были изготовлены устойчивые буровые эмульсии с концентраций нанотрубок до 0,5 масс.%. Показано, что добавка МУНТ в буровые растворы на углеводородной основе может значительно изменить их эффективную вязкость и реологические характеристики даже при очень низких концентрациях (0,1 масс.%), при этом добавка 0,5 масс.% многостенных углеродных нанотрубок в среднем повышает эффективную вязкость буровой эмульсии примерно в 1,5 раза. Влияние МУНТ на реологические параметры буровых растворов сохраняется и после процесса термостарения для всех рассмотренных концентраций.

Исследование коллоидной стабильности приготовленных растворов показало, что выдержка при высокой температуре практически не влияла на устойчивость модифицированных нанотрубками буровых растворов. Растворы с нанотрубками имеют существенно меньший индекс TSI (см. рисунок 1), и процесс термостарения слабо на это влияет. Таким образом, было показано, что добавление МУНТ существенно уменьшает кинетику дестабилизации бурового раствора, как при нормальных условиях, так и при повышенных температурах, т.е. было выявлено, что добавление МУНТ существенно уменьшает кинетику дестабилизации бурового раствора на углеводородной основе как при нормальных условиях, так и при повышенных температурах.

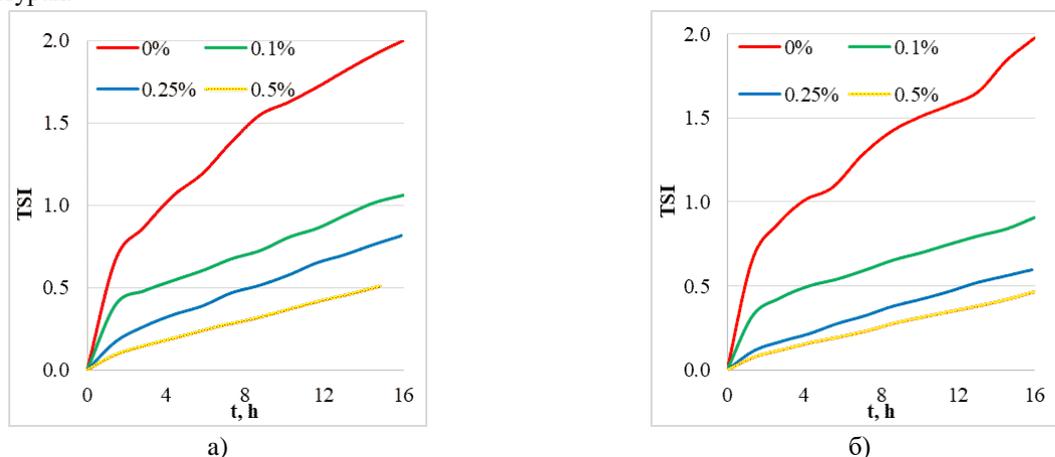


Рисунок 1 – Кинетика дестабилизации буровых растворов с разной массовой концентрацией нанотрубок до (а) и после (б) испытаний на термостарение в течение 8 часов при 150 °С

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.

КОГЕРЕНТНЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПОЛЯХ МОРСКИХ ВОЛН: СОЛИТОНЫ ОГИБАЮЩЕЙ И «ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ»

Слюняев А.В.^{1,2,3}

1 - *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород,
Россия*

2 - *НИУ «Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия*

3 - *Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия*
slunyaev@ipfran.ru

Явление аномально высоких волн на поверхности океана, в русском языке наиболее часто называемых «волнами-убийцами», мотивировало мощный всплеск исследований от фундаментального до узко прикладного плана, посвященных динамическим и вероятностным свойствам негауссовых состояний стохастических нелинейных волн в приложениях к гидродинамике, оптике и многим другим физическим средам. В частности, большое внимание уделяется сильно нелинейным режимам волн на воде, для описания которых недостаточно классических моделей, использующих предположение слабой нелинейности. В то же время, возлагаются надежды на возможность использования модификаций слабо нелинейных решений для описания условий сильной нелинейности. В этой связи интересны солитоноподобные волны и волновые группы в рамках максимально реалистичных (неинтегрируемых) уравнений. Такие структуры обеспечивают когерентные состояния волновых гармоник, влекущие сильное отличие статистики волн от гауссовой. Они являются долгоживущими волновыми образованиями («вечными» в рамках интегрируемых моделей), что можно использовать для целей краткосрочного прогноза, при этом обладают собственными особенностями динамики и способны обеспечивать «экстремальную» статистику волн.

Для условий достаточно большой глубины бассейна в рамках слабонелинейной теории хорошо известны солитоны огибающей нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Их сильно нелинейных аналоги, представляющие собой устойчивые короткие уединенные группы крутых однонаправленных волн, были обнаружены сначала в рамках прямого численного моделирования исходных уравнений гидродинамики, а позднее промоделированы в лабораторных условиях. Такие группы волн сохраняют свою структуру длительное время (в рамках численного моделирования консервативных уравнений заметного тренда разрушения просто не прослеживается). В рамках численного и лабораторного моделирования было продемонстрировано свойство упругости (приближенное) взаимодействия сильно нелинейных солитонов огибающей, характерное для «настоящих» солитонов. Возможность сохранения структуры солитона огибающей более 200 периодов несущей волны при взаимодействии с фоновым полем коллинеарных волн в условиях сильной нелинейности и широкого спектра была продемонстрирована нами в рамках прямого численного моделирования уравнений гидродинамики. Для интерпретации солитонного состава волн была предложена процедура численного решения ассоциированной задачи рассеяния для НУШ в оконных выборках. На основе численного моделирования нами была показана хорошая точность оценки собственных амплитуд и скоростей устойчивых солитонных групп в сильно нелинейном режиме.

Все вышеперечисленные результаты относились к коллинеарным волнам, что является вырожденным случаем с точки зрения картины нелинейных взаимодействий волн, практически нереализуемым в условиях открытого моря. В то же время, эффективно одномерное распространение поверхностных волн происходит в условиях их захвата особенностями батиметрии или (что более интересно для условий глубокой воды, когда эффект самомодулирующей нелинейности наиболее сильный) захвата струйными течениями. В рамках численного моделирования уравнений гидродинамики для волн, распространяющихся навстречу струйному течению, была показана возможность устойчивого распространения локализованных по всем направлениям пространства нелинейных волновых структур, которые взаимодействуют между собой почти упруго. Такие решения в слабо нелинейном пределе описываются полученной нами ранее теорией. Возможность существования солитоноподобных волновых структур в полях нерегулярных неколлинеарных волн с не слишком широким угловым спектром показана в нашей недавней работе.

В совокупности, описанные результаты позволяют применять представления о солитонах огибающей НУШ и соответствующий математический аппарат к определенному классу морских волн-убийц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-17-00153.

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИКОСАЭДРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ

Рожков М.А., Красницкий С.А., Смирнов А.М.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
smirnov.mech@gmail.com

Пентагональные наночастицы ГЦК металлов благодаря многократному двойникованию, свойственному их структуре, обладают уникальными физико-химическими свойствами, находящими потенциальное применение в катализе, фотокатализе и фотовольтаике [1-3]. Характерные представители класса пентагональных частиц – икосаэдрические частицы (ИЧ), обладают осью симметрии пятого порядка, запрещенной законами классической кристаллографии [4]. Такие частицы могут быть представлены как композиция двадцати кристаллических тетраэдров с гранями типа $\{111\}$, имеющих общую вершину. Смежные грани этих тетраэдров образуют двойниковые границы, во многом ответственные за неоднородное напряженное состояние внутри ИЧ. Упругая энергия, запасаемая этими напряжениями, может быть определена аналитически в рамках дисклинационного подхода [5] и численно, например, с помощью методов конечно-элементного или молекулярно-динамического моделирования [6]. Последний метод позволяет учесть влияние реальной атомной структуры ИЧ на процессы релаксации напряжений, в частности, сегрегацию примесей [7].

В настоящей работе упругая энергия ИЧ золота определяется методом молекулярной динамики с помощью потенциала межатомного взаимодействия EAM, реализованного в программном пакете LAMMPS. В рамках интегрирования уравнений движения (шаг интегрирования по времени 0.1 фс, температура 0 К) найдены полные энергии ИЧ разного размера. Упругая энергия таких частиц определяется как разность полной энергии ИЧ и вкладов когезионной и поверхностной энергий. Когезионная энергия рассчитана для модели бездефектного кубического кристалла, на гранях которого заданы периодические граничные условия. Поверхностная энергия определена для аналогичной модели кристалла, одна из граней которого свободна от действия сил. В результате расчетов показано, что упругая энергия, найденная численно, хорошо согласуется с результатами аналитических расчетов для ИЧ с числом атомов большим ~ 18000 .

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-72-10014.

Литература

1. M. McEachran, D. Keogh, B. Pietrobon, N. Cathcart, I. Gourevich, N. Coombs, V. Kitaev // Ultrathin gold nanoframes through surfactant-free templating of faceted pentagonal silver nanoparticles, *Journal of the American Chemical Society*, 133:21 2011. 8066–8069.
2. Y. Zhou, X. Yang, J. He // PdSSe: Two-dimensional pentagonal Janus structures with strong visible light absorption for photovoltaic and photocatalytic applications, *Vacuum*, 181 2020. 109649.
3. B. Pietrobon, M. McEachran, V. Kitaev // Synthesis of size-controlled faceted pentagonal silver nanorods with tunable plasmonic properties and self-assembly of these nanorods, *ACS Nano*, 3:1 2009. 21–26.
4. V. Y. Shevchenko, M. I. Samoilovich, A. L. Talis, A. E. Madison // Structure of icosahedral nanoobjects, *Glass Physics and Chemistry*, 31 2005. 823-828.
5. L. Kolesnikova, M. V. Dorogov, S. A. Krasnitskii, A. M. Smirnov, A. E. Romanov // Disclination models in the analysis of stored energy in icosahedral small particles, *Materials Physics and Mechanics*, 51:6 2023. 76–83.
6. Y. Jia, S. Li, W. Qi, M. Wang, Z. Li, Z. Wang // Thermal stability of marks gold nanoparticles: A molecular dynamics simulation, *International Journal of Modern Physics B*, 31:7 2018. 1741001.
7. D. Pohl, U. Wiesenhütter, E. Mohn, L. Schultz, B. Rellinghaus // Near-surface strain in icosahedra of binary metallic alloys: segregational versus intrinsic effects, *Nano letters*, 14:4 2014. 1776–1784.

ПРИМЕНЕНИЕ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Смирнов Н.Н.^{1,2}

1 - МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия

2 - ФНЦ НИИСИ РАН НИЦ «Курчатовский институт», Россия

mech.math.msu@inbox.ru

Информационные технологии – это не только системы телекоммуникаций, хранения, обработки информации и принятия решений. Стратегические информационные технологии определяются созданием в государстве взаимоувязанной триады, нацеленной на достижение стратегических национальных приоритетов, – инфраструктуры суперкомпьютеров и сетей, программных систем моделирования сложных технологических, природных, физиологических, экономических и социальных процессов, а также технологии использования этих двух компонент в повседневной деятельности ученых, конструкторов, технологов, врачей, экономистов, управленцев.

В лекции приводятся примеры задач, нуждающихся в проведении предсказательного вычислительного моделирования:

- Глобальные процессы во Вселенной: образование сверхновых, взаимодействия молекулярных облаков
- Экология околоземного космического пространства, обеспечение безопасности полетов.
- Моделирование процессов в энергоустановках и в двигателях различных типов.
- Моделирование эффективности мер пожаро- взрывобезопасности на космических объектах.
- Моделирование поведения водителей в автотранспортных потоках

ЧИСЛЕННЫЙ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИСПЕРСИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Смирнов С.А.¹, **Беляев А.К.**^{1,2}, **Суханов А.А.**²

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

serg.a.smir@gmail.com

В данной работе рассматривается задача о распространении волн в упругой среде со случайным модулем Юнга и случайной массовой плотностью. Актуальность такой постановки задачи заключается в том, что она может использоваться при моделировании распространения волн в средах различной природы, имеющих стохастические свойства. Например, в такой постановке может рассматриваться распространение сейсмических волн в земной поверхности, геофизические параметры которой могут быть приняты случайными [1].

Рассматривается одномерное волновое уравнение в области $x \geq 0$ относительно перемещения $u(x)$:

$$\frac{d}{dx} \left([1 + b_\varepsilon q(x)] \frac{du(x)}{dx} \right) + \lambda_0^2 [1 + b_r q(x)] u(x) = 0, \quad (1)$$

где λ_0 – «усредненное» волновое число, $q(x)$ – безразмерная экспоненциально-коррелированная случайная функция, характеризующая отклонения модуля Юнга и плотности от своих средних значений $\langle E \rangle$ и $\langle \rho \rangle$. Отклонения принимаются полностью коррелированными, коэффициенты b_ε и b_r характеризуют их взаимосвязь. В начале координат задано граничное условие $u(0) = H$, на бесконечности – условие излучения Зоммерфельда.

Для аналитического исследования уравнения (1) используется спектральное разложение случайных составляющих по волновым числам в интеграл Фурье-Стилтьеса, что позволяет получить выражения для среднего поля и дисперсии случайной волны. Подробный вывод среднего поля волны для случая, когда случайной является только плотность, приведен в работе авторов [2]. Для получения статистики на множестве

случайных реализаций проводится численное решение с адаптивным шагом интегрирования для обеспечения большей точности. Результаты усредняются по сечениям. Случайные составляющие моделируются с помощью дискретных нормально распределенных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, фильтрацию осуществляет инерционное звено первого порядка. Сравнение характеристик волны, полученных аналитически и численно, приведено на рис. 1.

Средние значения неразличимы и стремятся к нулю по мере удаления от начала координат, стандартные отклонения показывают качественное совпадение и возрастают с ростом координаты. Результаты демонстрируют, что достоверная информация о характеристиках волны, распространяющейся в случайной среде, снижается по мере удаления от места возбуждения, вместе с этим нарастает стохастическая составляющая.

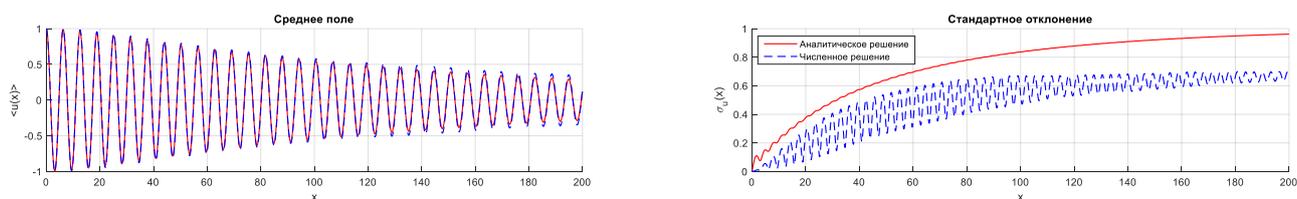


Рис. 1. Математическое ожидание и стандартное отклонение случайной волны

Работа выполнена в рамках госзадания ИПМаш РАН FFNF-2024-0003 № 124041100005-4.

Литература

1. Korn M. Seismic waves in random media // Journal of applied geophysics. – 1993. – Т. 29. – №. 3-4. – С. 247-269.
2. Смирнов С.А., Беляев А.К., Суханов А.А. Аналитическое и численное исследования распространения волн в случайных средах // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: Сборник тезисов докладов. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. – СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – С. 321-323.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА

Соломонов Д.Г.

Пермский Национально Исследовательский Политехнический Университет, Пермь, Россия
solomonov1198@yandex.ru

В современном авиадвигателестроении все более широкое применение получают конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ). При проектировании изделий из композиционных материалов, необходимо обеспечить их усталостную прочность. Для этого требуются экспериментальные данные о характеристиках сопротивления усталостному разрушению. Стандартный подход к определению этих характеристик предполагает проведение длительных дорогостоящих экспериментальных работ [1-3]. В случае композиционных материалов приходится проводить усталостные испытания дорогих натуральных конструкций или конструктивно подобных элементов (КПЭ). Ускоренные методы получения экспериментальных данных о сопротивлении материалов разрушению от многоциклового усталости представляют несомненный практический интерес [4]. Один из ускоренных методов основан на использовании инфракрасной термографии (IRT-метод). Он был разработан первоначально для металлов и изложен в работах [5, 6]. Применение IRT-метода для исследования усталости натуральных конструкций или типовых конструктивных элементов требует разработки и верификации конкретной методики.

Целью представленной работы является разработка ускоренной методики оценки предела выносливости изделий из ПКМ, основанной на применении IRT-метода.

В представленной работе предложен ускоренный метод усталостных испытаний КПЭ из ПКМ, на основе инфракрасной термографии. Он основан на эффекте саморазогрева материала при циклических нагрузках, превышающих предел выносливости. В настоящей работе этот метод применен к различным КПЭ авиационных двигателей.

На первом этапе исследования была разработана методика выбора формы конструктивно подобных

элементов и проведения их усталостных испытаний. Проведено исследование теплового состояния различных конструкций в процессе их усталостного разрушения [7, 8].

К настоящему моменту разработана методика и проведены несколько серий экспериментов по предложенной методике. В результате были определены характеристики сопротивления усталостному разрушению для стандартных образцов и элементов натурной конструкции – оболочки из слоистого углепластика с фланцем и с ребра жесткости.

Полученные с помощью ускоренной методики оценки предела выносливости согласуются с результатами стандартных испытаний. Предложенная методика позволяет существенно сократить количество испытываемых образцов, трудоемкость и продолжительность испытаний по сравнению со стандартными усталостными испытаниями. Это позволяет рекомендовать разработанную методику для проведения сравнительных испытаний при выборе конструкторских и технологических решений.

Литература

1. Kelly A. Very Stiff Fibres Woven into Engineering's Future: a Long Term Perspective // J Mater Sci. (2008).
2. ASTM Standard D 3479/D 3479M – 96. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. 2007. 6p.
3. ГОСТ 57143-2016 Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклическом растяжении. М. Стандартинформ. 2016. 16 с.
4. Collins D.A. Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis, Prediction, Prevention // A Wiley Interscience Publication. N-Y, 1981, 672 p.
5. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components // International Journal of Fatigue 22 (2000) pp. 65–73.
6. Luong M.P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals // Nuclear Engineering and Design, 158 (1995), 363–376
7. Соломонов Д.Г., Саженков Н.А., Конев И.П., Торопицина А.В., Нихамкин М.Ш. Закономерности усталостного разрушения типового композитного фланца // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 3. С. 145–153.
8. Соломонов, Д.Г., Нихамкин М.Ш., Торопицина А.В. Выбор конструктивно-подобных элементов для испытаний на усталость авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 62–70

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЩИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ: АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ, ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ПОЛНОТЫ И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Соляев Ю.О.^{1,2}, Короленко В.А.²

1 - Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

2 - Московский авиационный институт, Москва, Россия

yos@iam.ras.ru

В докладе обсуждаются новые варианты представления общих решений для уравнений равновесия градиентной теории упругости (ГТУ). Рассматриваемая теория была построена в работах Р. Миндлина и Р. Тупина на основе предположения, что плотность энергии деформаций среды зависит не только от деформаций, но и от их пространственных производных. Уравнения равновесия ГТУ обладают повышенным четвертым порядком и в общем случае изотропной среды содержат два дополнительных масштабных параметра помимо классических параметров Ламе [1]. В докладе обсуждается алгоритм построения общих решений ГТУ в форме Буссинеска и в форме Папковича-Нейбера, а также потенциалов Ламе (для динамической постановки задачи). Предложен новый упрощенный вариант представления решения в форме Папковича-Нейбера, для которого доказана теорема о полноте [2]. Показано, что предложенное представление общего решения позволяет в удобной форме решать различные классы прикладных задач. В частности, показана возможность обобщения асимптотического решения М. Уильямса для задач ГТУ о трещинах [3], а также других аналитических и численно-аналитических решений для задач с концентрацией напряжений. Практическое применение рассматриваемых подходов связано с описанием процессов разрушения хрупких и квази-хрупких материалов [4,5].

Литература

1. Mindlin, R.D. Micro-structure in linear elasticity. Arch. Ration. Mech. Anal. 1964, 16, 51–78.
2. Solyaev, Y. Complete General Solutions for Equilibrium Equations of Isotropic Strain Gradient Elasticity. Journal of Elasticity (2023). <https://doi.org/10.1007/s10659-023-10039-4>
3. Solyaev Y. Higher-order asymptotic crack-tip fields in simplified strain gradient elasticity //Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2024. – N 104321.
4. Васильев В. В., Лурье С. А., Салов В. А. Исследование прочности пластин с трещинами на основе критерия максимальных напряжений в масштабно-зависимой обобщенной теории упругости //Физическая мезомеханика. – 2018. – Т. 21. – №. 4. – С. 5-12.
5. Vasiliev, V., Lurie, S., Solyaev, Y. (2021). New approach to failure of pre-cracked brittle materials based on regularized solutions of strain gradient elasticity. Engineering Fracture Mechanics, 258, 108080.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ЛОКАЛЬНО-РЕЗОНАНСНЫХ ДВУМЕРНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ФУНКЦИЙ ГРИНА

Сорокин С.А.^{1,2}, Смирнов В.В.¹, Ковалёва М.А.^{1,2}

1 - ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семёнова РАН, Москва, Россия

2 - НИУ ВШЭ, Москва, Россия

sorokin.sergius@gmail.com

В последнее время задачи исследования, предсказания и управления волновыми свойствами метаматериалов и метаструктур привлекают большое количество исследователей, как в фундаментальных так и в прикладных аспектах. Идея создания метаматериалов зародилась всего лишь пару десятков лет назад благодаря зонной теории в физике твердого тела. Оказалось, что периодическая резонансная структура с характерными размерами меньшими, чем длина падающей электромагнитной волны приводит к необычным оптическим свойствам, невозможным в обычных (не мета-) материалах. Позже этот же принцип начали использовать и для акустических и упругих волн, что послужило появлению акустических, упругих и фононных метаматериалов. Настоящая работа посвящена изучению волновых свойств двумерных упругих метаструктур, называемых декорированные пластины. Такая система состоит из тонкой пластины, способной испытывать изгибные колебания, и периодической структуры из дискретных резонаторов, прикрепленных к ней. В такой структуре волновые свойства будут обеспечиваться не только периодичностью структуры так называемых метаатомов, но и их резонансными свойствами. За счёт этого возможности метаматериала значительно расширятся.

Рассматриваемые двумерные структуры могут демонстрировать различные волновые свойства, которые позволяют управлять распространением волн в таких метаматериалах. Например, подбирая резонансную частоту осцилляторов, закрепленных на тонкой пластине, мы можем управлять положением и шириной запрещенной зоны в спектре изгибных колебаний даже при очень низких частотах. Такие запрещенные зоны могут быть полными или частичными, т.е., относящимися к некоторому интервалу волновых векторов. Такие особенности спектров могут быть интересны как с точки зрения гашения колебаний, так и с точки зрения их фильтрации. Было также показано, что в двумерных столбчатых массивах на тонкой пластине можно наблюдать резонансы Фано, волноводные моды, эффекты захвата радуги, краевые состояния. Таким образом, данные системы обладают широкими возможностями для создания и изучения различных физических эффектов.

Одним из самых простых способов получения массива локальных резонаторов на поверхности тонкой пластины является формирование столбчатых структур. Подбирая параметры пластины и стержня, мы можем получить запрещенную зону в изгибном спектре пластины при нужной нам частоте. В действительности, такие стержни обладают целым набором собственных частот, в частности, связанным не только с изгибной, но также и с крутильной или продольной деформациями. Расчеты подобных структур можно производить методами конечных элементов, однако чрезвычайно полезны аналитические модели, на основании которых можно было бы проектировать конечно-элементную модель метаматериала. Действительно, в аналитическую модель может быть заложен весь массив необходимых параметров (характеристики подложки, количество и положения резонансных частот) и проведена предварительная оценка свойств метаматериала. В настоящей работе представлено изучение волновых свойств двумерных метаматериалов в рамках методики, основанной на методе функций Грина. В рамках данного подхода удаётся получить замкнутое выражение для дисперсионных соотношений различных конфигураций локально-резонансных структур на поверхности тонкой пластины.

Работа проведена при поддержке гранта РФФ № 24-23-00435.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА С ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ СПФ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АМПЛИТУДАХ УСКОРЕНИЙ ВЫНУЖДАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Стародубова М.С., Беляев Ф.С., Волков А.Е., Евард М.Е.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
st063188@student.spbu.ru

Сплавы с памятью формы (СПФ) – это функциональные материалы, обладающие рядом свойств, которые позволяют эффективно использовать их для виброзащиты. К этим свойствам можно отнести псевдоупругость, позволяющую конструкции вернуться в исходное положение после значительной деформации, рассеивание энергии за счет вызванного напряжением мартенситного превращения, а также хорошую усталостную и коррозионную стойкость. Использование этих сплавов в производстве демпферов позволяет повысить устойчивость конструкций и снизить амплитуду колебаний.

Ранее было проведено экспериментальное и теоретическое исследование колебаний крутильного маятника и было показано, что колебаниями можно управлять за счет элемента из СПФ [1, 2]. В частности, при помощи микроструктурной модели построены зависимости коэффициентов передачи ускорения и перемещения от частоты вынуждающих колебаний и температуры. Однако при моделировании не учитывалась необратимая деформация в СПФ, выделение и поглощение тепла за счет прямого и обратного мартенситного превращения, также не исследовалось подробно влияние амплитуды вынуждающих колебаний.

В данной работе выполнен теоретический расчет вынужденных колебаний виброзащитного устройства с рабочим элементом из СПФ при разных амплитудах и частотах вынуждающих колебаний и с учетом теплообмена с окружающей средой. Получена зависимость коэффициента передачи ускорений от частоты колебаний основания для рабочего элемента, находящегося в мартенситном, аустенитном и двухфазном состоянии. На основании полученных результатов сделан вывод, что резонансная частота колебаний и коэффициент передачи ускорений для элемента из СПФ зависят от амплитуды ускорений вынуждающих колебаний. Резонансная частота колебаний уменьшается с ростом амплитуды ускорений вынуждающих колебаний, а коэффициент передачи ускорений для частот в районе резонанса снижается.

Было исследовано влияние необратимой деформации в СПФ на поведение устройства. Показано, что учет микропластической деформации снижает значение коэффициента передачи ускорений при больших амплитудах ускорения основания.

Также получены результаты для колебаний при разных условиях теплообмена и с учетом выделения и поглощения тепла при прямом и обратном мартенситном превращении. На основании полученных данных сделан вывод, что учет теплообмена может влиять на резонансную частоту колебаний и на коэффициент передачи ускорений.

Результаты могут представлять интерес при разработке реальных виброзащитных устройств на основе сплавов с памятью формы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-21-00167.

Литература

1. Belyaev S. P., Vdovin E. D., Volkov A. E., Voronkov A. V.: "Experimental study and simulation of vibrations in TiNi controlled by periodic martensitic transformations", in: B.H.V. Topping and B. Kumar (eds) (1999)
2. Belyaev S. P., Inochkina I.V., Volkov A. E.: "Modeling of vibration control, damping and isolation by shape memory alloy parts". Proc. 3rd World Conference on Structural Control (3WCSC) edited by F.Casciati. Wiley, 2003. Vol. 2. P. 779-789

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

Степанова И.В.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
stepiv@icm.krasn.ru

В работе проанализированы характеристики совместного стационарного течения испаряющейся жидкости и спутного газа в узком плоском горизонтальном канале. В качестве рабочих сред рассматриваются водно-спиртовой раствор с разным содержанием этанола и смесь азота с парами испаряющегося этанола. Изучается влияние эффектов, связанных с изменением концентрации водно-спиртового раствора. Для моделирования построено новое точное решение уравнений термодиффузионной конвекции в приближении Обербека-Буссинеска [1]. Используемая модель предполагает наличие границы раздела жидкость-газ, допускающей испарение, где ключевую роль играют поверхностные явления [2]. С целью определения возможных замыкающих отношений проведено тестирование граничных условий для искомых функций на стенках канала и на поверхности раздела. Предложена корректная постановка задачи, обеспечивающая приемлемое соответствие известным экспериментальным данным как о свойствах рабочей жидкости, так и о возможной картине двухслойных течений. Изучено влияние толщины жидкого слоя на интенсивность испарения, показано качественное совпадение с результатами эксперимента (рис. 1).

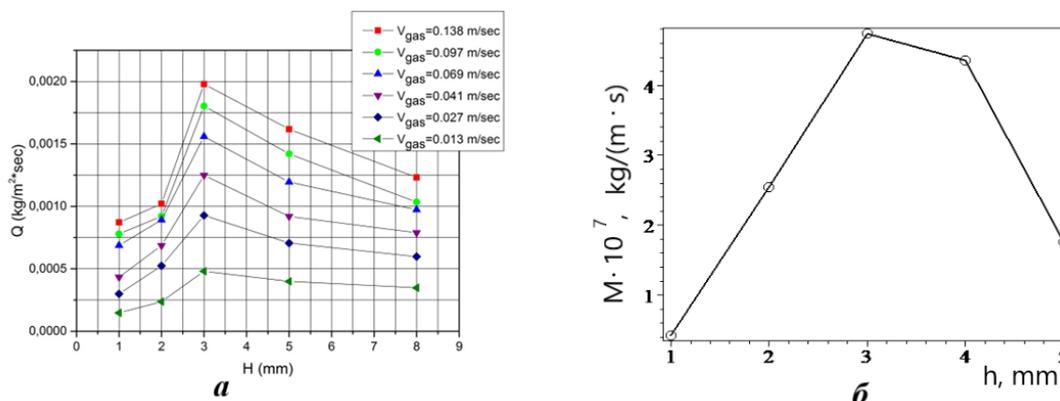


Рис. 1. Влияние толщины жидкого слоя на массовую скорость испарения: (а) – экспериментальные данные зависимости массовой скорости испарения Q от толщины жидкого слоя H для системы «этанол-воздух» при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщине газового слоя 3 мм ; (б) – расчетные данные зависимости массовой скорости испарения M от толщины нижнего слоя h , полученные с помощью точного решения задачи о диффузионном испарении в системе «смесь этанола (70%) и воды (30%) – пары этанола и азот» при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщине газового слоя 3 мм .

Кроме этого, установлен нелинейный характер зависимости скорости испарения от концентрации спиртового раствора. Решение прогнозирует снижение скорости испарения за счет эффекта диффузионного сопротивления, когда массовая концентрация этанола в жидкой фазе превышает 60%. Тем самым показана возможность управления параметрами теплообмена путем выбора состава рабочих сред. Полученные результаты могут быть полезны при разработке экспериментальных методов исследования межфазных эффектов в многокомпонентных жидкостях.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-11-00243.

Литература

1. В. К. Андреев, Ю. А. Гапоненко, О. Н. Гончарова, В. В. Пухначев // Современные математические модели конвекции. 2008. 368 с.
2. В. Б. Бекежанова, О. Н. Гончарова // Задачи испарительной конвекции (обзор), Прикладная математика и механика, 82:2 2018. 219–260

ПАРАДОКСЫ АРХИМЕДОВОЙ СИЛЫ

Суханов А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
alexeevich2012@gmail.com

Введение. Работа посвящена так называемым парадоксам архимедовой силы, обусловленным неправильным ее применением. Традиционно считается, что выталкивающая сила Архимеда, действующая на тело, погруженное в жидкость, направлена строго вверх и равна весу вытесненной жидкости. Это правильно лишь отчасти и только в том случае, если тело полностью омывается жидкостью. На самом деле сила Архимеда равна поверхностному интегралу векторов давления гидростатических сил по всей омываемой площади погруженного в жидкость тела. Таким образом, сила Архимеда - поверхностная сила давления. Но если тело полностью омывается жидкостью, то в соответствии с формулой Остроградского-Гаусса [1] поверхностный интеграл переходит в объемный и результирующая сила Архимеда равна классической. Несмотря на эти нюансы абсолютно все исследователи при выводе уравнений геометрии и динамики подводных конструкций (см., например, [2, 3]) предлагают заменять веса элементов в воздухе на уменьшенные веса в жидкости с учетом выталкивающей силы Архимеда. Однако для длинномерных подводных объектов, таких как кабели, тросы, трубопроводы, у которых отдельные элементы не омываются со всех сторон, подобные расчеты могут привести к неверным, принципиально другим и сильно заниженным напряжениям с пагубными последствиями.

Силы Архимеда, действующие на кольцо в жидкости. Технику нахождения правильных сил Архимеда продемонстрируем на примере кольца с осесимметричным сечением S и радиусом r , погруженного вертикально в жидкость с плотностью ρ на глубину h (рис. 1, а). Здесь $F^A = \rho g S dl = q dl$ - подразумеваемая объемная сила Архимеда, приложенная к элементу кольца dl , если бы он омывался со всех сторон, q - погонный вес вытесненной жидкости. Искомые радиально направленные погонные поверхностные силы Архимеда f^A находятся вычитанием из объемной силы торцевых сил давления. Их декартовы проекции на оси координат и соответствующие величины равны

$$f_x^A = q \left(2 \sin \beta - \frac{h}{r} \right) \cos \beta, \quad f_y^A = q \left(2 \sin \beta - \frac{h}{r} \right) \sin \beta, \quad f^A = q \left| 2 \sin \beta - \frac{h}{r} \right|$$

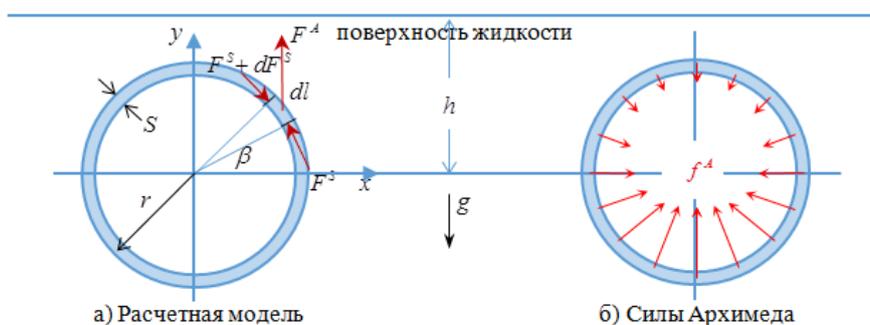


Рис. 1. Кольцо в жидкости

На рис. 1, б представлено распределение погонных сил Архимеда, действующих на кольцо на глубине $h = 3r$. Несмотря на необычную и несимметричную эпюру сил Архимеда, их результирующая направлена строго вверх и равна классическому весу вытесненной жидкости $2\pi qr$.

Заключение. Правильный учет сил Архимеда, являющихся не объемными, а поверхностными силами давления, дает принципиально другие нагрузки на подводные длинномерные объекты. При этом несимметричность сил Архимеда вызывает появление изгибающих моментов, приводящих к большим и зависящим от глубины напряжениям в сечениях $y = 0$, что необходимо учитывать в прочностных расчетах.

Литература

1. Остроградский М.В. Избранные труды. - М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. - 583 с.
2. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. - М.: Наука, 1980. - 240 с.
3. Смирнов А.С., Дегилевич Е.А. Колебания цепных систем: учеб. Пособие. - СПб: Политех-Пресс, 2021. - 246 с.

СОТОВЫЕ СТРУКТУРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Шевченко В.Я.^{1,2}, Балабанов С.В.¹, Сычев М.М.^{1,2}

1 - Институт химии силикатов РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - ЦНИИ Конструкционных материалов «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

msychov@yahoo.com

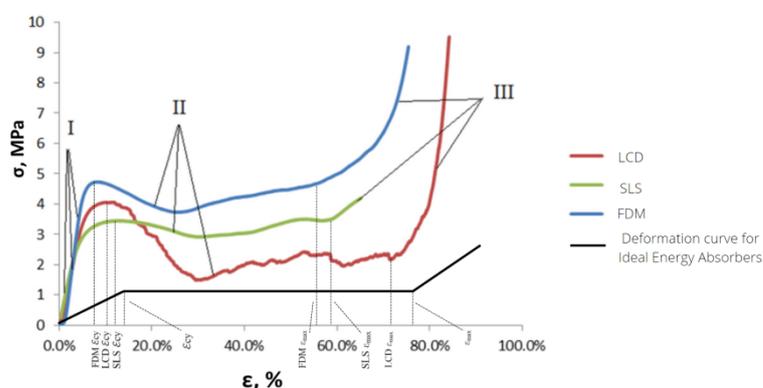
В работе проведено исследование физико-механических свойств структур с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ), имеющих, как показано академиком ВюЯЮ Шевченко с соавторами [1]. Для проведения испытаний были изготовлены образцы из полиамида по SLS (selective laser sintering) технологии 3D печати, из полилактида по FDM (Fused deposition modeling) технологии 3D печати и из фотополимера на основе акрилатов по LCD (liquid crystal display) технологии.

Определены прочностные и энергопоглощающие свойства ячеистых образцов с геометрией ТППМЭ. По результатам испытаний, наибольшей прочностью обладает образец, имеющий структуру ТППМЭ алмаз (Diamond), удельная прочность составила: 25, 20 и 15 МПа*см³*г⁻¹ – для полилактида, полиамида, и фотополимерного материала. Отмечена высокая способность образцов с геометрией ТППМЭ противостоять деформации под действием сжимающей нагрузки, наибольшим модулем Юнга E обладают образцы изготовленные из полилактида, по FDM технологии.

Все испытанные образцы продемонстрировали высокие энергопоглощающие характеристики. Для анализа особенностей геометрии образцов в работе был применён метод скелетных графов [2,3]. Установлена положительная корреляция между механическими характеристиками ячеистых материалов и геометрическими скелетными характеристиками. Благодаря предложенному подходу, основанному на скелетизации сложных геометрических объектов можно предсказать механические характеристики других ячеистых структур. Также топологическая оптимизация геометрии ячеистых материалов, позволяет улучшить геометрические характеристики, что в свою очередь повысит физико-механические свойства ячеистых материалов со сложной геометрией.



а)



б)

Рисунок 1 – Сотовые структуры: а) внешний вид структуры с геометрией «гиرويد»; б) деформационные кривые

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-73-30019.

Литература

1. Shevchenko, V.Y., Sychev, M.M., Lapshin, A.E. et al. Polymer Structures with the Topology of Triply Periodic Minimal Surfaces. *Glass Phys Chem* 43, 608–610 (2017).
2. Sychov M., Lebedev L., Dyachenko S.V., Nefedova L.A. // *Acta Astronautica*. 2018. Vol. 150. P. 81-84.
3. Shevchenko V., Balabanov S., Sychov M. Karimova L. Prediction of cellular structures mechanical properties with the geometry of triply periodic minimal surfaces (TPMS). *ACS Omega*. 2023, 8, 30, 26895–26905, <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01631>

ИЗГИБ МОМЕНТНОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК

Тарлаковский Д.В.^{1,2}, Май Куок Чиен²

1 - Институт механики МГУ, Россия

*2 - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия*

tdvhome@mail.ru

Рассматривается нестационарный изгиб моментных упругих стержней под действием нестационарных нагрузок. Материал стержня предполагается однородным и изотропным. На основе полученных ранее уравнений для моментных упругих оболочек строятся их соответствующие одномерные аналоги. Эти модели меньшей размерности можно использовать при следующих предположениях: имеется поперечное сжатие и предположение о связи координат вектора свободного вращения, аналогичное гипотезе Кирхгофа в классической теории оболочек.

Полученная из общей системы уравнений [1], уравнения в «перемещениях» (кинематических параметров) для стержней содержит шесть неизвестных. Для уменьшения размерности задачи используются три варианта дополнительных гипотез: первый из них не учитывает сжатие поперечного волокна, второй использует гипотезу Кирхгофа-Лява, а третий объединяет эти два предположения. Они соответствуют системам пяти, четырех и трех уравнений для пяти, четырех и трех кинематических параметров.

Для построения решения используется разложение искомых функций и внешних нагрузок в тригонометрические ряды Фурье. Подстановка этих разложений в исходные соотношения приводит к системе уравнений для коэффициентов ряда. Для нее используется интегральное преобразование Лапласа по времени. В результате найдены выражения для коэффициентов рядов в пространстве изображений. Каждое из них представляет собой сумму трёх сверток по времени ядер в виде функций Грина с внешними нагрузками. Сами функции Грина находятся аналитически с помощью вычетов.

Приведен пример решения задачи о действии на стержень сосредоточенной поперечной силы. Для расчетов принято, что она приложена в центре стержня и изменяется по времени как функция Хевисайда. Материал стержня - из алюминиевой дроби в эпоксидной матрице [2,3]. Полученные результаты проиллюстрированы графически. Проведена оценка практической сходимости рядов разложений.

Литература

1. Тарлаковский Д. В., Май Куок Чиен Начально-краевые задачи для моментных упругих пластин // Проблемы безопасности на транспорте: матер. XII Междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д.: в 2 ч., Гомель, 24–25 ноябр. 2022 г. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2022. – Ч. 2. – С. 262–263.
2. Ерофеев В.И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 328с.
3. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Солдатов И.Н. Волновые процессы в сплошных средах. Саратов: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2012. 260 с.

УСЛОВИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ КЛАССА СЕТЕЙ БУСЛАЕВА

Таташев А.Г.^{1,2}, Яшина М.В.^{1,2,3}

1 - Московский автомобильно-дорожный технический университет-МАДИ, Россия

2 - Московский технический университет связи и информатики, Россия

*3 - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Россия*

a-tatashev@yandex.ru

Сети Буслаева или контурные сетевые представляют собой класс динамических систем, разработанный А.П. Буслаевым с целью создания математических моделей автомобильного трафика, имеющих сетевую структуру. Сети Буслаева могут иметь и другие приложения, в том числе, в задачах механики, например, при

исследовании колебаний линейных осцилляторов.

Сеть Буслаева содержит контуры, которые в дискретном варианте представляют собой замкнутые последовательности ячеек, по которым перемещаются частицы по заданным правилам, а в непрерывном варианте дуги окружности, по которым перемещаются связанная группа частиц или непрерывный кластер [1-3]. Важной особенностью таких динамических систем являются общие точки контуров, в которых происходит конкуренция частиц за пространство, разрешаемая по определенному правилу. Одним из типов движения в сетях Буслаева является кластерное движение, при котором находящиеся в соседних ячейках частицы образуют кластеры и перемещаются одновременно. Такой характер движения называется кластерным и введен для транспортных моделей в [4]. По аналогии с вариантом с дискретным вариантом, движущиеся на контурах сети в непрерывном варианте также называются кластерами. Контуры имеют общие точки – узлы, в которых возникают задержки в перемещении частиц (кластеров), обусловленные ограничением, в соответствии с которым более одной частицы (кластера) не могут проходить через узел одновременно. Важной исследуемой характеристикой сети является средняя скорость движения частиц (кластеров) с учетом задержек. Средняя скорость зависит от начального состояния системы. Множество возможных значений средней скорости при различных начальных состояниях образует спектр скоростей. Основные аналитические результаты получены для сетей, содержащих два контура, и сетей с регулярной одномерной или двумерной системы контуров.

Свойство системы попадать за конечное время в состояние такое, что все частицы (кластеры) перемещаются без задержек в текущий момент и в будущем (состояние свободного движения) называется самоорганизацией. Было известно [5] условие самоорганизации для одномерной бесконечной или замкнутой решетки при движении частиц по правилу элементарного клеточного автомата 184 (ECA 184).

Для контурных сетей найдены условия самоорганизации для системы с двумя контурами и одним или двумя узлами. При этом частицы движутся по контуру по правилу ECA 184 и ECA 240. Условия самоорганизации найдены также для вариантов замкнутой или открытой цепочки контуров (для замкнутой цепочки контуров каждый контур имеет два соседних, а для открытой – все контуры имеют два соседних, кроме крайних справа и слева, имеющих по одному соседнему) и для двумерной сети – кольчуги, каждый контур которой имеет по четыре соседних.

Литература

1. Buslaev A.P., Tatashev A.G., Yashina M.V. Qualitative properties of dynamical system on toroidal chainmail //11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013: ICNAAM 2013. 2013, vol.~1558, no.~1, pp. 1144--1147.
2. Бугаев А.С., Буслаев А.П., Козлов В.В., Таташев А.Г., Яшина М.В. Обобщенная транспортно-логистическая модель как класс динамических систем //Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27. – №. 12. – С. 65-87.
3. Bugaev, A. S., Buslaev, A. P., Kozlov, V. V., Yashina, M. V. (2011, October). Distributed problems of monitoring and modern approaches to traffic modeling. In 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 477-481). IEEE.
4. Blank M.L. Exact analysis of dynamical systems arising in models of traffic flow //Russian Math. Surveys. – 2000. - Vol. 55. P. 562–563

К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В СОСТАВНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ОСНОВАНИЯХ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИЙ

Телятников И.С.^{1,2}, Павлова А.В.¹, Рубцов С.Е.¹

1 - Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

2 - Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

ilux_t@list.ru

Введение

Прикладные задачи сейсмологии и вибрационной геофизики по исследованию геофизических полей, при решении которых геологические массивы нередко моделируют слоистыми структурами, требуют учета неоднородности реальной среды по глубине (в том числе наличия обводненных грунтов и грунтовых вод), а также возможных гидросейсмических эффектов, возникающих при вибрационном воздействии на неглубоко залегающие водоносные горизонты. Изучение динамического поведения флюидонасыщенных сред

традиционно основывается на конечноэлементных методах, а также на использовании интегрального подхода. В последнее время для составных сред различной реологии активно развивается метод блочного элемента [1]. В работах [2–5 и др.] представлены результаты изучения волновых полей в слоистых гетерогенных средах. Но, несмотря на большое количество публикаций, объяснение наблюдаемых сейсмо- и виброгидрологических эффектов все еще не является полным, что стимулирует дальнейшие исследования в данной области.

Рассматриваемые модели

Рассмотрены задачи о вибрации гетерогенной среды: слоя идеальной сжимаемой жидкости на водонасыщенном пористоупругом полупространстве (модель 1); упругого слоя, покрывающего слой жидкости на двухфазном полупространстве (модель 2), – в осесимметричной постановке. В слое жидкости на высоте $z=-h$ расположен гармонический источник давления $p(r)\exp(-i\omega t)$. Для установившегося режима решение строится для амплитудных значений неизвестных величин: скоростей и давления в слое жидкости, перемещений скелета и жидкой фазы основания, перемещений покрытия. Движение в слое жидкости, занимающей область $0 \leq r < \infty$ ($-H_1 \leq z \leq 0$ в модели 1, $-H_1 \leq z \leq H_0$ в модели 2), в случае установившихся колебаний удовлетворяет уравнению Гельмгольца для амплитудных значений потенциала скоростей $\varphi(r, z)$, а составляющие скорости жидкости w_r , w_z и гидростатическое давление определяются через φ по известным формулам. Определяющими для смещений $\mathbf{u}_1(r, z) = \{u_{1r}, u_{1z}\}$ упругого слоя ($0 \leq r < \infty$, $-H_0 \leq z \leq 0$) с параметрами: λ_1, μ_1 – упругие модули, ρ_1 – плотность, – являются Уравнения Ламе [2]. Лицевая поверхность покрытия свободна от напряжений. В плоскости контакта покрытия с жидкостью сформулированы граничные условия непрерывности по давлению и нормальной компоненте скорости. Перемещения двухфазного водонасыщенного основания описываются уравнениями Био–Френкеля [2] относительно перемещений твердой $\mathbf{u}(r, z)$ и жидкой $\mathbf{v}(r, z)$ фаз. Полагается, что на границе жидкости и пористоупругого полупространства происходит свободная фильтрация жидкости. Для корректного описания излучаемых на бесконечность волн использован принцип предельного поглощения.

Решение контактных задач для слоистой среды, включающей слой жидкости и водонасыщенное основание, выполнено с применением преобразования Ханкеля по переменной r . Использована техника выделения безвихревой и соленоидальной составляющих перемещений твердой и жидкой фаз основания, а также перемещений покрытия. Получены интегральные характеристики поля давлений в водном слое, обращение трансформант произведено численно с использованием теории вычетов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и КНФ в рамках проекта № 24-21-20032.

Литература

1. V.A. Babeshko, O.V. Evdokimova, O.M. Babeshko // Doklady Physics, 63:10 2018. 402–406.
2. В.М. Сеймов, А.Н. Трофимчук, О.А. Савицкий // Колебания и волны в слоистых средах. 1990. 224 с.
3. Л.А. Молотков // Исследование распространения волн в пористых и трещиноватых средах на основе эффективных моделей Био и слоистых сред. 2001. 248 с.
4. О.А. Беляк, Т.В. Суворова, Е.А. Усошина // Экологический вестник научных центров ЧЭС, 1 2014. 93 – 99.
5. А.Л. Игумнов, А.Н. Петров // Вестник ПНИПУ. Механика, 3 2016. 47 – 61.

О СТАЦИОНАРНЫХ МНОЖЕСТВАХ В ЗАДАЧЕ О КАЧЕНИИ ШАРА С МНОГОСВЯЗНОЙ ПОЛОСТЬЮ ЗАПОЛНЕННОЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Иртегов В.Д., Титоренко Т.Н.

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск,
Россия
titor@icc.ru*

Рассматривается задача о движении без скольжения шара по неподвижной горизонтальной плоскости под действием силы тяжести. Шар содержит многосвязную полость, целиком заполненную однородной идеальной несжимаемой жидкостью, совершающей безвихревое движение. Уравнения движения системы

имеют вид [1]:

$$A_1 \dot{\omega}_1 + (A_3 - A_2) \omega_2 \omega_3 + A_3 \Omega_3 \omega_2 - A_2 \Omega_2 \omega_3 = \gamma_1 \omega_n, \quad \dot{\gamma}_1 = \omega_3 \gamma_2 - \omega_2 \gamma_3 \{1 \ 2 \ 3\}, \quad (\omega_n = \dot{\omega}_1 \gamma_1 + \dot{\omega}_2 \gamma_2 + \dot{\omega}_3 \gamma_3) \quad (1)$$

Остальные получаются из приведенных с помощью круговой перестановки индексов, указанных в фигурных скобках. Здесь $A_i = A_{*i} / (m \rho^2) \mp \Omega_i = k / (A_i + m^2)$ ($i = 1, 2, 3$) – сумма масс твердого тела и жидкости, ρ – радиус шара, A_{*i} ($i = 1, 2, 3$) – момент инерции шара, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ – вектор угловой скорости тела, $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ – единичный вектор, направленный по вертикали вверх, $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3)$ – вектор момента количества циклического движения жидкости.

Система (1) допускает следующие первые интегралы

$$E = A_1 \omega_1^2 + A_2 \omega_2^2 + A_3 \omega_3^2 - \bar{\omega}_n^2 = const, \quad (\bar{\omega}_n = \omega_1 \gamma_1 + \omega_2 \gamma_2 + \omega_3 \gamma_3)$$

$$V_1 = [A_1(\omega_1 + \Omega_1) - \bar{\omega}_n \gamma_1]^2 + [A_2(\omega_2 + \Omega_2) - \bar{\omega}_n \gamma_2]^2 + [A_3(\omega_3 + \Omega_3) - \bar{\omega}_n \gamma_3]^2 = const,$$

$$V_2 = A_1(\omega_1 + \Omega_1) \gamma_1 + A_2(\omega_2 + \Omega_2) \gamma_2 + A_3(\omega_3 + \Omega_3) \gamma_3 = const, \quad V_3 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1$$

и является вполне интегрируемой.

Методом Рауса-Ляпунова [2] проводится качественный анализ уравнений (1): из необходимых условий экстремума первых интегралов задачи находятся стационарные инвариантные множества различной размерности и исследуется их устойчивость по Ляпунову. Указанным методом найдены семейства стационарных решений (нульмерные множества), соответствующие положению равновесия и перманентным вращениям исследуемой системы, и стационарные инвариантные многообразия (множества положительной размерности), которым эти решения принадлежат. Для ряда решений получены достаточные условия устойчивости и сопоставлены с необходимыми.

Рассмотрен также случай, когда на исследуемую систему кроме силы тяжести и реакции плоскости действуют силы с потенциалом $U = b_1 \delta_1 + b_2 \delta_2 + b_3 \delta_3$ ($b_i = const$). Такими силами могут быть, например, однородное магнитное или электрическое поле, $\boldsymbol{\delta} = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ – направляющий вектор этого поля. Уравнения движения в данном случае записываются так:

$$A_1 \dot{\omega}_1 + (A_3 - A_2) \omega_2 \omega_3 + A_3 \Omega_3 \omega_2 - A_2 \Omega_2 \omega_3 = \gamma_1 \omega_n + M_{Q_1}, \quad \dot{\gamma}_1 = \omega_3 \gamma_2 - \omega_2 \gamma_3, \quad \dot{\delta}_1 = \omega_3 \delta_2 - \omega_2 \delta_3 \{1 \ 2 \ 3\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{M}_Q = \boldsymbol{\delta} \times \partial U / \partial \boldsymbol{\delta}$ – вектор момента сил.

Первые интегралы уравнений (2):

$$2\bar{E} = A_1 \omega_1^2 + A_2 \omega_2^2 + A_3 \omega_3^2 - \bar{\omega}_n^2 + 2U = const, \quad \bar{V}_1 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1,$$

$$\bar{V}_2 = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 = 1, \quad \bar{V}_3 = \gamma_1 \delta_1 + \gamma_2 \delta_2 + \gamma_3 \delta_3 = const.$$

Система (2) является неинтегрируемой. Здесь получены стационарные инвариантные многообразия, соответствующие движениям маятникового типа.

Литература

1. А. П. Маркеев // Об интегрируемости задачи о качении шара с многосвязной полостью, заполненной идеальной жидкостью. МТТ, 21:1 1986. 64–65
2. А. М. Ляпунов // О постоянных винтовых движениях твердого тела в жидкости. Собр. соч. 1 1954. 276–319

ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ ПРИТЯЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ КАПИЦЫ ДЛЯ ДЕФОРМИРУЕМОГО МАЯТНИКА НА ШАРНИРНОЙ ОПОРЕ

Товстик Т.П.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
tovstik_t@mail.ru

Задача о стабилизации верхнего положения перевёрнутого маятника под действием вибрации основания со времён работ П.Л. Капицы [1] стала классической. Уравнения маятника Капицы и их обобщения

находят практическое применение в задачах преодоления потенциальных барьеров при помощи вибрации, а также при конструировании различных датчиков и в робототехнике.

Задача определения условий устойчивости верхнего положения равновесия и нахождения области притяжения устойчивого положения для недеформируемого маятника является классической. В данном докладе рассматривается модель упругого маятника в виде гибкого растяжимого стержня. В предположении малости амплитуды вибрации основания по отношению к длине маятника задача решается приближённо асимптотически [2] методом двухмасштабных разложений. В отличие от задач о движении маятника Капицы, решённых в предыдущих постановках [3], в данной работе отклонения шарнирно закреплённого маятника считаются конечными.

Учёт продольных и поперечных деформаций в задаче маятника Капицы актуален, так как весовая нагрузка на маятник в динамической задаче на порядок выше нагрузки от силы тяжести при отсутствии вибраций. Модель рассматриваемого маятника изображена на рисунке 1.

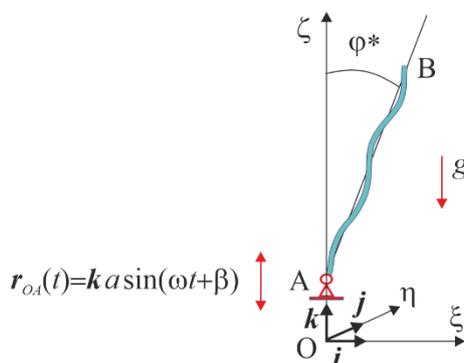


Рис. 1. Движение маятника Капицы с конечным углом отклонения.

Цель исследования – найти максимальный угол отклонения первоначально недеформированного маятника от вертикали, при котором медленные осреднённые движения маятника будут устойчивыми колебаниями около верхнего равновесного положения. В случае недеформируемого маятника значение этого угла известно. Наша задача найти поправку к данному значению в зависимости от упругих констант стержня маятника и параметров вибрации его основания.

Литература

1. П. Л. Капица // Маятник с вибрирующим подвесом, Успехи физических наук, 44:1 1951. 7–20.
2. Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский // Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний, М.: ФИЗМАТЛИТ, 1958. 408 с.
3. Т.П. Товстик, А.К. Беляев // Влияние резонансов продольных колебаний в задаче динамики обобщённого маятника Капицы, XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике, СПб. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, Т. 1. Общая и прикладная Механика, 2023. 448–451.

ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛЛА НА ЕГО АКУСТИЧЕСКУЮ АНИЗОТРОПИЮ

Третьяков Д.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
treyakov_da@spbstu.ru

Работа посвящена исследованию причин, вызывающих изменение акустической анизотропии в процессе монотонного и периодического одноосного нагружения металлических образцов. На примере стального и алюминиевого промышленного проката было показано, что параметр акустической анизотропии, вычисляемый посредством относительной разности скоростей ортогонально поляризованных поперечных волн, может быть использован в качестве количественной характеристики накопленной поврежденности металла.

Акустическая анизотропия используется в качестве одной из ключевых характеристик в ультразвуковой

тензометрии объектов железнодорожного транспорта (В.В. Муравьев и др.), при исследовании текстуры проката (В.В. Мишакин, А.В. Гончар и др.) и определении напряженно-деформированного состояния (А.А. Хлыбов, А.Л. Углов и др.), в том числе при решении обратных задач его реконструкции (А.О. Ватуляян и др.). Он был введен в оборот благодаря работам Н.Е. Никитиной, внесшей большой вклад в разработку ультразвукового метода акустоупругости, наряду с методами тензометрии позволяющего оценивать величину осредненных по толщине конструкции одноосных и двухосных механических напряжений [1].

В работе [2] В.И. Ерофеевым был предложен вид скалярной функции поврежденности, зависящей от акустических характеристик среды. В то же время, для описания деградации механических свойств и наведенной микротрещинами акустической анизотропии образцов из проката, которые характеризуются начальной анизотропией свойств по объему и ее неоднородным распределением по площади, использования скалярной функции поврежденности оказывается недостаточно. Часть трещин в них ориентирована вдоль направления проката, в то время как другая, возникающая при одноосной деформации, ортогональна направлению растягивающей силы. Для описания изменения акустической анизотропии ультразвуковых волн вследствие роста числа дефектов был рассмотрен случай ортотропной поврежденности образцов, вырезанных вдоль и поперек направления проката. Для получения соотношений, связывающих скорости ультразвуковых волн и их акустическую анизотропию в начальном (неповрежденном) и текущем (поврежденном) состоянии металла с величиной главных компонент тензора поврежденности второго ранга были использованы модели континуальной механики повреждений [3].

Применение соотношений акустоповрежденности выявило, что в случае стального и алюминиевого проката вклад компонент поврежденности на порядок превышает вклад пластических деформаций в величину суммарной акустической анизотропии металла. Основная доля наводимой повреждениями дополнительной анизотропии локализована в поверхностном слое металла толщиной 50-100 мкм в стальных и 250-300 мкм в алюминиевых образцах. Снижение влияния поврежденности на результаты ультразвуковой тензометрии может быть обеспечено за счет удаления тонкого поверхностного слоя путем ручной или машинной шлифовки, не оказывающей существенного эффекта на несущую способность исследуемой конструкции.

Результаты исследований могут быть использованы для диагностики накопленной поврежденности при ультразвуковом неразрушающем контроле деталей машин, узлов и элементов конструкций из проката.

Исследование выполнено при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Литература

1. Н. Е. Никитина // Акустоупругость. Опыт практического применения. 2005. 208 с.
2. В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина, П. А. Хазов // Влияние поврежденности материала на эволюцию акустической волны, Приволжский научный журнал, 2 2015. 32-41.
3. А. С. Семенов, В. А. Полянский, Л. В. Штукин, Д. А. Третьяков // Влияние поврежденности поверхностного слоя на акустическую анизотропию, Прикладная механика и техническая физика, 59:6 2018. 201-210.

БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОУПРУГОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК

Трунова И.Н.¹, Кузькин В.А.^{2,1}

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

ioanna.trunova@yandex.ru

Работа посвящена термоупругости нелинейной цепочки при задании начального теплового возмущения. Эволюция температуры описывается уравнением баллистической теплопроводности. Получено фундаментальное и общее решение, проведено сравнение с аналогичными решениями при теплопроводности Фурье. Рассмотрены два типа начальных распределений температуры: ступенчатое и синусоидальное.

Решение задачи для ступенчатого начального распределения приводит к неожиданному результату: на фронте волны возникают бесконечные деформации. Для объяснения этого эффекта решается две дополнительные задачи. Первая из них заключается в том, чтобы учесть дискретность среды хотя бы при описании температуры, и вместо уравнения баллистической теплопроводности использовать точное дискретное

решение для температуры, полученное при точном решении уравнения динамики цепочки. Такой путь действительно приводит к ограниченным деформациям, но не дает хорошего совпадения с результатами численного эксперимента. Другая задача предполагает рассмотрение не ступенчатого, а более физического кусочно-линейного начального поля температур, которое при увеличении наклона линейного участка стремится к ступеньке. При любом конечном наклоне такой подход дает конечные деформации. Показано, что с уменьшением начального градиента температур увеличивается точность совпадения с аналитическим решением.

Для начальной температуры в виде синуса с огибающей получено приближенное решение, показывающее, что возникающее поле перемещений представляет собой две волны с растущей амплитудой, которые бегут в разные стороны, а по форме повторяют начальное температурное поле. Показано, что в этом случае наблюдается баллистический резонанс (рост амплитуды механических колебаний в области начального возмущения).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00338.

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ/ПЬЕЗОМАГНИТНОЙ ПЛАСТИНЫ НА ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ SH-ПАВ

Белянкова Т.И.¹, Ворович Е.И.², Турчин А.С.¹

1 - Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

2 - Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
prottei@yandex.ru

Широко используемые в настоящее время магнитоэлектрострунги материалы представляют собой класс многофункциональных композитов, которые состоят из пьезоэлектрической (ПЭ) и пьезомагнитной (ПМ) фаз. В настоящее время при формировании интеллектуальных структур с желаемыми или новыми свойствами помимо матричного подхода, в котором в матрице пьезоэлектрического материала расположены включения пьезомагнитного материала или наоборот, успешно используются слоистые ПЭ/ПМ структуры. Следует отметить, что в отличие от «матричных» магнитоэлектрострунги материалов, слоистые двухфазные структуры обладают своими уникальными свойствами. Использование магнитоэлектрострунги материалов в современных устройствах микро- и нано- электроники, в приложениях методов неразрушающего контроля, количественной ультразвуковой и лазерной ультразвуковой диагностики, акустической микроскопии объясняют необходимость создания адекватных, легко верифицируемых моделей и методов исследования особенностей распространения акустических волн в композитах и различного рода слоистых структурах и конструкциях. Несмотря на хорошую изученность волновых процессов в слоистых структурах, большой интерес в последнее время приобретает понимание дисперсионных характеристик SH-волн в двухфазных ПЭ-ПМ системах. Следует отметить, что большинство современных работ по исследованию влияния различных факторов на особенности распространения SH-волн в двухфазных ПЭ/ПМ пластинах приводят результаты в зависимости от безразмерного волнового числа. Такой подход не дает полного представления о дисперсионных свойствах пластины, частотной зависимости фазовых скоростей, влиянии характера электромагнитных граничных условий, толщины и свойств материалов на сдвиг резонансных частот, изменение частотной зависимости скоростей SH-волн.

Настоящая работа направлена на исследование особенностей дисперсионных свойств полубесконечной двухслойной ПЭ/ПМ пластины и влияния размерных параметров ПЭ и ПМ слоев на изменение частотной зависимости скоростей SH-ПАВ и коэффициента электромагнитомеханической связи (КЭММС). В рамках квазистатического приближения рассматривается движение составной магнитоэлектрострунги пластины из ПЭ и ПМ слоев. Предполагается, что материалы пластины имеют симметрию класса $6mm$, оси симметрии и поляризации направлены вдоль оси x_3 . На границе раздела слоев выполнены условия сцепления, на внешних поверхностях полагается свободный контакт с вакуумом и отсутствие механические напряжения. В зависимости от характера задания на внешних поверхностях электромагнитных условий рассмотрены четыре типа задач. Распространение волн вызвано действием удаленного источника гармонических колебаний, режим колебаний полагается установившимся. Исходные системы дифференциальных уравнений в частных производных рассматриваемых задач с использованием интегрального преобразования Фурье сводятся к системам обыкновенных дифференциальных уравнений, решение которых строится традиционным образом в

виде разложения по совокупности экспонент. Получены удобные для программной реализации матричные дисперсионные уравнения. На основе их решения для пластин $PZT-S61/CoFe_2O_4$ и $PZT-5H/CoFe_2O_4$ с сильными и более слабыми пьезоэлектрическими и диэлектрическими характеристиками исследованы особенности влияния размерных параметров ПЭ и ПМ составляющих пластины на изменение скоростей SH-волн и КЭММС в широком диапазоне частот. Установлено качественное различие в трансформации фазовых и групповых скоростей ПАВ при уменьшении толщины одного из слоев составной двухфазной пластины и переходе к однородной ПЭ или ПМ пластине. Установлено влияние пьезоэлектрических свойств ПЭ составляющей пластины на характер такой трансформации. Полученные результаты приведены в безразмерных параметрах и могут представлять значительный интерес для оптимизации структуры новых материалов при разработке и проектировании микро- и наноразмерных приборов и устройств на SH-ПАВ с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-29-00773.

ОБ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ИНДУКЦИОННОГО БЕСКОНТАКТНОГО ПОДВЕСА

Удалов П.П.¹, Лукин А.В.¹, Попов И.А.¹, Штукин Л.В.¹, Полеткин К.В.²

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

2 - Технологический университет Хэфэя, КНР

pp_udalov@mail.ru

В работе рассматривается модель одномерных движений инерционной массы (ИМ) в форме прямоугольного кольца в электромагнитном поле двух круговых прямоугольных катушек индуктивности. На основе асимптотического метода нелинейной механики приводится оценка динамического отклика системы на внешнее электромагнитное воздействие. Исследованы условия на устойчивость высоты левитации искомой модели. Получены новые условия для устойчивости одномерных колебаний ИМ в форме прямоугольного кольца в поле двух круговых прямоугольных катушек индуктивности.

Электромагнитный подвес - устройство, работающее на основе принципа электромагнитной левитации [1] и уравнивающее силы тяжести ИМ пондеромоторными силами [2]. Это позволяет наблюдать ненулевую величину положения равновесия ИМ без явного контакта с неподвижными частями устройства [1], что приводит к высокой надежности, стабильности и большему времени безотказной работы. ИМ электромагнитного подвеса выполнена в форме простейшего геометрического объекта (диск, кольцо, прямоугольная рамка, сфера), и изготовлена из проводящего материала. Создавая переменное электромагнитное поле системой катушек, в ИМ наводятся токи, при взаимодействии которых возможно наблюдать левитацию ИМ [3].

Основная цель настоящего исследования заключается в аналитическом исследовании динамики ИМ, выполненной в форме прямоугольного кольца, в поле двух круговых катушек индуктивности в предположении о том, что высота левитации является медленно меняющейся во времени. Для линеаризованной модели ИМ вблизи положения равновесия исследуется эффект параметрического резонанса. Строится единая область устойчивости в пространстве состояний.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10009, <https://rscf.ru/project/21-71-10009/>.

Литература

1. Maxwell J.C. An elementary treatise on electricity. Oxford: The Clarendon Press, 1888, 208 p.
2. Ландау~Л.~Д., Лифшиц~Е.~М. Теория поля. М.,~Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1941. 510 с.
3. Nan H. S., Kim D. S. Magnetic levitation: Maglev Technology and Applications. Dordrecht: Springer Dordrecht, 2016. 247 p.

К КРИТЕРИЯМ ВЫБОРА СОЧЕТАНИЯ НАГРУЗОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ

Сабилова О.С.¹, Уздин А.М.¹, Федорова М.Ю.²

1 - *Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I, Санкт-Петербург, Россия*

2 - *Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия*
mgfed@mail.ru

Как правило, современная конструкция подвергается большому числу воздействий, носящих случайный характер. Поэтому первая основная задача при проектировании конструкции – определение наиболее опасных сочетаний нагрузок, приводящих к ее отказу, – задача теории предельных состояний. Ее формальная постановка принадлежит Р.А. Ржаницыну [1], который указал на то, что общая вариабельность совокупности приложенных нагрузок представляет собой корень из суммы квадратов вариабельностей, и уменьшается с увеличением их числа, то есть надежность системы увеличивается.

Критерием выбора опасной нагрузки является минимально возможное значение нагрузки, которое превышает с заданной вероятностью ε :

$$P(X > x_0) = \varepsilon \quad (1)$$

При учете нескольких воздействий критериев выбора целевой функции становится больше, а однозначное решение отсутствует. В работе рассматриваются четыре традиционных [2], и один новый, предлагаемый А.М.Уздиным, метод:

1. суммирование расчетных нагрузок, как независимых случайных величин, по Р.А. Ржаницыну;
2. выбор наиболее опасной из множества равновероятных пар нагрузок;
3. задание суммарного действия нагрузок с заданной вероятностью превышения;
4. метод Туркстры;
5. метод назначения опасной пары по условию ограничения риска (ущерба).

Методом 1) проведено исследование двух случайных нагрузок по экспоненциальному и нормальному законам с математическим ожиданием $\mu=4$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma=4$. Задаваясь $\varepsilon=0,1$, по формуле (1) для первой получим $x=9,2$, для второй $y=9,12$, по формуле Р.А.Ржаницына

$$S = \sqrt{9.2^2 + 9.12^2} = 12,95$$

Методы 2) и 3) исследованы в статье [3]. Эту работу следует дополнить следующим рассуждением. Оба метода строятся на вероятности появления пары двух статистически независимых нагрузок:

$$P(X > x, Y > y) = P(X > x)P(Y > y) = P_x(x)P_y(y) = \varepsilon \quad (2)$$

и выражения, учитывающего факт их совместного действия:

$$P(X + Y > s) = \beta \quad (3)$$

В методе 2) задается вероятность (2), оптимизация производится по условию (3), сформулированному как $x + y = s \rightarrow \max$. В методе 3), наоборот, задается условие (3), оптимизация проводится по условию (2). Таким образом, эти методы представляют собой двойственные задачи на условный экстремум и должны приводить к одинаковому результату при надлежащем выборе вероятностей ε и β , в том числе, для равномерных распределений $2\varepsilon = \beta$.

В методе Туркстры ниже рассмотрены два случая: сумма расчетной величины первой нагрузки и наиболее вероятное значение второй, и наоборот, наиболее вероятное значение первой и расчетное значение второй. Для вышеприведенных значений в первом случае получаем $9,2+4=13,2$ и $9,12+4=13,12$ – во втором.

И последний из рассмотренных способов назначает сочетания с точки зрения минимизации затрат на строительство и эксплуатацию. Для реализации такого метода необходимо задать платежные матрицы, определяющие возможный ущерб сооружению от величины нагрузки и степени усиления объекта.

Выводы. Задача сочетания нескольких нагрузок в принципе не имеет однозначного решения. Выбор того или иного расчетного сочетания зависит от принятой целевой функции. В статье показано совпадение 2) и 3) методов при надлежащем задании вероятностей.

Литература

1. Ржаницын А. Р. // Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.
2. Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. // Расчетные сочетания нагрузок для проверки надежности конструкций (обзор). Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Вип. 15, 2015 р., 4-44.
3. Сабирова О.Б., Сорокина Г.В., Уздин А.М., Федорова М.Ю. // Способы сочетания нагрузок при проектировании сейсмостойких сооружений. М. «Строительная механика и расчет сооружений» №6(305) 2022г., .40-47.

КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЗАДАЧАХ О ДЕФОРМИРОВАНИИ ТОНКИХ ПЛАСТИН

Устинов К.Б., Гандилян Д.В.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

ustinov@ipmnet.ru

Моделирование процесса деформирования тонкостенных элементов удобно осуществлять в приближении двумерных либо одномерных моделей: пластин, оболочек, балок. В качестве граничных условий обычно используется условие жесткой заделки, интуитивно оправданное «массивностью» тел, с которыми сопрягаются рассматриваемые тонкостенные элементы. Однако, более строгим является условия упругой заделки, т.е. связь компонент смещения средней плоскости и углов поворота с продольными и поперечными усилиями и изгибающими моментами посредством матрицы податливости [1-7]. Граничное условие жесткой заделки может рассматриваться как предельный случай.

В представленном докладе рассматривается деформирование тонкого слоя, сцепленного с массивным основанием. Задачи такого типа встречаются при идентификации экспериментально определяемых параметров ультратонких элементов МЭМС, используемых в проекционных литографических системах [8], а также в задачах, связанных с отслоением покрытий [4].

Целью доклада является демонстрация важности влияния упругости заделки на упругий отклик тонкостенных конструкций. Получены решения задачи о деформировании круглой пластины с граничными условиями типа упругой заделки в постановке линейной теории пластин, теории мембран в приближении однородности продольных усилий и теории Фешля - фон Кармана, также в приближении предположения однородности продольных усилий. Полученные численные значения соответствуют алюминиевой пластине на кремниевом основании. Проведено сравнение величин прогибов и изгибающих моментов, посчитанных для условий жесткой и упругой заделки и продемонстрировано, что влияние податливости заделки возрастает с увеличением прогиба и становится весьма существенным для прогибов, превышающих несколько толщин пластины.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-19-00866 (для КБУ).

Литература

1. F. Vogt // Uber Die Berechnung der Fundament Deformation, Avhandlingar utgittav Det Norske Videnskaps , Akademi I Oslo, I Math-Naturv , Klasse, No. 2. 1925.
2. А.С. Вольмир // Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984с
3. B., Cotterell, Z. // Chen Buckling and cracking of thin film on compliant substrates under compression // Int. J. Fract., 104:2 2000. 169–179.
4. H.-H. Yu, J.W. Hutchinson // Influence of substrate compliance on buckling delamination of thin films // Int. J. Fract. 113. 2002. 39-55.
5. M. Andrews, R. Massabò // The effects of shear and near tip deformations on energy release rate and mode mixity of edge-cracked orthotropic layers // Eng. Fract. Mech. 74:17, 2007. 2700–2720.
6. K.B. Ustinov // On separation of a layer from the half-plane: elastic fixation conditions for a plate equivalent to the layer // Mech. Solids 50:1 2015. 62–80
7. K. Ustinov, R. Massabò // On elastic clamping boundary conditions in plate models describing detaching bilayers // Int. J. Solids Struct. 248. 2022. 111600.
8. Y. Vladimirovsky, A. Bourdillon et al. // Demagnification in proximity X-ray lithography and extensibility to 25 nm by optimizing Fresnel diffraction // J. Phys. D: Appl. Phys. 32. 1999. L114–L118.

О СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСЛОВИЯ РАЗРУШЕНИЯ В ПЛОСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ С ТРЕЩИНОЙ

Уткин А.А.^{1,2}

1 - *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
2 - *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
a.utkin51@gmail.com

Рассматривается упругая динамическая задача с полубесконечным разрезом в плоской постановке. Упругая среда характеризуется модулем сдвига μ и скоростями продольных и поперечных волн c_1 и c_2 соответственно и имеет полубесконечный разрез $y=0, x \leq 0$. При $t < 0$ упругая среда свободна от напряжений. К берегам разреза в момент времени $t=0$ прикладывается импульс напряжений с постоянной амплитудой P . Принято считать, что в задачах теории упругости значение коэффициента интенсивности напряжений определяет напряженно-деформированное состояние в окрестности кончика трещины, как в динамических задачах, так и статике. Значения этого коэффициента, как правило, и используются при оценке разрушения. Однако более тщательное исследование показывает, что анализ поля напряжений только при помощи коэффициента интенсивности в динамических задачах не всегда приводит к правильному результату. Влияние последующих членов разложения на интенсивность напряжений в окрестности кончика трещины было изучено в [1]. Показано, что второй член разложения (имеет порядок $O(1)$) может оказать существенный вклад (до 100% и более) в интенсивность напряжений в начальные времена воздействия. Последующие члены (порядок $O(\sqrt{x})$ и более) уже не вносят существенного вклада и ими можно пренебречь. Таким образом, далее в качестве точного решения будет рассмотрено два первых члена разложения. Напряжение на продолжении разреза в этом случае примет вид [1]

$$\sigma_y = P \cdot \frac{2\sqrt{2}\sqrt{c_1}\gamma\sqrt{1-\gamma^2}}{\pi} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{x}} - PH(c_1t - x) + O\left[\left(\frac{x}{c_1t}\right)^{1/2}\right]$$

где $\gamma = c_1/c_2$, $H(t)$ – функция Хевисайда.

Применение структурно-временного подхода при кратковременных воздействиях позволяет объяснить многие наблюдаемые в опытах эффекты (см., например, [2]). Анализ разрушения будет проведен при помощи структурно-временного подхода. Критерий разрушения имеет вид

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{d} \int_r^{r+d} \sigma_y(s, x) dx ds \leq \sigma_c$$

Параметры σ_c , τ и d являются константами материала и не зависят от формы и продолжительности воздействия. Предполагается, что в точке с координатой r условие разрушения наступает в момент нарушения критерия соотношения.

Были проведены соответствующие расчеты. По заданной амплитуде воздействия определялась скорость продвижения условия разрушения на продолжении трещины в зависимости от координаты. Установлено, что скорость с увеличением значения координаты до нескольких d растет, а затем стабилизируется.

Работа выполнена при поддержке мега гранта 075-15-2022-1114

Литература

1. Петров Ю.В., Уткин А.А. Асимптотика напряжений у вершины трещины в динамических задачах теории упругости. ИПМаш РАН СПб: 2001. - 40 с.
2. Петров Ю.В., Уткин А.А. // ФХММ. № 2. 1989. С. 38-42.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕРМОУПРУГОМ СЛОЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Федотенков Г.В.^{1,2}, Фан Т.Ш.¹

1 - *Московский авиационный институт, Россия*

2 - *МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия*

phantungson49@gmail.com

Рассматриваются нестационарные начально-краевые задачи для упругого и теплопроводного слоя конечной толщины. Математическая постановка задач включает уравнение нестационарных колебаний или уравнение нестационарной теплопроводности, начальные и граничные условия. Рассматриваются несколько типов граничных условий, как для упругого, так и для теплопроводного слоя. Также исследуются задачи о воздействии нестационарных массовых сил и внутренних источников тепла в слое.

Для решения поставленных задачи применяются два подхода. Первый (классический) подход основан на использовании метода разложений в ряды Фурье по системам собственных функций. В результате решение строится аналитически в виде ряда Фурье [1,2]. Для построения и графического анализа результатов ограничиваемся конечным числом членов ряда Фурье. Дополнительно исследуется практическая сходимость по числу удерживаемых членов ряда. Второй подход к решению основан на перспективных новых технологиях глубокого машинного обучения с использованием нейронных сетей с физическим подкреплением (физически информированных нейронных сетей) [3]. В этом случае решение задачи разыскивается в виде многослойной искусственной нейронной сети. Для обучения этой сети используется множество точек коллокации в качестве входных данных. Процесс обучения физически информированной нейронной сети является разновидностью методов обучения «с учителем». При этом в качестве «учителя» выступает сама математическая постановка задачи. Таким образом, исходная задача формулируется в виде задачи математической оптимизации, состоящей в поиске минимума функционала потерь. Функционал потерь является суммой невязок (среднеквадратических отклонений) уравнения, начальных и граничных условий в точках коллокации. Само множество точек коллокации представляет собой дискретную бессеточную аппроксимацию пространственно-временной области, на которой разыскивается решение. Невязки уравнений, начальных и граничных условий вычисляются через выходные значения нейронной сети и их производные в точках коллокации. Для вычисления производных используются алгоритмы автоматического дифференцирования на вычислительных графах. Поиск минимума функционала потерь осуществляется с применением алгоритмов, основанных на методе стохастического градиентного спуска. Таким образом, алгоритм решения начально-краевых задач математической физики с использованием технологий физически информированных нейронных сетей можно рассматривать как новую разновидность бессеточных методов.

В результате получены решения ряда начально-краевых задач для упругого и теплопроводного слоя аналитическими и численными методами. Проведено сравнение полученных результатов, которое показало, что использование нейронных сетей в качестве аппроксимаций искомых функций позволяет получить решение поставленных задач с заданной наперед точностью. Показано, что новые методы решения физико-математических задач с применением элементов искусственного интеллекта имеют перспективы для дальнейшего развития.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00389, <https://rscf.ru/project/23-29-00389/>.

Литература

1. Вестяк В.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Математические основы термоупругости: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2021 – 92 с.: ил. ISBN 978-5-4316-0789-9.
2. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Одномерные нестационарные задачи термоупругости: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2023 – 96 с.: ил. ISBN 978-5-4316-1048-6.
3. Cuomo, S., Di Cola, V.S., Giampaolo, F. et al. Scientific Machine Learning Through Physics-Informed Neural Networks: Where we are and What's Next. // J Sci Comput 92, 88 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10915-022-01939-z>.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МОМЕНТНЫХ УПРУГИХ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Рязанцева М.Ю.¹, Тарлаковский Д.В.^{1,2}, Фарманян А.Ж.¹

1 - НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

2 - Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия

anafarmanyam@mail.ru

С использованием полученных в [1] уравнений движения тонких моментных упругих оболочек постоянной толщины с произвольной срединной поверхностью построены соответствующие уравнения для изотропной моментной круговой цилиндрической оболочки радиуса R в усилиях и «перемещениях» (кинематических параметрах). При этом используется метрика срединной поверхности с параметрами – продольной и угловой составляющими стандартной цилиндрической системы координат.

В результате получены двенадцать уравнений движения в усилиях и соответствующие физические соотношения. Отмечено, что они с точностью до некоторых обозначений совпадают с соответствующими соотношениями для оболочки типа Тимошенко [2].

Подстановка физических соотношений в уравнения движения в усилиях приводит к системе из двенадцати уравнений движения в кинематических параметрах. Они записаны в операторном виде. При этом коэффициенты операторов в частных производных упрощаются за счет пренебрежения слагаемыми, имеющими более высокий порядок малости относительно толщины оболочки. Показано, что в частном случае отсюда следуют уравнения для оболочки типа Тимошенко.

Для круговой упругой моментной цилиндрической оболочки, ограниченной торцевыми сечениями, приведены все возможные граничные условия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-19-00217).

Литература

1. Quoc Chien Mai, M.Yu. Ryazantseva, D.V. Tarlakovskii Generalized Linear Model of Dynamics of Elastic Moment Shells // *Advanced Structured Materials*, V.186. Deformation and Destruction of Materials and Structures Under Quasi-static and Impulse Loading. Springer Nature Switzerland AG. 2020. P. 159 – 171.
2. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. М.: Физматлит, 2004. – 472 с.

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА НА ХАРАКТЕР ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТИ СОСУДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Федоренко Р.В., Лукин А.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет, Россия

fedorenko_rv@spbstu.ru

Активное развитие энергетической отрасли с середины XX века поставило перед научным сообществом множество нетривиальных задач. Одна из таких задач заключается в необходимости оценки циклической прочности металлоконструкций, которые в силу особенности условий эксплуатации не могут работать в упругой зоне деформирования материалов. Примером подобной конструкции может служить центральная оболочка реактора на быстрых нейтронах, рабочая температура которого превышает 400°C . Многие исследования [1-4] показывают, что совместное силовое и термоциклическое нагружения могут приводить к инкрементальному накоплению пластических деформаций, способные вызвать макроскопическое формоизменение и разрушение элементов конструкций.

Большинство исследований по данной теме, основанных как на аналитических, так и численных подходах, ограничиваются рассмотрением идеально-пластических материалов или материалов с изотропным упрочнением, тогда как при циклическом нагружении в металлах, как правило, реализуется механизм комбинированного изотропно-кинематического упрочнения. Такой механизм позволяет учитывать эффект

Баушингера и позволяет точнее описывать циклическое упрочнение или разупрочнение материала [5].

В данной работе представлены результаты исследования влияния характера упрочнения (изотропное или смешанное) на характер приспособляемости сосуда под давлением при циклически меняющемся градиенте температуры по толщине стенки.

Исследование приспособляемости с учетом общего вида нелинейности диаграммы деформирования материала невозможно без использования численных методов. В статье [6] представлены результаты разработки численной процедуры с использованием программного средства Abaqus, верифицированной на базе ряда эталонных аналитических решений [1-4]. Развитие данной процедуры позволяет задать произвольные свойства материала, в том числе реальных конструкционных, с учетом особенностей их циклического поведения. Для задания комбинированного упрочнения используется модель Шабо (Chaboche), параметры которой для рассмотренной марки стали представлены в [7]. В результате реализации численной процедуры процедуры получены диаграммы приспособляемости сосуда под давлением для моделей изотропного и комбинированного (с учетом циклического упрочнения металла) упрочнения.

Литература

1. Bree J. Elastic-plastic behaviour of thin tubes subject to internal pressure and intermittent high-heat fluxes with application to fast nuclear reactor fuel elements. *Journal of Strain Analysis* 1967;2:226e38
2. Bradford R.A.W. The Bree problem with primary load cycling in-phase with the secondary load. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping* 2012; 99-100; 44-50.
3. Bradford R.A.W. The Bree problem with primary load cycling out-of-phase with the secondary load. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping* 2017; 154; 83-94.
4. M.C. Messner, T.-L. Sham, Y. Wang, N-bar problems as approximations to the bree problem. ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
5. Чернявский О.Ф., Чернявский А.О. Описание деформационных свойств материалов при расчетах малоциклового усталости. Вестник ЮрГУ, секция “Математика. Механика. Физика”, 2021, том 13, №3, с. 53-61.
6. Федоренко Р.В., Морозов Н.Ф., Лукин А.В. Численный метод анализа приспособляемости упруго-пластических тел при переменных нагрузках. *Композиты и Наноструктуры*, 2024, том 16, №1, с. 62-78.
7. Algarni M., Chai Y., Bai Y. A unified material model for multiaxial ductile fracture and extremely low cycle fatigue of Inconel 718. *International Journal of Fatigue*, 2017; 96; 162-177.

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ ЛАМИНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Федюшкин А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
fai@ipmnet.ru

Нелинейные свойства ламинарных течений могут существенно менять структуру течения и характеристики теплопереноса при изменении определённых параметров. В работе на основе численного решения задач естественной ламинарной конвекции несжимаемой вязкой жидкости для стационарных, квазистационарных и колебательных режимов течений показано формирование температурного и концентрационного расслоения с нелинейной зависимостью от интенсивности конвективного течения с образованием конвективных слоистых структур с противотоками. [1-3].

Показаны механизмы колебательной ламинарной тепловой и термо-концентрационной конвекции. Приводятся результаты о влиянии горизонтальных и вертикальных гармонических вибрационных воздействий на температурное и концентрационное расслоение и на структуру конвективного течения [4].

Нелинейные особенности конвективного течения могут иметь место и при отсутствии силы гравитации, но при наличии капиллярной конвекции. Например, в условиях невесомости в двухслойной системе «газ-жидкость» термокапиллярная конвекция может менять метастабильное положение межфазной границы на устойчивое энергетически выгодное положение. В работе показано, что при боковом нагреве двухслойной системы «воздух-вода» в квадратной области, граница раздела фаз, которая в начальный момент плоская и ортогональная нагреваемой стенке, за счет термокапиллярной конвекции метастабильна и при определённых условиях может резко поворачиваться на 90^0 , принимая устойчивое (энергетически выгодное) положение. Гравитационная конвекция в этом случае (даже при наличии капиллярной конвекции) обладает стабилизирующим фактором для горизонтального положения межфазной границы [5].

Приводятся результаты о вибрационном воздействии на структуру конвективного течения и толщину пограничных слоёв [6, 7].

Показаны два вибрационных способа симметризации асимметричных ламинарных стационарных течений вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре (обобщённая задача Джеффри-Гамеля) [8, 9].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-29-00101.

Литература

1. В. И. Полежаев, М.С. Белло, Н.А. Верезуб, и др. // Конвективные процессы в невесомости. -М., Наука, 1991. 240 с.
2. I. Fedyushkin // Stratification and segregation under laminar convection. Advanced Hydrodynamics Problems in Earth Sciences. Springer: Switzerland, 2023. P. 153–169.
3. А. И. Федюшкин // Влияние чисел Рэлея, Прандтля и граничных условий на конвективные течения жидкости в горизонтальных слоях. Математическое моделирование и численные методы. № 1. 2020. С. 28–44.
4. А. И. Федюшкин // Нелинейные свойства ламинарной конвекции. Сб. XIII Всерос. Съезд по теоретической и прикладной механике. Политех-Пресс, Санкт-Петербург, 2023. С. 253–256
5. I. Fedyushkin. // The effect of convection on the position of the free liquid surface under zero and terrestrial gravity // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1675. P. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012039.
6. Fedyushkin A.I. Heat and mass transfer during crystal growing by the Czochralski method with a submerged vibrator. 2019. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing (Bristol, UK, England), V. 1359, P. 012054 DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012054.
7. A.I. Fedyushkin, N. G. Burago, A.A. Puntus // Convective heat and mass transfer modeling under crystal growth by vertical Bridgman method // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1479. P. 012029.
8. А. И. Федюшкин, А. А. Гневушев, А. С. Захаров // Симметризация течения вязкой жидкости в плоском диффузоре. Мат-лы XXV Межд. конф. НеЗаТеГиУс. М.: Имех МГУ, 2024. С. 115–117.
9. A.I. Fedyushkin, A.A. Puntus // Symmetrisation of laminar flow of viscous fluid in a flat diffuser by periodic influence on the inlet flow velocity // E3S Web of Conferences. Vol. 446. 2023. P. 01001.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЁХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА И ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Матвеев В.П., Фёдоров А.Ю., Сероваев Г.С., Галкина Е.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
fedorov@icmm.ru

Определение упругих постоянных материалов играет важную роль при проектировании конструкций, способных выдерживать заданные эксплуатационные нагрузки. Для ряда конструкционных и природных материалов имеет место необходимость проведения испытаний как на растяжение, так и на сжатие, в силу различия механических характеристик при данных типах деформирования материала. Данная особенность носит название разномодульности (или бимодульности) материала.

В настоящей работе рассматривается методика определения упругих постоянных на основе результатов измерения деформаций прямоугольных призматических образцов при четырёхточечном изгибе (Рис. 1а), в котором в отличие от известных вариантов одновременно с модулями упругости определяются и коэффициенты Пуассона, а для измерения деформаций используются волоконно-оптические датчики. Использование этих датчиков обеспечивает простую конструктивную схему измерения продольных и поперечных деформаций в зонах сжатия и растяжения (Рис. 1б).

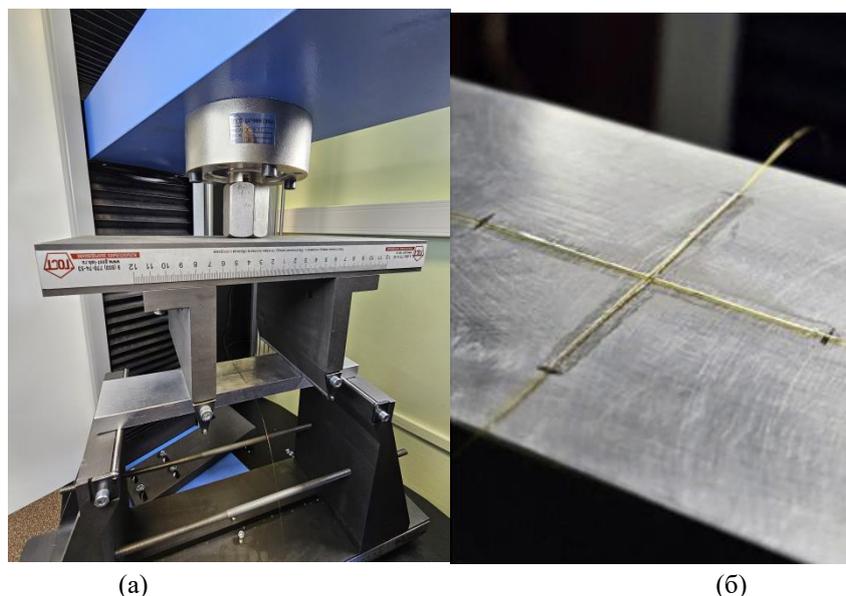


Рис. 1. Фотографии испытания образца в виде прямоугольной балки на четырёхточечный изгиб: общий вид (а); оптические волокна с датчиками на поверхности образца (б).

Приводятся новые результаты, обеспечивающие вычисление модулей упругости и коэффициентов Пуассона на основе измеренных деформаций, и оценки погрешностей определения упругих постоянных, обусловленных: использованием датчиков на брегговских решётках, погрешностью измерения деформаций, соответствием размеров образца допущениям, используемым при вычислении деформаций. Эффективность предлагаемого метода иллюстрируется результатами определения упругих постоянных различных материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-77-30008.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УПРУГОЙ ОБОЛОЧКИ С НЕОДНОРОДНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПУАССОНА. ОБОЛОЧЕЧНЫЕ МОДЫ

Филиппенко Г.В.

*Институт Проблем Машиностроения РАН (ИПМаш РАН), Россия
fgv@ipme.ru*

Цилиндрические оболочки – важный элемент конструкций в технике и строительстве, моделирующий различные трубопроводы, опоры и пр. Неоднородность упругих свойств таких оболочек вдоль радиальной координаты y может быть заложена изначально (например, многослойные оболочки), так возникнуть и в результате эксплуатации (износ, водородное охрупчивание и др.). Что может привести к преждевременному износу трубопроводов и авариям, например, вследствие выхода на опасные режимы колебаний. В работе рассматриваются оболочечные моды колебаний круговой цилиндрической оболочки. Они характеризуются изменением формы поперечного сечения (первоначально кругового кольца). Неоднородность может быть как кусочно-постоянной, так и непрерывно меняющейся функцией, как на всем промежутке, так и внутри слоев. Изложенные в литературе асимптотические подходы для учета изменения механических свойств оболочки по её толщине [1] слишком сложны для получения достаточно простых оценочных формул. Поэтому в данной работе усредненные параметры классической оболочки с неоднородностью материала рассчитываются по формулам, приведенным в [2], но с введением необходимых поправок. На основе этих поправок численно анализируется случай двуслойной оболочки, толщиной h , где коэффициент Пуассона ν кусочно-постоянный, а объемная плотность материала и модуль Юнга постоянные:

$$\nu = \nu(y) = \begin{cases} \nu_1, & -h/2 \leq y < 0 \\ \nu_2, & 0 \leq y \leq h/2 \end{cases}, \quad s = \nu_1 / \nu_*, \quad \nu_* = (\nu_1 + \nu_2) / 2..$$

Находятся собственные частоты оболочки f , как функции приведенного модуля Пуассона s (на рис. 1 изображена первая собственная частота третьей моды). Приведенные поправки позволяют отследить степень “асимметрии” (линия 2) модуля Пуассона относительно средней поверхности оболочки, в отличие от других, рассмотренных в работе, методов усреднения, которые дают линию 1.

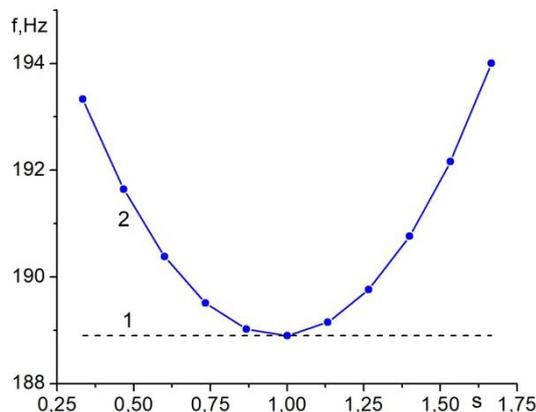


Рис. 1 Собственные частоты оболочки f , как функции приведенного модуля Пуассона s

Регистрационный номер госбюджетного задания: 124040800009-8. Номер учредителя: FFNF-2024-0009.

Литература

1. М. В. Вильде, Л. Ю. Коссович, Ю. В. Шевцова // Асимптотическое интегрирование динамических уравнений теории упругости для случая многослойной тонкой оболочки, Известия Саратовского Университета (N. S.), Серия Мат. Мех. Инф. 12: 2 2012. 56-64
2. Г. В. Филиппенко, Т. В. Зиновьева // Модальный анализ трубы, поврежденной водородом, как неоднородной по толщине оболочки, Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 3 2022. 170–182.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХФАЗНОМ ПОРИСТО-УПРУГОМ ГРУНТЕ, ПОДВЕРЖЕННОМ ИНФИЛЬТРАЦИИ

Фоменко С.И.

*Институт математики, механики и информатики, Кубанский государственный
университет, Краснодар, Россия
sfom@yandex.ru*

Примерами пористых, насыщенных газом и/или жидкостью, например, такие природные материалы как почвы и горные породы. Многие биологические ткани, например, кости, также являются пористыми с неоднородной пористостью. В целом, пористые среды представляют собой сложные многофазные композитные материалы. Изучение их свойств, восстановление физико-механических параметров грунтов по измеренным данным отклика среды на специальное воздействие представляет интерес в различных науках о Земле таких, как геология, сейсмология, экология, сельское хозяйство, а также в биомеханике и медицине. Так оценка пористости и уровня влаги в почве важно для прогноза и соответственно улучшения показателей урожайности сельскохозяйственных культур.

Процесс инфильтрации воды в порах грунта демонстрирует сложное нелинейное распределение воды в грунте по глубине, которое зависят от параметров гидравлических параметров среды, начального водонасыщения и времени инфильтрации. Моделирование распространения упругих волн в рассматриваемой пористой среде приводит к задаче для функционально-градиентного пористо-упругого полупространства.

Теоретическое исследование распространения упругих волн в насыщенных жидкостью пористых средах основано на краевой задаче для уравнения Био-Френкеля, где содержание воды при инфильтрации оценивается из решения нелинейного уравнения Ричардса, которое решается методом конечных элементов.

Решение для установившихся гармонических колебаний получено в интегральной форме относительно преобразования Фурье матрицы Грина многослойного полупространства и поверхностной нагрузки, возбуждающей колебания в среде [2]. Для построения матрицы Грина многослойного функционально-градиентного пористо-упругого полупространства разработан численный итерационный алгоритм [3]. Обсуждаются детали построения математической модели и результаты проведенного численного анализа влияния пористости и профиля входного водонасыщения на фазовые скорости поверхностных волн в пористом многослойном полупространстве, моделирующий многослойный грунт, в котором происходят медленные процессы фильтрации поровой жидкости, а также результаты исследования влияния испарения жидкости на волновые процессы [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZEN-2024-0003.

Литература

1. Biot M.A.. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. II. Higher-frequency range // J. Acoust. Soc. Am. – 1956. – V. 28. N. 2.– P. 168-178.
2. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Фоменко С.И. Влияние пористости на характеристики волн релеевского типа в многослойном полупространстве // Акустический журнал. – 2011.– Т. 57. № 2. – С. 234-245.
3. Fomenko S.I., Jana, R.B., Golub, M.V. Numerical Modeling of Elastic Wave Propagation in Porous Soils with Vertically Inhomogeneous Fluid Contents Due to Infiltration // Mathematics 2023, 11, 4131.
4. Fomenko S.I., Jana R.B The influence of water evaporation on surface acoustic waves in soils // 2023 Days on Diffraction (DD), St.Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4.

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ НА ДЛИТЕЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Фомин Л.В.¹, Далинкевич А.А.^{1,2}, Басалов Ю.Г.¹

1 - НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

2 - Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

fleonid1975@mail.ru

Актуальность исследований высокотемпературной прочности материалов и конструкций [1], в том числе, находящихся в условии воздействия активных сред [2, 3], не подлежит сомнению. Современные материалы и элементы конструкций должны обеспечивать надежность и работоспособность изделий, выполненных из них, в течение всего срока службы в рабочих условиях с учетом их взаимодействия с внешними и/или рабочими средами. Наиболее часто для дополнительной защиты элементов конструкций от деструктивного воздействия внешней активной среды применяются типовые элементы составного типа. Внешний слой такой составной конструкции, как правило, контактирует с агрессивным веществом и защищает основные элементы конструкции от его разрушительного воздействия.

Исследование основано на кинетической теории ползучести и длительной прочности Ю.Н. Работнова [1] с двумя структурными параметрами: поврежденность и концентрация элементов активной среды в материале. Определяются напряженно-деформированное состояние и время до разрушения в условиях ползучести составного растягиваемого стержня прямоугольного поперечного сечения, находящегося в активной среде. Стержень состоит из трех симметрично расположенных по ширине частей, соединенных идеальной адгезией без проскальзывания, длина стержня существенно превышает его ширину и толщину. Влияние активной среды рассматривается в двух вариантах: классический и неклассический диффузионные процессы [4]. В случае неклассического диффузионного процесса проникшее в материал активное вещество находится в двух состояниях: свободном и связанном. Процесс такой диффузии описывается модифицированным уравнением диффузии, учитывающим двухфазное состояние активного вещества в материале:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t}, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = \beta c - \alpha S, \quad c(z, 0) = S(z, 0) = 0$$

где c - концентрация свободной (мобильной) формы активной среды в единице объема (или на единицу массы) образца; S - концентрация связанной формы активной среды в единице объема (или на единицу массы) образца; $D = \text{const}$ - коэффициент диффузии; α, β - параметры диффузионной модели, z -

координата; t - время.

Получена система уравнений, моделирующая ползучесть составного стержня, в котором его части жестко без проскальзывания связаны между собой, а также включающая в себя кинетические уравнения накопления поврежденности в частях стержня. Учет влияния активной среды производится путем введения в указанные кинетические уравнения функции влияния активной среды – функции от интегрально средней концентрации. В зависимости от материальных параметров и параметров диффузионного процесса анализируются распределения напряжений и процессы накопления повреждений во времени в различных частях составного стержня. Проведены расчеты в двух указанных вариантах воздействия активной среды. Получены зависимости накопления поврежденности и распределения напряжений в частях стержня во времени. В результате определено, что разрушение составного стержня в классическом случае происходит раньше, чем в случае рассматриваемого неклассического диффузионного процесса

В исследовании наряду с применением степенной модели ползучести и длительного разрушения в работе рассматривается применение сингулярной дробно-степенной модели, в которую входит естественная механическая характеристика – предел кратковременной прочности материала при температуре испытания.

Литература

1. Ю.Н. Работнов // Ползучесть элементов конструкций. 1966. 752с.
2. А.М Локощенко. // Ползучесть и длительная прочность металлов.2016. 504 с.
3. Alexander Lokoshchenko and Leonid Fomin // Kinetic Theory of Creep and Long-Term Strength of Metals, in Kinetic Theory, George Z. Kyzas and Athanasios C. Mitropoulos IntechOpen, (December 20th 2017). DOI: 10.5772/intechopen.70768.
4. J. Crank // The Mathematics of diffusion. 2nd edition. 1975. 414 p.

СВЯЗАННЫЕ ЗАДАЧИ ХЕМОМЕХАНИКИ: КИНЕТИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

Фрейдin А.Б.

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Россия
alexander.freidin@gmail.com

Хемомеханика изучает взаимосвязи напряженно-деформированного состояния и химических реакций, протекающих в деформируемых твердых телах. Рассматривается реакция между твердым и диффундирующим компонентами. Реакция локализована на фронте реакции и сопровождается объемным расширением, которое порождает механические напряжения, которые зависят также от положения фронта реакции и, в свою очередь, влияют на скорость фронта реакции. К реакциям такого типа относятся, например, окисление и литизация кремния, важные для микроэлектроники, работы МЭМС и литий-ионных батарей (см., напр., [1,2]).

Обсуждается постановка связанной задачи химия-диффузия-механика. Кинетика фронта реакции описывается на основе концепции тензора химического сродства [3], нормальная компонента которого является конфигурационной силой, движущей фронт реакции (смотри также [4]). Приводятся примеры решения краевых задач хемомеханики. Демонстрируется, что механические напряжения могут ускорять, замедлять и блокировать распространение фронта реакции. Выделен случай реакции, которая может идти только при воздействии механических напряжений.

Затем описывается процедура анализа устойчивости распространяющегося фронта реакции [5,6]. Приводятся примеры аналитического и численного анализа устойчивости фронта. Детально исследуется конкуренция глобальной кинетики фронта реакции и кинетики роста его возмущений. На примере осесимметричной задачи хемомеханики продемонстрировано, что полость дестабилизирует фронт реакции. Показано, что с потерей устойчивости фронта превращения при приближении к состоянию блокирования могут быть связаны последующие интенсивные пластические деформации и разрушение.

Представленные результаты получены совместно с А. Морозовым и М. Полуэктовым.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема № 124041500009-8).

Литература

1. M.T. McDowell, S.W. Lee, W.D. Nix, Y. Cui // 25th anniversary article: Understanding the lithiation of silicon and other

- alloying anodes for lithium-ion batteries, *Advanced Materials*, 25(36), 2013, 4966–4984
2. Heidemeyer, H., Single, C., Zhou, F., Prins, F.E., Kern, D., Plies, E.: Self-limiting and pattern dependent oxidation of silicon dots fabricated on silicon-on-insulator material. *Journal of Applied Physics*, 87, 2000. 4580–4585
 3. A.B. Freidin // Chemical affinity tensor and stress-assist chemical reactions front propagation in solids. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids, 2013. V009T10A102
 4. A.B. Freidin, E.N. Vilchevskaya // Chemical affinity tensor in coupled problems of mechanochemistry. In: H. Altenbach, A. Öchsner (eds.) *Encyclopedia of Continuum Mechanics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2020
 5. A. Morozov, A.B. Freidin, W.H. Müller // On stress-affected propagation and stability of chemical reaction fronts in solids. *International Journal of Engineering Science*, 189, 2023, 103876
 6. A. Morozov, M. Poluektov, A.B. Freidin, L. Figiel, W.H. Müller // Stability of chemical reaction fronts in solids: Analytical and numerical approaches *European Journal of Mechanics. A/Solids*. 2024, 104, 105211

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЁТА НЕСУЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЫЛА В ДВУХФЮЗЕЛЯЖНОЙ СХЕМЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Фролов В.А.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
Россия
frolov_va_ssau@mail.ru*

В работе предложена модель расчёта несущих характеристик крыла применительно к двухфюзеляжной схеме летательного аппарата. Опираясь на работы автора [1-4], предлагаемый метод предусматривает решение задачи поперечного обтекания двух фюзеляжей круглого поперечного сечения в присутствии двух точечных вихрей. Используется 2D-модель потенциального течения идеального газа около двух симметрично расположенных цилиндров, которые являются поперечными сечениями двух фюзеляжей и двух симметричных вихрей, моделирующих концевые вихри от крыла. Циркуляции этих вихрей определяются по теореме Н.Е. Жуковского о подъёмной силе. Применяя теорию функции комплексного переменного, можно записать комплексный потенциал (КП) течения, который обеспечивает равенство нулю нормальной компоненты скорости на двух окружностях. В работе автора [4] представлен КП для течения около двух цилиндров в присутствии пары симметричных точечных вихрей. КП состоит из суммы трёх слагаемых: первое слагаемое представляет КП для невозмущённого поперечного потока и двух изолированных диполей, расположенных в центрах окружностей; второе слагаемое – КП, обеспечивающий непротекания окружностей при их совместном обтекании; третье слагаемое – КП для потока, формируемого парой симметричных точечных вихрей около двух цилиндров. Второй и третий КП записаны в виде бесконечных сходящихся рядов на основе теоремы отражения диполей и вихрей от окружностей. Производная от суммарного КП $d[W\Sigma(z)]/dz$ по комплексной переменной z определяет сопряжённую скорость. Выделяя мнимую часть со знаком минус, от сопряжённой скорости, будем иметь компоненту скорости вдоль оси ординат. На рис. 1 показаны синие линии тока поперечного течения около двух цилиндров в присутствии пары внешних симметричных вихрей (красные кружочки) и распределение полной вертикальной скорости вдоль линии размаха крыла (схема высокоплан).

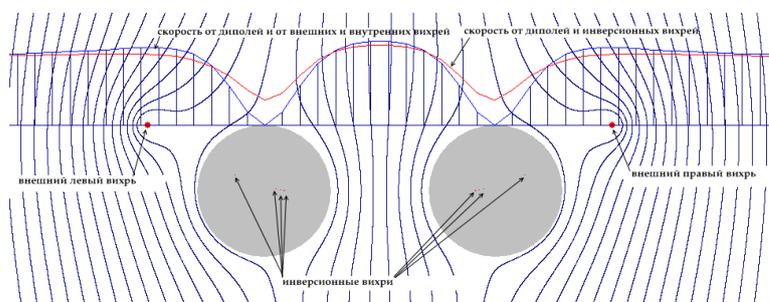


Рис. 1. Линии тока течения около двух цилиндров в присутствии пары симметричных вихрей

Несущей характеристикой крыла в присутствии двух фюзеляжей для малых углов атаки является производная коэффициента нормальной силы по углу атаки, которую можно записать как произведение коэффициента интерференции $K_k(\phi)$ на производную коэффициента нормальной силы по углу атаки крыла. Согласно методу полос [1-3] коэффициент интерференции $K_k(\phi)$ определяется формулой

$$K_{k(\Phi)} = 2 \int_0^1 V_y dx,$$

где V_y – безразмерная вертикальная компонента скорости без учёта скорости от самих концевых вихрей крыла (кривая красного цвета на рис. 1); x – безразмерная координата вдоль размаха крыла (отнесено к полуразмаху крыла).

Литература

1. V. A Frolov Optimization of Lift-Curve Slope for Wing-Fuselage Combination //In Aerodynamics, edited by Mofid Gorji-Bandpy and Aly-Mousaad Aly (IntechOpen, London, 2021). P. 81-97.
2. V. A. Frolov Approximate calculation of maximum lifting properties of wing-body combination. //In Int. Conf. High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2021): AIP Conference Proceedings 2504, 030013 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0132775>
3. В. А. Фролов Влияние фюзеляжа на несущую способность крыльев в схеме высокоплана. XIII Всерос. съезд по фундамент. пробл. теорет. и прикл. механики // Сб. тезис. докл. В 4-х т. Санкт-Петербург, 2023. С. 467-469.
4. В. А. Фролов Модель потенциального обтекания комбинации двух круговых контуров в присутствии пары дискретных стационарных вихрей //Ракетно-космическая техника, сер. XII, вып. 1, Самара, 2001. С. 194-201.

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Хайретдинова Д.Д., Селютина Н.С.

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия
st076712@student.spbu.ru

В работе предлагается построить релаксационную модель для расчета необратимого деформирования и разрушения многослойных металлических композитов на основе критерия инкубационного времени и релаксационной модели пластичности [1]. Выражение общей схемы модели представлено ниже:

$$\sigma_{true}(t) = \begin{cases} E_0 \varepsilon(t), & t < t^0 \\ E_0 \gamma(t, E_0 \dot{\varepsilon}t, \sigma_y^0)^{1-\beta_0} \varepsilon(t), & t^0 \leq t \leq t^1 \\ E_0 \gamma(t, E_1 \dot{\varepsilon}t, \sigma_y^{me})^{1-\beta_1} \varepsilon(t), & t^1 \leq t \leq t^2 \\ E_0 \gamma(t, E_2 \dot{\varepsilon}t, \sigma_y^{me})^{1-\beta_2} \varepsilon(t), & t^3 \leq t \leq t^4 \\ \dots \\ E_0 \gamma(t, E_{n-1} \dot{\varepsilon}t, \sigma_y^{me})^{1-\beta_{n-1}} \varepsilon(t), & t^{n-1} \leq t \leq t^n \end{cases} \quad (1)$$

Модель позволяет в рамках единой концепции учитывать процессы релаксации каждого слоя как при статических, так и при динамических режимах нагружения. На примере полученных из литературы [2,3] экспериментальных результатов по разрушению многослойных композитов при статических и динамических нагрузках показано, что модель может прогнозировать многостадийное деформирование композита, а именно разрушение хрупких слоев и пластическую деформацию металлических слоев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-71-01059

Литература

1. Selyutina, N.; Petrov, Y. // Structural-Temporal Peculiarities of Dynamic Deformation of Layered Materials, Materials, 2022. Vol 15. 4271.
2. S. H. Khan, A. P. Sharma // Failure assessment of fiber metal laminates based on metal layer dispersion under dynamic loading scenario, Engineering Failure Analysis. 2019. Vol 106. 104182
3. L. Yang, H. Xia, Z. Xu, Z. Lihua, Q. Ni // Influence of surface modification of carbon fiber based on magnetron sputtering technology on mechanical properties of carbon fiber composites. Materials Research Express. 2020. Vol 7. 105602.

ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКИЙ ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВОЛНОВОДА С ПЕРИОДИЧЕСКИМ МАССИВОМ ПОЛОСТЕЙ

Ханазарян А.Д., Голуб М.В.

*Кубанский государственный университет, Институт математики, механики и
информатики, Краснодар, Россия
artur97.10@mail.ru*

За последние годы исследователями было предложено достаточно большое количество новых конфигураций акустических метаматериалов и фоновых кристаллов. Это связано с тем, что такие материалы обладают уникальными свойствами, такими как отрицательная рефракция, наличие полных и модовых запрещенных зон, и тем самым предоставляют возможность управления передачей волновой энергии. Для исследования волновых процессов в метаматериалах и проведения параметрического анализа с целью определения наиболее оптимальной конфигурации, необходимы надежные и эффективные математические модели и алгоритмы. Так, в последнее время интенсивно развиваются гибридные подходы для решения различных волновых задач, в которых области сложной геометрии описываются с использованием чисто численных методов, а распространение волн в протяженных слоистых структурах описывается с использованием полуаналитических подходов [1, 2].

В настоящей работе предложен гибридный подход на основе метода спектральных элементов (МСЭ) [3] и полуаналитического метода конечных элементов (ПАМКЭ) [4] для исследования динамического поведения слоистого волновода с периодическим массивом внутренних полостей (участок волновода изображен на рис. 1). В протяженном волноводе такой подход дает возможность с помощью ПАМКЭ представить решение в виде суперпозиции нормальных мод, а смежные области дискретизировать с помощью МСЭ. На общей для двух областей границе задаются условия непрерывности перемещений и напряжений. Для сопряжения решений вводится вспомогательная функция перемещений, которая раскладывается по тем же базисным функциям, что применяются в МСЭ и ПАМКЭ. Результаты моделирования сравниваются с расчетами в конечноэлементном пакете COMSOL Multyphysics и демонстрируется хорошее совпадение.

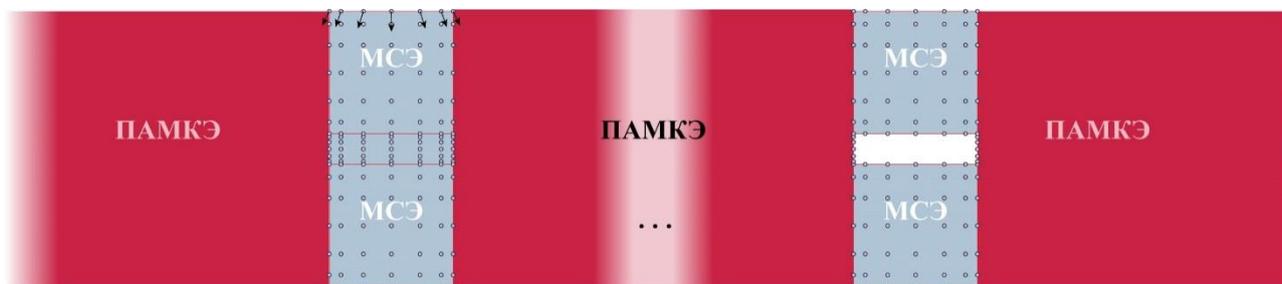


Рис. 1. Пример схемы реализации гибридного подхода для участка волновода с массивом полостей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-11-00261.

Литература

1. Е. В. Глушков, Н. В. Глушкова, А. А. Евдокимов // Гибридная численно-аналитическая схема для расчета дифракции упругих волн в локально неоднородных волноводах, *Акустический журнал*, 64:1 2018. 3–12.
2. А. Д. Ханазарян, М. В. Голуб // Гибридный метод для моделирования антиплоских колебаний слоистых волноводов с присоединенными элементами, *Вычислительная механика сплошных сред*, 16:1 2023. 101–114.
3. Komatitsch D., Vilotte J. -P., Vai R., Castillo-Covarrubias J. M., Sanchez-Sesma F. J. // The spectral element method for elastic wave equations – application to 2-D and 3-D seismic problems, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 45:9 1999. 1139–1164.
4. Bartoli I., Marzani A., Lanza di Scalea F., Viola E. // Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section, *Journal of Sound and Vibration*, 295 2006. 685–707.

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАЛИЧИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ПРИМЕСЕЙ

Пипия Г.Т.¹, Салех Л.О.А.¹, Сушников В.А.¹, Хлопин С.В.^{1,2}, Черненькая Л.В.¹

1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
x@spbstu.ru

Работа посвящена созданию лабораторной установки с прототипом датчика. Лабораторная установка позволяет дозировать количество и характер загрязнений, а датчик выявляет наличие нефтесодержащих примесей и определяет их концентрацию. Выявление содержания примесей основано на эффекте вторичного флуоресцентного свечения нефтепродуктов после воздействия ультрафиолета. Концентрация рассчитывается на основании количества выявленных примесей (вычисленного объема нефтесодержащих пузырей) и общего объема жидкости, прошедшей через датчик, рассчитанного на основании данных датчика скорости потока. Оптический метод позволяет проводить классификацию примесей на нефтепродукты (с вторичным флуоресцентным свечением в определенном цветовом диапазоне), твердые частицы и другие примеси. Также датчик позволяет осуществлять контроль величины и изменения прозрачности жидкости.

Получение данных о наличии примесей и их концентрации происходит в несколько этапов:

Этап 1. Получение изображений потока жидкости внутри камеры датчика. При прохождении потока жидкости в плате управления на основании показаний датчика измерения скорости потока вычисляется линейное смещение объема внутри камеры. В рассчитанные промежутки времени производится освещение объема камеры датчика в ультрафиолетовом диапазоне света. Затем поступает управляющий импульс для получения очередного кадра. В результате обработки данных на компьютере сохраняется серия снимков с известным смещением кадра относительно предыдущего снимка.

Этап 2. Предварительная обработка сохраненных кадров. Обработка кадров проводится для увеличения разрешающей способности кадра и выявления слабых свечений. Выявление слабых свечений проводится методом суммирования областей кадров, соответствующих одним объемам жидкости в смещенном потоке. Совмещение кадров осуществляется в соответствии с вычисленным смещением потока на основании показателей датчика измерения скорости.

Этап 3. Анализ полученных изображений, выделение контуров объектов, анализ найденных контуров, детектирование ложных контуров, вычисление характерных размеров объектов, вычисление объема найденных объектов, расчет концентрации примесей в жидкости.

Состав стенда:

1. Емкость жидкости: в ней содержится рабочий объём воды и насос для создания потока жидкости через датчик;
2. Трубки для перемещения жидкости к и от датчика;
3. Дозатор нефтепродуктов: через дозатор можно помещать определенный объем нефтепродуктов в трубопровод для последующего обнаружения и подсчета;
4. Камера корпуса датчика позволяет облучать поток жидкости УФ излучением и регистрировать свечение камерой датчика через смотровое окно;
5. Датчик измерения скорости потока жидкости передает значение величины скорости потока воды, проходящей по трубе;
6. Циркуляционный насос с возможностью регулировки скорости потока жидкости;
7. Фотокамера: используется для получения серии цифровых изображений потока жидкости;
8. УФ источник света: позволяет производить освещение в УФ диапазоне с заданной частотой импульсов;
9. Плата управления: обеспечивает получение скорости потока жидкости на основе показаний датчика измерения скорости потока, задаёт частоту зажигания УФ источника света, передаёт импульс синхронизации в компьютер обработки данных, регулирует частоту оборотов мотора насоса.
10. Компьютер обработки данных: используется для анализа и обработки изображения. В последующем алгоритмы, отработанные на компьютере, будут переписаны на микроконтроллер.

Для создания датчика используются следующие технологии: машинное (компьютерное) зрение, методы обнаружения границ объектов, методы цветокоррекции, методы цифровой обработки изображений, методы

поиска и классификации уровней вложенностей контуров, методы анализа массивов контуров для расчета геометрических размеров объектов контуров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-20116 (<https://rscf.ru/project/24-21-20116/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 24-21-20116.

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВРЕЖДЕНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МНОЖЕСТВЕННЫМИ ФРАГМЕНТАМИ ПНЕВМАТИКА

Занина Э.А.¹, Мартиросов М.И.^{1,2}, Хомченко А.В.^{1,2}

1 - ПАО "Яковлев", Москва, Россия

2 - Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

khomchenkoanton@yandex.ru

При создании техники в аэрокосмической отрасли большую роль играет весовая эффективность создаваемого летательного аппарата (ЛА). Этой цели можно достичь путём совершенствования применяемых конструкционных материалов, физико-механические характеристики которых должны быть не ниже, чем у традиционных материалов. Все большее значение приобретают элементы конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые обладают рядом преимуществ: высокой удельной жёсткостью и прочностью, высокой износостойкостью и сопротивлением усталости, а также возможностью создания уникальных механических свойств в зависимости от требований, предъявляемых к изделию и т.д. Однако, чувствительность ПКМ к ударным нагрузкам является серьёзным препятствием для расширения их использования. Для доказательства соответствия прочностных характеристик силовых конструкций ЛА из ПКМ сертификационным требованиям, необходимо проведение расчетно-теоретических и экспериментальных работ по методикам, позволяющим показать, что проектируемые конструктивные элементы из ПКМ полностью удовлетворяют предъявляемым требованиям. Одной из возможных угроз являются последствия взрыва шины колёс шасси – пневматика, изготавливаемого из армированной резины, – при котором происходят соударения его отделившихся фрагментов с элементами силовой конструкции ЛА из ПКМ, приводящие к её повреждениям.

В работе рассматривается цилиндрическая прямоугольная в плане панель длиной $a = 540$ мм, шириной $b = 480$ мм и стрелой подъёма $c = 10.7$ мм, выполненной из однонаправленного углепластика на основе углеродного волокна T300 и эпоксидного связующего PRIME 20 LV. Схема укладки панели симметричная, сбалансированная и смешанная с типовыми углами $\pm 45^\circ$, 0° и 90° , всего в укладке 45 слоёв с толщиной монослоя $\delta = 0.1$ мм. Панель моделируется послойно с использованием объёмных конечных элементов первого порядка (модель материала «221_MAT_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE»), основанного на деформационном критерии разрушения. Соединение монослоёв осуществляется с помощью когезионных элементов (модель материала «138_MAT_COHESIVE_MIXED_MODE»). В качестве граничных условий используется шарнирное опирание панели по её контуру.

В качестве нагрузки рассматривается ударное воздействие множественными фрагментами пневматика, число которых варьируется от 2 до 7. Фрагменты имеют форму прямоугольных параллелепипедов, высота которых находится в пределах от 50 до 200 мм, длина – от 70 до 100 мм, ширина – от 30 до 50 мм. Такой выбор обусловлен размерами пластины. В качестве модели материала фрагментов используется гиперупругая модель «77_MAT_OGDEN_RUBBER», параметры которой определяются экспериментально в соответствии с ГОСТ 270-75. Начальные скорости пневматиков направлены вдоль нормалей к внешней поверхности панели в точках соударения и варьируются в пределах от 80 до 120 м/с.

Для автоматизации процесса в программном комплексе Simcenter Femap (Siemens PLM Software) разработана программа (макрос) на языке VBA, позволяющая создавать конечно-элементные модели (КЭМ) панели с различными параметрами фрагментов пневматика. Также разработана методика автоматического послойного моделирования пластины из ПКМ в программном комплексе Simcenter3D (Siemens PLM Software) с дальнейшим импортом полученной модели (КЭМ) в программный комплекс LS-DYNA (ANSYS Inc.).

Решение задачи проводится в LS-DYNA с помощью метода конечных элементов с использованием центрально-разностной схемы интегрирования по времени с автоматическим определением шага согласно критерию Куранта-Фридрихса-Леви. По результатам полученного решения проводится анализ повреждений панели (монослоёв и межслоевых связей) для различных сценариев соударения с фрагментами пневматика.

Рассматривается изменение кинетической энергии фрагментов пневматика, а также полных перемещений и контактных усилий в точках удара. Проводится параметрический анализ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЯЖЁЛОЙ ИДЕАЛЬНОЙ НЕРАСТЯЖИМОЙ НИТИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ С ГРУЗОМ НА КОНЦЕ

Храмов Д.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
diman3366@mail.ru

С древних времён тросы, канаты, нити являются одним из основных конструктивных элементов многих механизмов. Математическое моделирование движения нити, как одномерного объекта в пространстве, нашло множество приложений к практическим задачам текстильной и военной промышленности, а в последнее время предпринимаются попытки использовать тросовые системы в космосе для спуска капсул с орбит или устранения космического мусора. Для исследования возможности реализации таких процессов с помощью тросовых систем, было проведено множество успешных экспериментов, например: TSS1 и TSS1-R, SEDS 1 и SEDS 2, YES и YES2 и др. В результате верификации математической модели и анализа процесса размотки троса стало понятно, что такие процессы чувствительны к начальным параметрам запуска и ещё необходимо учитывать эффекты, связанные с распространением волн возмущения в нити и их отражением от границ. В связи с чем остаётся актуальной потребность в моделировании движения нити в подобных процессах для последующего использования в космических миссиях.

В докладе представлен способ моделирования движения нити. Математическая модель основана на уравнениях движения идеальной однородной нерастяжимой. Численное решение основано на методе характеристик. Валидация программы проведена на экспериментально полученных траекториях центра масс груза (висящего на нити) в процессе сматывания. В том случае, когда масса груза много больше массы нити получено совпадение расчётной и экспериментальной траектории. Из чего можно заключить, что движение нити можно моделировать с помощью предложенной модели.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ЗАДАЧАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ГАЗОВЗВЕСИ С ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Циркунов Ю.М.

*Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова,
Россия*
yury-tsirkunov@rambler.ru

При обтекании запыленным газом тел в задачах аэродинамики летательных аппаратов или элементов проточных трактов авиадвигателей высокоскоростной двухфазный поток «газ-частицы» взаимодействует с обтекаемой поверхностью. Поскольку частицы являются более инерционными, чем несущий газ, они сталкиваются с поверхностью. В реальных течениях частицы практически всегда имеют несферическую форму (рис. 1).

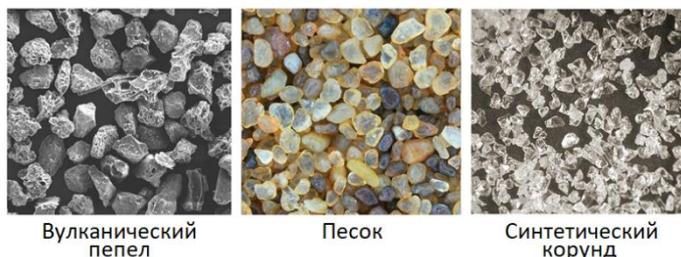


Рис. 1. Конфигурации частиц различного происхождения.

Результат ударного взаимодействия частиц с обтекаемым телом зависит от физико-механических

свойств материалов частиц и тела, от скорости удара, от ориентации частиц перед столкновением, а также от шероховатости поверхности тела. Ориентация частиц относительно поверхности в момент столкновения является случайной. При достаточно больших скоростях удара частицы могут разрушаться, образуя множественные осколки. Процесс ударного взаимодействия частиц с обтекаемой поверхностью является предметом изучения на протяжении последних десятилетий. Здесь имеются экспериментальные данные по коэффициентам восстановления нормальной и касательной компонент скорости центра масс частиц, предложены модели ударного взаимодействия, опирающиеся на опытные данные. Имеются экспериментальные данные о возникающей шероховатости поверхности (рис. 2). Задача ударного взаимодействия частиц с телами является предметом механики твердого деформируемого тела, и здесь должны рассматриваться различные материалы и параметры соударения, учитываться упругие и пластичные деформации, возможное разрушение частиц и абразивная эрозия поверхности. Однако в настоящее время отсутствуют теоретические и численные модели и результаты, учитывающие названные аспекты ударного взаимодействия несферических частиц с поверхностями в практически важных диапазонах скоростей, углов соударения и свойств материалов.,

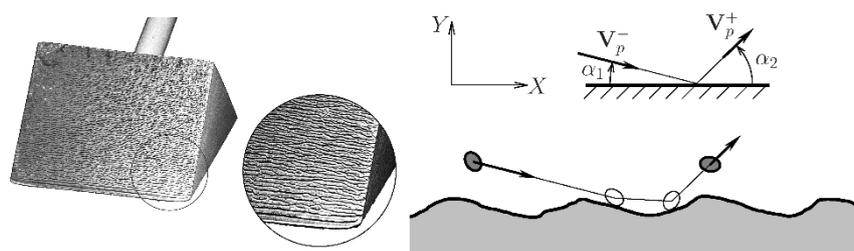


Рис. 2. Вид шероховатости поверхности пластичного материала в результате абразивной эрозии.

В докладе рассматриваются и анализируются проблемы ударного взаимодействия частиц с поверхностями, вопросы рассеяния отраженных частиц, а также вопросы абразивной эрозии и шероховатости поверхностей. Приводятся результаты моделирования двухфазных течений с учетом рассеяния частиц из-за их несферической формы и шероховатости поверхности. Обсуждаются вопросы защиты поверхностей от негативного воздействия высокоскоростных дисперсных частиц.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ С УЧЕТОМ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ В ДВОЙНОЙ СРЕДЕ

Цыкунов О.И.

*Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург,
Россия*

olegtsykunovmgn@gmail.com

В данном докладе рассматривается одномерная модель фильтрации жидкости в нефтенасыщенной пористой среде с учетом влияния капиллярных сил и дополнительного градиента давления, вызванного закачкой. Модель была верифицирована на лабораторных экспериментах и показала хорошее соответствие с реальными данными на начальных этапах фильтрации. Однако, на более поздних этапах наблюдалось расхождение, что было связано с представлением породы в виде совокупности одинаковых капиллярных каналов и осреднением их свойств. В связи с этим было предложено применение модели двойной среды [1], разделяющей породу на два набора пор с разными свойствами, что позволило точнее описать изменения в динамике фильтрации, обусловленные различием в скоростях фильтрации. Однако, кривая пропитки отклонялась от экспериментальных данных, так как момент смены скорости фильтрации не совпадал с экспериментом. Для повышения точности моделирования был введен массообмен между средами, получена система дифференциальных уравнений первого порядка описывающая процесс фильтрации воды и нефти в пористой среде. Этот подход позволил получить высокую степень соответствия модели с экспериментальными данными.

Стоит отметить, что полученные модели имеют свободные параметры, так как структура нефтенасыщенных коллекторов на микроуровне хаотична и уникальна для каждой породы [2], поэтому они могут применяться для прогнозирования фильтрации в пласте только после проведения серии экспериментов по определению данных параметров.

Предложенная модель была использована для проведения численных экспериментов. В результате получено, что в природных пористых системах скорость капиллярной пропитки растет с ростом радиуса порового канала, несмотря на снижение капиллярного давления. При этом в маленьких каналах пропитка вносит больший вклад в фильтрацию, чем внешний градиент давления.

Литература

1. Lugumanov, T. (2018). To Modeling of Dual-Porosity Reservoirs. In Day 3 Wed, October 17, 2018. SPE Russian Petroleum Technology Conference. SPE. <https://doi.org/10.2118/191740-18rptc-ms>
2. Wang, M., Zhang, S., Zhang, F., Liu, Y., Guan, H., LI, J., Shao, L., Yang, S., & She, Y. (2015). Quantitative research on tight oil microscopic state of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. In Petroleum Exploration and Development (Vol. 42, Issue 6, pp. 827–832). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(15\)30079-3](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(15)30079-3)

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗГРУЗОЧНОЙ ЩЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Чанышев А.И., Абдулин И.М., Городилов Л.В.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия
a.i.chanyshv@gmail.com

Рассматривается задача об определении НДС массива горных пород вокруг выработки с произвольным сечением, когда все смещения уже произошли в момент создания выработки. Требуется восстановить нормальные и тангенциальные смещения на контуре выработки, затем с помощью этой информации решить задачу Коши, когда на контуре заданы смещения и контур свободен от напряжений. Для решения задачи привлекается метод щелевой разгрузки. На подготовленную заранее поверхность массива пород наносится исследуемый контур выработки в масштабе. Производится его щелевая разгрузка с последующим измерением смещений как во внутренней части щели, так и снаружи. Для определения полных смещений на границе «выработки» необходимо те и другие контурные смещения сложить. Суммарные смещения используются в решении задачи Коши как для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг горных выработок, так и для оценки внешних нагрузок, приложенных к массиву пород в целом. Приводится пример перерасчета приложенных сжимающих нагрузок к образцу материала прямоугольной формы и его габаритов по данным измерений смещений на контуре кругового отверстия, выполненного в нагруженном состоянии образца. Получено удовлетворительное согласие расчетных данных с натурными. По изложенной выше методике решается вопрос об определении контурных смещений на контуре выработки с произвольным смещением. Ниже на рис. 1. представлена схема определения смещений снаружи и внутри цилиндрической щели в случае плоского напряженного состояния на поверхности тела и на рис. 2. в глубине массива пород в случае плоской деформации.

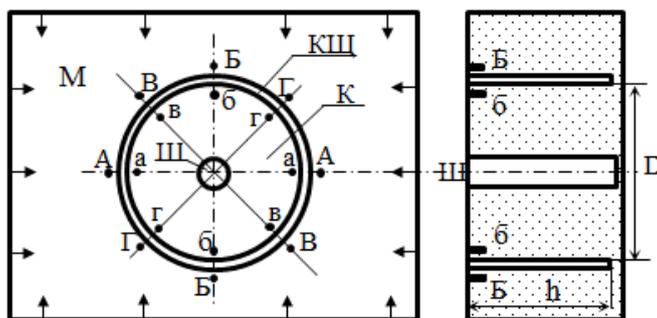


Рис. 1. Определение смещений на поверхности исследуемого тела в случае плоского напряженного состояния [1]

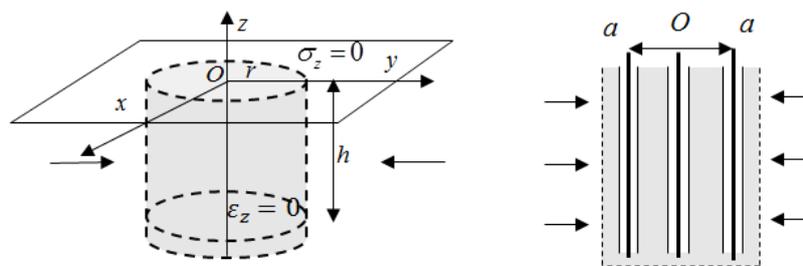


Рис. 2. Определение смещений в глубине массива пород в случае плоского деформированного состояния вертикальные отрезки на рисунке справа соответствуют реперным стержням

В работе представлено решение задачи Коши для выработки произвольного сечения в случае плоской задачи теории упругости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00188).

Литература

1. Ю. Г. Феклисов Деформационный способ комплексного определения напряженного состояния и упругих характеристик горных и строительных объектов // Проблемы недропользования. 2017. №4 (15). С 28-32.

О КОСОМ ВНЕДРЕНИИ КЛИНА В ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКУЮ СРЕДУ ПРИ УСЛОВИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДРУКЕРА-ПРАГЕРА

Чанышев А.И., Белоусова О.Е., Лукьяшко О.А.

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия
a.i.chanyshev@gmail.com

Рассматривается задача о предельных нагрузках при косом внедрении жесткого клина в жесткопластическую среду при заданных глубине, угле расположения оси симметрии и угле при вершине. В случае гладких поверхностей граней клина (при отсутствии трения на контактах) устанавливаются значения сопротивлений массива пород продвижению инструмента по нормальям к боковым поверхностям, которые необходимо преодолеть при проникании клина в массив горных пород. Задача решается с применением условия пластичности Друкера - Прагера и с ассоциированным законом течения. Нагрузка, прикладываемая к клину, должна иметь проекции на грани клина, большие или равные по величине полученным значениям сопротивлений среды. Последние вычисляются с применением характеристик, соотношений на характеристиках, граничных условий, глубины проникания, размеров граней, свойств материала. Если какая-то из проекций окажется меньше по значению рассматриваемого сопротивления, то тогда движение клина в эту сторону становится невозможным, клин движется вдоль другой его грани.

Для решения задачи выписываются уравнения равновесия сил, связывающие силы сопротивления, внешнюю силу, действующую на клин. Эта система уравнений позволяет при известных силах сопротивления найти силу, необходимую для внедрения клина, и одновременно находить силы сопротивления при известной внешней нагрузке, необходимые для его равновесия, которые могут быть больше или меньше вычисленных для проникания тела. Уравнение равновесия в моментах служит для определения плеча или точки приложения внешней силы.

Смещения в данной задаче предполагаются направленными вдоль характеристик, выходящих на свободную поверхность. Их величины на свободной поверхности являются заданными функциями, исходя из гиперболичности системы уравнений для смещений, включающих в себя закон упругого изменения деформации в направлениях поперек направлений скольжений и соосность тензоров напряжений и деформаций в пластической области деформирования [1,2].

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 124020700085-5).

Литература

1. Соколовский В. В. Теория пластичности М.: Высш. шк. – 1969.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: ГИТТЛ. – 1956. – 529 с.

МУЛЬТИДИАПАЗОННЫЙ РАДАР БОКОВОГО ОБЗОРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БПЛА

Жукова И.Н., Быстров Н.Е., Чеботарев С.Д., Трофимов А.М.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород,
Россия*
sergey.chebotarev@novsu.ru

В настоящее время внедрение использование БПЛА в различных сферах становится всё более распространённым и востребованным. Особую эффективность БПЛА демонстрируют в области наблюдения и сбора информации о состоянии объектов на земной поверхности.

Наиболее распространённым средством наблюдения на БПЛА является специализированные оптические фото/видеокамеры. Их использование обусловлено хорошей разрешающей способностью данных систем, простотой обработки получаемого фотоизображения. Стоит отметить ряд недостатков оптических систем: сильная зависимость от погодных условий, затруднённая работа в условиях плохой видимости, необходимость наличия гиростабилизированной платформы, высокая стоимость.

Альтернативным вариантом, позволяющим устранить указанные недостатки, является использование радиолокационных устройств для получения изображения земной поверхности. Высокая разрешающая способности в азимутальной плоскости может быть получена при большой апертуре антенны, что неприемлемо для использования на малогабаритных БПЛА. Технология и алгоритмы синтеза апертуры антенны позволяют получить высокое разрешение при малых габаритах антенной системы.

В настоящее время на рынке представлен ряд РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1]. Анализ показал, что большинство из них не могут быть использованы на малогабаритных БПЛА по нескольким причинам, таким как: высокие массогабаритные показатели, использование ЛЧМ-подобных зондирующих сигналов с высокой пиковой мощностью излучения, а также постобработку записанной в полёте информации. Другим подходом стало использование квазинепрерывных сигналов (КНС) в РСА и выполнением обработки информации в реальном времени.

Применение РСА с квазинепрерывным сигналом позволило снизить массогабаритные показатели РЛС, а также пиковую потребляемую мощность устройства, что очень важно в связи с малыми размерами и грузоподъёмностью носителя, а также с жёсткими требованиями по энергопотреблению устройств. РСА картографирования земной поверхности позволило при малых габаритах и весе получить разрешение формируемого радиолокационного изображения, сравнимое с оптическими системами.

Применение квазинепрерывного режима излучения и приёма увеличивает энергонасыщенность излучаемого и принимаемого сигнала при заданной пиковой мощности по сравнению с импульсной РЛС. При обработке не возникает неоднозначности измерения дальности и доплеровской частоты, в связи с чем отсутствует необходимость согласовывать режим излучения с параметрами обзореваемого объекта. КНС обладает высокой помехозащищённостью и помехоустойчивостью [2], а его шумоподобная форма спектра оказывает минимальное влияние на другие устройства, работающие в том же диапазоне частот.

Разработан программно-аппаратный комплекс формирования и обработки радиолокационного сигнала, проведены лабораторные и натурные лётные испытания, проводится интеграция на БЛА партнёра.

Литература

1. Tsunoda, S. I. Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar / Tsunoda S. I., Pace F., Stence J., Woodring M. // Sandia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sandia.gov/radar/files/spie_lynx.pdf (03.12.2017)
2. N.E. Bystrov, I.N. Zhukova, V.M. Reganov, S.D. Chebotarev. Range and Doppler Ambiguity Elimination in Coherent Radar using Quasicontinuous Signals. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, vol. 40, no. 4, pp. 37-46, (2017)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Чеврычкина А.А.^{1,2}

1 - *Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), Россия*
2 - *Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Россия*
chaa@ipme.ru

В настоящее время основным направлением новых технологий является разработка и исследование материалов нового поколения с заданными параметрами. В области медицины есть потребность в материалах, предназначенных для длительного контакта с внутренней средой живого организма и необходимых для повышения эффективности применения восстановительных технологий в лечении травм, повреждений и иных дефектов внутренних органов и тканей. Материалы на основе хитозана могут найти применение в тканеинженерных конструкциях, благодаря ряду полезных свойств: биосовместимость, биорезорбционная способность, антиоксидантные, увлажняющие, антимикробные свойства. Развитие новых материалов должно включать как исследование стандартных физико-механических свойств, так и в расширенных условиях. Как например скоростная зависимость пленок, которая важна для определения реологии материала и необходима для моделирования биоинженерных конструкций в последующем.

Исследуется биополимерная пленка на основе хитозана с толщиной 40 ± 5 мкм. Представлены экспериментальные данные зависимости напряжения от деформации для скоростей нагружения 0.016, 0.16 и 400 1/с при влажности 60% и температуре 24 °С. На основе концепции инкубационного времени, предложен критерий разрушения. Зависимость напряжения от деформации для скоростей нагружения 0.016, 0.16 1/с показывает последовательное развитие внутренних процессов материала при нагружении. Показана возможность прогнозирования количества процессов для каждой скорости деформации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500009-8 и мегагрант № 075-15-2022-1114)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ МОМЕНТНОЙ СХЕМЫ МКЭ

Чекмарев Д.Т., Абу Даввас Я.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
имени Н. И. Лобачевского, Россия*
4ekm@mm.unn.ru

Рассматривается моментная схема конечного элемента [1] решения трехмерных задач теории упругости и пластичности. Она отличается от других моментных схем [2, 3] способом построения и свойствами. Схема имеет следующие особенности: одна точка интегрирования в элементе, наличие 4 регулируемых параметров, напряжения и их моменты считаются постоянными в пределах конечного элемента, элемент является несовместным. Тензоры деформаций и напряжений имеют следующий вид:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} & \varepsilon_{14} & \varepsilon_{15} & \varepsilon_{16} & \varepsilon_{17} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{24} & \varepsilon_{25} & \varepsilon_{26} & \varepsilon_{27} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} & \varepsilon_{34} & \varepsilon_{35} & \varepsilon_{36} & \varepsilon_{37} \end{bmatrix} \quad \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} & \sigma_{15} & \sigma_{16} & \sigma_{17} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} & \sigma_{25} & \sigma_{26} & \sigma_{27} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} & \sigma_{35} & \sigma_{36} & \sigma_{37} \end{bmatrix}$$

Последние 4 столбца имеют смысл моментных составляющих, постоянных в пределах элемента.

Описан способ построения конечного элемента, из которого следуют его свойства и преимущества, в частности, отсутствие эффектов сдвигового запираения и неустойчивости типа «песочные часы». На базе данного элемента реализованы методики численного решения задач статики и нестационарной динамики с использованием явной схемы «крест». Обсуждается проблема эффективности данного элемента при решении динамических и статических задач теории упругости и пластичности.

Приводится решение ряда статических и динамических задач теории упругости и пластичности с учетом геометрической и физической нелинейности. Достоинства новой схемы МКЭ демонстрируются при

сравнении с традиционными схемами метода конечных элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 24-29-00422.

Литература

1. Абу Даввас Я., Модин И.А., Чекмарев Д.Т. // Моментный конечный элемент для решения трехмерных задач теории упругости // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. Сб. / Нижегород ун-т.- 2023. – Том 85. – № 2, С. 164-177
2. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под ред А.С. Сахарова И. Альтенбаха. –К.: Вища шк., Лейпциг: ФЭБ Фахбухферфлаг, 1982.-480с.
3. Гайджуров П.П. Конечные элементы повышенной точности для решения трехмерных задач теорий упругости // Изв. Вузов Сев.-Кавк регион. Технические науки. – 2003. - № 1. – С.54-58.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖИМОВ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТИ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО ПЛАСТА В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Чернова А.А.

НИИ механики МГУ, Москва, Россия
a.chernova@imec.msu.ru

Рассмотрена задача двухфазной фильтрации несжимаемых жидкостей в анизотропной пористой среде, находящейся в поле силы тяжести. Исследовано влияние анизотропной проницаемости, гравитационного расслоения фаз и капиллярного давления на эффективность вытеснения. Определены критерии подобия, характеризующие направления течения вытесняющей и вытесняемой жидкостей и на фазовой плоскости ограничена область значений этих параметров, которые соответствуют реальным значениям физических параметров пластов и жидкостей, насыщающих их. В рамках исследования численных решений профильной задачи фильтрации проведена классификация режимов вытеснения из анизотропного пласта [1]. Показано, что существует четыре режима, соответствующих качественно различным течениям. Проведено сравнение их эффективности в терминах коэффициента извлечения жидкости из пласта и коэффициента его охвата вытеснением. Исследовано влияние капиллярного давления на эффективность вытеснения в различных режимах течения. Показано, что в одних случаях увеличение влияния капиллярного давления приводит к повышению коэффициента вытеснения, а в других режимах, наоборот, – к его снижению. Представлены карты максимальных значений коэффициентов эффективности в фазовой плоскости и соответствующие им положения горизонтальных скважин, при которых эти значения достигаются.

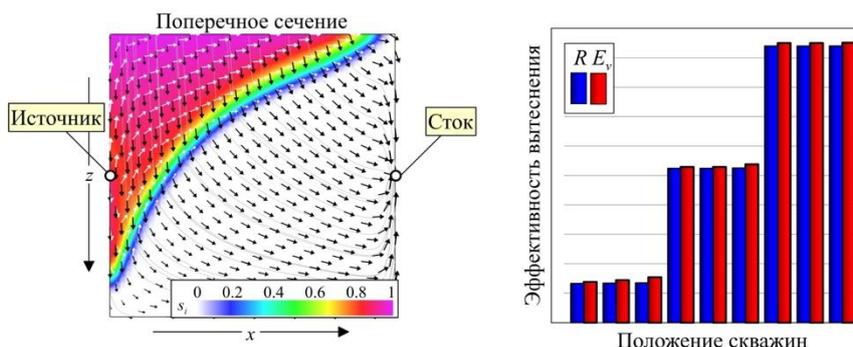


Рис. 1. Распределение насыщенности закачиваемой жидкости и диаграмма эффективности вытеснения при различных положения нагнетательной и добываемой скважин в случае режима PF.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 19-71-10051.

Литература

1. А. А. Чернова, А.А. Афанасьев // Режимы вытеснения жидкости из анизотропного пласта в поле силы тяжести. Изв. РАН. МЖГ. 2023. №6. С. 95-109.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯРНОГО И МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМ ЭНЕРГОПОДВОДОМ

Чернышов М.В., Савёлова К.Э.

*Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия
chernyshov_mv@voenmeh.ru*

Анализ течений с нерегулярным (маховским) отражением скачков уплотнения важен при газодинамическом конструировании сверхзвуковых воздухозаборников, сопел, аппаратов струйных технологий. Согласно [1-3], разнообразные параметры течения (давления торможения, скорости, скоростные напоры и т.д.) в потоках, разделенных тангенциальным разрывом за тройной точкой маховского отражения, значительно различаются, что способно определять проектный облик газодинамических устройств. К примеру, в [4-5] предложена и теоретически обоснована идея нового комбинированного прямоточного реактивного двигателя. Согласно этой концепции, поток газа за отраженным скачком, обладающий существенно большим давлением торможения, чем поток за главным (маховским) скачком, используется в термодинамическом цикле классического прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Поток за главным скачком, обладающий значительно более высокой температурой, особенно при полете с большими сверхзвуковыми скоростями, используется в термодинамическом цикле детонационного двигателя. Для успешного разделения двух потоков за тройной точкой T маховского отражения определить необходимо высоту тройной точки и форму исходящего из неё тангенциального разрыва, а для оценки интегральных характеристик перспективного комбинированного двигателя – форму и размеры всех других газодинамических разрывов в поле течения.

В данной работе представлена приближенно-аналитическая модель для быстрого расчёта параметров ударно-волновой структуры течения реакционноспособной газовой смеси с маховским отражением, а также некоторые результаты её применения. Предлагаемая модель впервые учитывает изменение химического состава и импульсный энергоподвод на главном скачке. Первичные результаты, полученные при расчете сверхзвукового струйного течения метановоздушной, водородовоздушной, водород-кислородной газовой смеси, показывают не только более раннее возникновение маховского отражения по сравнению с аналогичным течением без химических реакций, но и значительное увеличение геометрических размеров главного скачка уплотнения, что должно учитываться в практике газодинамического конструирования перспективных двигательных устройств высокоскоростных летательных аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Создание и научное обоснование методологии аэрогазодинамического проектирования общего облика двигательных и энергетических установок, технологий разработки и массового производства беспилотной аэрокосмической техники для решения задач в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях», № FZWF 2024 0003).

Литература

1. М. В.Чернышов, Л. Г. Гвоздева // Изв. вузов. Сер.: Авиационная техника. 2 2022. 87-110.
2. В. Н. Усков, М. В. Чернышов // Прикладная механика и техническая физика. 47:4 2006. 39-53.
3. М. В. Чернышов // Изв. вузов. Сер.: Авиационная техника. 2 2019. 82-88.
4. M. V. Chernyshov, K. E. Murzina, S. A. Matveev, V. V. Yakovlev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 618: 012068. 2019. 1-10.

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОПРОКИДЫВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В СЛОИСТОЙ ЖИДКОСТИ

Чесноков А.А.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Россия
chesnokov@hydro.nsc.ru

В устойчиво стратифицированной жидкости возмущения поля плотности распространяются вдоль пикноклина как внутренние волны. Это широко распространенное явление, наблюдаемое во многих морских и пресноводных акваториях в течение сезона с температурной стратификацией. Особый интерес представляют уединенные внутренние волны, которые могут достигать больших амплитуд и распространяться на значительные расстояния с сохранением формы. Такие волны переносят жидкие частицы в захваченном ядре, обеспечивая эффективный механизм массопереноса в стратифицированном водоеме. Волны большой амплитуды могут быть устойчивыми или опрокидывающимися в силу развития конвективной или сдвиговой неустойчивости (или их комбинации). Обрушение внутренних волн усиливает турбулентные движения жидкости, что способствует общему перемешиванию в толще воды. Изучению этого явления, включая натурные наблюдения, лабораторные эксперименты и численное моделирование, посвящены многие работы, например [1-3].

В данной работе предложена, исследована и верифицирована математическая модель, описывающая эволюцию обрушивающихся уединенных внутренних волн большой амплитуды в стратифицированной жидкости. Модель основана на трехслойном представлении течения в приближении Буссинеска. Внешние слои жидкости однородные и негидростатические, течение в них потенциальное. Они разделены гидростатическим промежуточным слоем (пикноклином), течение в котором может быть неоднородным и турбулентным. Взаимодействие между слоями описывается законом вовлечения жидкости в турбулентную прослойку. Этот закон является следствием более общей модели слоя смешения [4]. Полученная математическая модель сочетает развитый в [5] подход для описания сильно нелинейных волн в слоистой жидкости с предложенным в [4] методом моделированием слоя смешения в спутных сдвиговых потоках. Для адаптации модели слоя смешения к описанию динамики внутренних обрушивающихся волн потребовалось перейти к равновесной модели [6], задающей закон вовлечения. Отметим, что этот закон можно использовать как критерий обрушения волн. Исследованы классы стационарных решений, описывающих уединенные волны первой и второй моды. Предложен метод проведения нестационарных расчетов, с использованием которого выполнено моделирование формирования и эволюции обрушивающихся волн первой моды. Сравнение результатов с экспериментальными данными [2, 3] показывает применимость модели для описания эволюции обрушивающихся внутренних волн большой амплитуды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-41-00090.

Литература

1. K.G. Lamb // Internal wave breaking and dissipation mechanisms on the continental slope/shelf, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 46 2014. 231–254.
2. D. Fructus, M. Carr, J. Grue, A. Jensen, P.A. Davies // Shear-induced breaking of large internal solitary waves, *J. Fluid Mech.* 620 2009. 1–29.
3. M. Carr, J. Franklin, S.E. King, P.A. Davies, J. Grue, D.G. Dritschel // The characteristics of billows generated by internal solitary waves, *J. Fluid Mech.*, 812 2017. 541–577.
4. A.A. Chesnokov, S.L. Gavriluk, V.Yu. Liapidevskii // Mixing and nonlinear internal waves in a shallow flow of a three-layer stratified fluid, *Phys. Fluids*, 34:7 2022. Article ID 075104.
5. A.A. Chesnokov, V.E. Ermishina, V.Yu. Liapidevskii // Strongly non-linear Boussinesq-type model of the dynamics of internal solitary waves propagating in a multilayer stratified fluid, *Phys. Fluids*, 35:7 2023. Article ID 076605.
6. В.Ю. Ляпидевский, А.А. Чесноков // Равновесная модель слоя смешения в сдвиговом течении стратифицированной жидкости, *ПМТФ*, 2024. DOI: 10.15372/PMTF202315412.

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ РАЗРЫВЫ В РЕШЕНИЯХ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Чугайнова А.П.

Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва, Россия
anna_ch@mi-ras.ru

Изучаются решения специальной системы двух нелинейных гиперболических уравнений. Эта система уравнений описывает продольно-крутильные волны в нелинейно-упругом стержне и выражает законы сохранения продольного импульса и момента импульса стержня. Среди решений этой системы могут быть неклассические разрывы, так называемые “undercompressive shocks”, на которых соотношения Ренкина-Гюгоню должны быть дополнены кинетическим соотношением. Мы используем требование существования структуры разрыва как дополнительное соотношение на разрыве. Изучено множество разрывов со структурой [1]. Для изучения структуры исходная гиперболическая система уравнений дополнена членами второго порядка дифференцирования, выражающими вязкие напряжения. Диссипативные коэффициенты, входящие в эти уравнения различны.

Структуры разрывов найдены как решения в виде бегущих волн системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Указано условие существования неклассических разрывов как условие существования гетероклинической кривой, соединяющей два седла. Это условие накладывает ограничение в виде неравенства на диссипативные коэффициенты. Оказалось, что в тех случаях, когда существует структура неклассического разрыва, некоторое множество эволюционных ударных волн (удовлетворяющих условиям Лакса) не имеет структуры. Представляется интересным, что среди разрывов в решениях рассмотренной системы уравнений достаточно общего вида с самым простым диссипативным механизмом содержатся структуры неклассических разрывов.

Для рассматриваемой системы уравнений изучается роль неклассических разрывов в решениях задачи Римана [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-11-20141.

Литература

1. А. Г. Куликовский, А.П. Чугайнова // О структурах неклассических разрывов в решениях гиперболических систем уравнений, УМН, 77:1(463) 2022, 55-90
2. P. Chugainova, A. G. Kulikovskii // Structures of longitudinal-torsional shock waves and special discontinuities in nonlinearly viscoelastic media with dispersion, Contin. Mech. Termodyn., 35 2023. 1655–1669
3. P. Chugainova // Riemann problem for longitudinal-torsional waves in nonlinear elastic rods, Z. Angew. Math. Phys. (in press) 2024

КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ МНОГОУГОЛЬНЫХ ТРЕЩИН

Шамина А.А., Звягин А.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия
anashamina90@mail.ru

Рост трещин является одним из основных механизмов разрушения конструкций как в виде концентрации напряжений при экстремальных нагрузках, так и в виде роста усталостных трещин при неравномерном нагружении. Этот процесс должен строго контролироваться во избежание разрушения. Для изучения этого используется линейная механика разрушения, которая является одним из важных разделов современной науки о прочности материалов и конструкций. Первоосновой является наличие в материале дефектов в виде так называемых трещин, которые математически моделируются неоднородностью поля перемещений на определенном участке поверхности. В то время основной проблемой линейной механики разрушения было наличие бесконечных напряжений в вершине трещины. Дальнейшие исследования показывают, что бесконечные напряжения не реализуются из-за наличия области необратимых пластических

деформаций в окрестности вершины трещины. Тем не менее, в случаях, когда размер этого поля мал по сравнению с размером самой трещины, показана применимость критериев роста трещины на основе анализа полученного упругого решения.

В данной работе исследуется прямоугольная и многоугольные трещины. Изучены коэффициенты интенсивности напряжений в окрестности особых точек. Сделаны выводы о возможном направлении роста трещины. Исследована зависимость коэффициента интенсивности напряжений от размера трещины, проведено его сравнение для случая симметричной и несимметричной трещины.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Тюренкова В.В., Стамов Л.И., Смирнова М.Н., Шамина А.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия
anashamina90@mail.ru

Исследование поведения капель, взвешенных в потоке газа, и их влияния на характеристики несущего потока является важной задачей при численном моделировании турбулентных двухфазных потоков. Для понимания особенностей и прогнозирования поведения таких течений наряду с экспериментальными исследованиями необходима разработка математических моделей, адекватно описывающих все основные физические и химические процессы в газокapельной среде в различных масштабах.

В данной работе было получено решение задачи о столкновении двух капель на основе решения для кумулятивных струй и предложен критерий исхода столкновения капель. Основное внимание уделено процессу слияния двух взаимодействующих капель в одну и процессу слияния с последующим разделением на две и более капель.

Разработан полуаналитический метод, позволяющий применить решения задачи о кумулятивной струе к задаче о столкновении капель. Получено дифференциальное уравнение, описывающее следующие возможные исходы столкновения капель: слияние и слияние с последующим разделением. Получен критерий определения исхода лобового столкновения капель. В соответствии с разработанным критерием получены формулы для определения количества и размера образовавшихся капель.

Показано, что число капель зависит от относительной скорости их столкновения (степенная зависимость со степенью 6). Также увеличение радиуса и плотности капель приводит к увеличению количества образующихся капель (степенная зависимость со степенью 3). А увеличение коэффициента поверхностного натяжения, наоборот, приводит к уменьшению количества капель (обратная степенная зависимость со степенью 3).

Радиус образующихся капель прямо пропорционален коэффициенту поверхностного натяжения и обратно пропорционален плотности жидкости. Уменьшение относительной скорости столкновения капель приводит к увеличению радиуса образующихся капель (обратная степенная зависимость со степенью 2).

В случае лобового столкновения двух капель с радиусами r_1 и r_2 получен следующий критерий, описывающий количество N и радиус r_* образовавшихся капель:

$$\begin{aligned} & We < We_{crit}: \\ & N = 1, r_* = \sqrt[3]{r_1^3 + r_2^3} \\ & We \geq We_{crit}: \\ & N = \left[1 + \frac{We_1^3}{We_{1,crit}^3} \cdot \frac{\left(1 + \frac{We_2^3}{We_1^3}\right)}{\left(1 + \frac{We_2^3}{We_{1,crit}^3}\right)} \right], r_* = \sqrt[3]{\frac{r_1^3 + r_2^3}{N}} \end{aligned}$$

Если $We < We_{crit}$, результатом столкновения двух капель является слияние в одну каплю. Если $We \geq We_{crit}$, происходит разделение на две или более капель. Описанная модель актуальна для случая лобового столкновения капель. Критическое число Вебера We_{crit} может быть определено экспериментально или теоретически.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № № 23-71-10024.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВИБРОУДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С КРИВОШИПНО-ШАТУННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ КОЛЕБАНИЙ

Метрикин В.С., Никифорова И.В., Шапошников Д.Е.

Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, Россия
shaposhnikov@unn.ru

В докладе предложена и обоснована многокритериальная модель выбора параметров ударно-вибрационных механизмов с кривошипно-шатунным возбудителем колебаний (КШВК), предназначенных для уплотнения и обработки различных сред (грунта, песка, бетона и других сред) [1] (рис.1). Математические модели рассматриваемых механизмов с КШВК представляют собой сильно нелинейные динамические системы с переменной структурой фазового пространства. Динамический анализ математических моделей проведен численно-аналитическим способом с использованием метода точечных отображений поверхности Пуанкаре в себя, позволившего с помощью бифуркационных диаграмм описать возможные перестройки режимов движения механизмов в зависимости от их параметров.

Разработана многокритериальная модель выбора рационального варианта механизма для обработки среды различной физико-химической структуры на основе оценки и формирования множества эффективных (оптимально-компромиссных) решений.

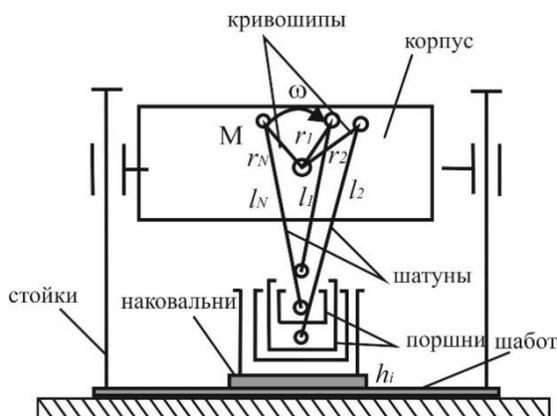


Рис. 1. Схема ударно-вибрационного механизма с КШВК

В качестве основного подхода реализуется схема редукции множества частных критериев к двум обобщённым критериям, характеризующим затраты и качество обработанных сред. На эффективность решений могут влиять различные параметры, в частности затраты энергии (зависят от скорости вибрации) и время работы. Оценка качества обработанной среды может основываться как на объективных точных измерениях, так и на субъективных оценках лица, принимающего решение (ЛПР).

Результатом расчётов и анализа является построение области эффективных решений (решений, оптимальных по Парето[2]) для окончательного выбора лицом, принимающим решение.

Литература

1. Igumnov L.A., Metrikin V.S., Nikiforova I.V. Communications in Computer and Information Science. Springer Nature Switzerland AG: Springer Nature Switzerland AG, Communications in Computer and Information Science. 1413. p. 63-76. 2021.
2. Makarova, J., Shaposhnikov, D.: Bicriterial problem of finding filter parameters using qualitative information on frequency interval preferences. In: Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference "Information Systems and Technology - 2020", pp. 836–847. NSTU, Nizhni Novgorod (2020)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И ГИДРОАЭРОДИНАМИКИ ПУТЕМ СОЕДИНЕНИЯ АСИМПТОТИЧЕСКИХ РАЗЛОЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАДЕ АППРОКСИМАНТ

Шатров А.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
shatrov_av@spbstu.ru

В докладе представлено новое направление применения асимптотических методов в задачах математической физики и гидроаэродинамики. В первую очередь это относится к приложениям теории возмущений к решению нелинейных сингулярно-возмущенных задач в локальной области пограничного слоя. Обсуждается применение в асимптотическом анализе метода Паде-аппроксимант [1] для перестройки асимптотического разложения в дробно-рациональную или квази-дробную функцию. Метод соединения асимптотик с помощью одно- и двухточечных Паде-аппроксимант альтернативен известному методу срачивания (Matching method [2]) и применяется в локальной области переходного (пограничного) слоя, где асимптотики неравномерны. В качестве демонстрации возможностей метода рассматриваются решения классических задач начальных и краевых задач математической физики. Пример использования одноточечных Паде аппроксимант (One-Points Pade-Approximants - OPAA) рассматривается для начальной задачи Дуффинга, где OPAA выполняет роль аналитического продолжения для асимптотического разложения частоты колебаний по малому параметру амплитуды колебаний a . Сравнение точного решения уравнение Дуффинга [3] с OPAA показывает вполне удовлетворительное соответствие. Для решения краевых задач с малым параметром мы используем гипотезу о существовании двух асимптотик, для двух предельных значений параметра. С физической точки зрения каждая нетривиальная асимптотика по малому параметру обычно имеет инверсию, то есть существует асимптотика по большому параметру. Но при этом возникает сложнейшая проблема для асимптотических методов – построение решений, приемлемых для всего диапазона параметра. Для краевой задачи Эйри применяется метод двухточечной Паде аппроксимации (Two-Points Pade-Approximants – TPAA), обеспечивающей соединение внутренней и внешней асимптотик. TPAA функции Эйри сохраняет по три члена внутренней и внешней асимптотик на обоих концах расчетного интервала и обеспечивает хорошую точность внутри слоя. Определение параметров Паде аппроксимант представляет нетривиальную задачу. Для этого используются различные подходы и методики. Точное описание всего переходного слоя существует лишь в тех случаях, когда имеются специальные функции типа функции Эйри, связывающие в один узел разное поведение решений по обе стороны слоя. Метод соединения асимптотик в переходных слоях механики жидкости и газа нацелен на упрощенное решение задач с неравномерной асимптотикой. Исходя из этого, мы рассматриваем решения задач, полученные нашим методом, которые можно сравнить с известными численными решениями. Преимуществом данной методики является аналитическое представление полученных решений. Ранее [4] был предложен метод соединения внутренней и внешней асимптотик с помощью кусочно-монотонной интерполяции и с условиями гладкости в переходной области. Затем в [5] данный метод был использован для немонотонной интерполяции. Обобщение использования метода Паде аппроксимант в задачах математической физики и гидроаэродинамики представлено в [6, 7]. В настоящей работе систематизируется и методологически обосновывается процедура применения соединения асимптотических разложений в задачах обтекания плоской пластины гиперзвуковым потоком газа.

Литература

1. Дж. А. Бейкер, мл., П. Грейс-Моррис // Аппроксимации Паде. М., Мир, 1986. 529 с.
2. М. Ван-Дайк // Методы возмущений в механике жидкости. М., Мир, 1967. 287 с.
3. А.Х. Найфе // Методы возмущений. М., Мир, 1976. 455 с.
4. Р.Г. Баранцев, Д.А. Пашкевич // Соединение асимптотик в переходном слое, Асимптотические методы в задачах аэродинамики и проектирования летательных аппаратов. Иркутск. 1994. 67-70.
5. Е. В. Алексеева, Р.Г. Баранцев, А.В. Шатров // Соединение температурных асимптотик в пограничном слое, Вестник СПбГУ. сер. 1, № 8. 1996. 96-99.
6. A. V. Shatrov // Method of matching of interior and exterior asymptotics in boundary-value problems of mathematical physics, J.Math. Sci. 230, 2018. 804–807
7. I. Andrianov, A. Shatrov // Padé Approximants, Their Properties, and Applications to Hydrodynamic Problems, Symmetry, 13, 2021. 1869

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ С КРУПНОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Шебелев А.В., Гаврилов А.А., Минаков А.В., Шебелева А.А.

Сибирский Федеральный Университет, Россия
an_riv@mail.ru

Исследование поведения неньютоновских течений с твердыми частицами имеет большой прикладной характер. Данные течения широко распространены в нефтегазовой индустрии и горнодобывающей промышленности. Особую значимость такие течения имеют в процессе бурения скважин. Буровой раствор является неньютоновской жидкостью и используется для транспорта и удаления частиц выбуренной породы на поверхность. Поэтому в данной работе представлены результаты моделирования двухфазного турбулентного неньютоновского течения с крупными тяжелыми частицами, используя одножидкостную модель [1]. Модель включает уравнения для двухфазного течения с реологическими соотношениями и уравнение для переноса концентрации частиц с учётом межфазного скольжения. Модель турбулентности учитывает модуляцию турбулентности частицами. Реология жидкости описывается моделью Гершеля – Балкли. Исследовалось влияние числа Рейнольдса и реологических параметров модели на характеристики течения. На основе сравнения с экспериментальными данными [2] и данными DNS-DEM моделирования [2] показано, что предложенная модель позволяет хорошо предсказывать распределение концентрации частиц, скорости частиц и несущей жидкости и перепада давления в канале.

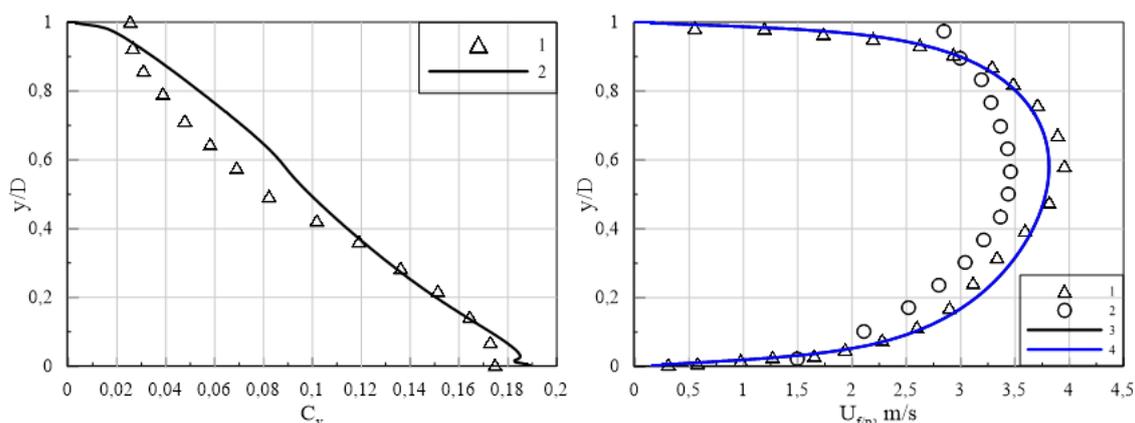


Рис. 1. Распределение концентрации частиц по высоте канала (слева), где: 1 – эксперимент, 2 – расчет и распределение продольной компоненты скорости жидкости и частиц по высоте канала (справа), где: 1 – скорость жидкости DNS – DEM расчет[2], 2 – скорость частиц DNS – DEM расчет[2], 3 – скорость жидкости расчет, 4 – скорость частиц расчет.

На рисунке 1 показан график распределения концентрации частиц и распределение продольной компоненты скорости жидкости и частиц по высоте трубы для числа Рейнольдса $Re=6000$. Наблюдается хорошее совпадение профилей концентрации по максимальной величине и распределению по высоте канала. Также наблюдается хорошее совпадение для профиля скорости жидкой фазы. Однако в расчете DNS – DEM присутствует значительное проскальзывание фаз относительно друг друга. Предложенная модель такого эффекта не дает, фазы движутся практически с одинаковой скоростью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-79-30022 <https://rscf.ru/project/23-79-30022>.

Литература

1. Гаврилов А.А., Шебелев А.В. //Реологическая модель турбулентных течений суспензий в горизонтальных каналах, Теплофизика и аэромеханика, Т. 27, № 3. 2020 С. 403-421.
2. Enzu Zheng, Murray Rudman, Shibo Kuang, Andrew Chrysts// Turbulent coarse-particle non-Newtonian suspension flow in a pipe, International Journal of Multiphase Flow. 142 2021. P.17.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО РАЗРУШЕНИЯ КАПЛИ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Шебелева А.А., Шебелев А.В., Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет, Россия
an_riv@mail.ru

На сегодняшний день использование альтернативных топлив, таких как органоводоугольное топливо (ОВУТ), с целью улучшения экологической ситуации в мире, является весьма актуальным. Так как ОВУТ состоит из воды, измельченного угля или горючего отхода его переработки, то при его сжигании в топливный баланс вовлекаются низкокачественные полезные ископаемые, что приводит к эффективной утилизации производственных отходов после углеобогащения. Совершенствовать технологию сжигания ОВУТ можно за счет получения новых данных по деформации и вторичному распаду капель топлива. В данной работе, для получения данных по распаду капли ОВУТ было проведено численное моделирование разрушения капли, обладающей неньютоновскими свойствами. Подробное описание численной методики, а также ее тестирование представлено в работе [1].

Для описания разрушения капель в потоке воздуха использовалась изотермическая постановка задачи, изучалась динамика деформации и дальнейшее разрушение капли при различных температурах 298 – 318 К. Капля ОВУТ обладала неньютоновскими свойствами, физические свойства которой были взяты из экспериментальной работы [2]. Геометрия расчетной области представляет собой параллелепипед с размерами 0.026×0.026×0.08 м. На одной из граней которого, задавалось условие входа с фиксированным значением скорости воздуха равной 50 м/с, на других гранях задавались условия свободного выхода. В начальный момент времени в расчетную область помещалась капля ОВУТ с начальным диаметром $d_0 = 0.003$ м, на которую воздействует поток воздуха. В ходе исследования были получены картины разрушения капли ОВУТ при следующих температурах 298 – 318 К.

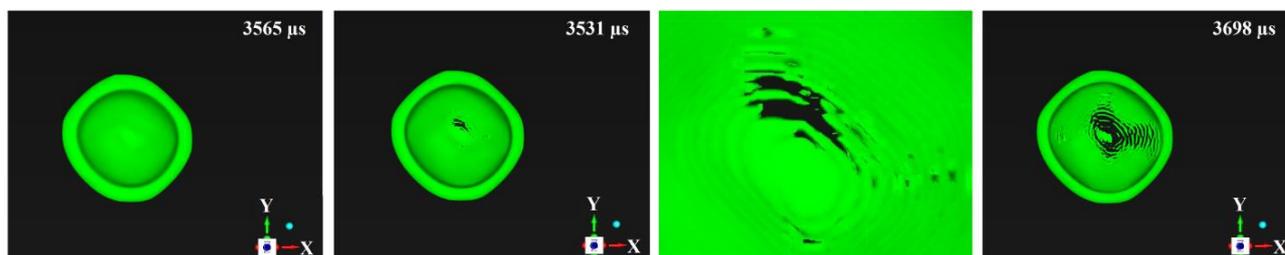


Рис. 1. Фронтальная проекция разрушения капли ОВУТ при температуре 318 К.

Сценарии разрушения капли при различных температурах похожи. Наблюдается постепенное поперечное вытягивание капли по миделю до того момента, пока она не будет напоминать форму диска. Дальше видим истончение центральной части капли и раздувание ее по типу «парашют», разрушение «парашюта» на мелкие капли, в итоге от исходной капли остается кольцо, которое истончается и разрушается. Было выявлено, что при увеличении температуры ОВУТ, время индукции разрушения уменьшается. Так, капля ОВУТ при температуре 298 К начинает разрушаться в момент времени ≈ 4955 мкс, а при температуре 318 К распад капли начинается гораздо раньше ≈ 3598 мкс.

Исследование осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта «Исследование особенностей вторичного дробления капель органоводоугольного топлива с целью совершенствования технологий его сжигания в арктических условиях» № 20231113-06407.

Литература

1. Minakov A.V., Shebeleva A.A., Chernetskiy M.Y., Strizhak P.A., Volkov R.S. // Study of the weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals, Fuel, 254 2019. P.115606.
2. Lei Ge., Junguo Li., // Study on the Influence of Pulping Process on Rheological Properties of Coal Water Slurry, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 384 2019.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА «ИДЕАЛ» С УДАРНИКОМ ИЗ ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ СТАЛИ

Шевченко В.Я.¹, Шевченко А.В.², Муравицкая Л.А.², Сычев М.М.¹

1 - Институт химии силикатов РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 - Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
msycho@mail.ru

Представлено численное исследование взаимодействия нового керамического материала «Идеал» с ударником из термоупрочненной стали. Недавно синтезированный новый керамический материал «Идеал» имеет весьма необычные физико-механические свойства [1]. В частности, рекордно низкий коэффициент Пуассона (0,008), наименьший из известных керамических материалов [2] и высокий предел Гюгонио [3] характеризуют «Идеал» как очень хрупкую среду. Для расчетов был использован коммерческий пакет LS-DYNA, решение проводилось с использованием несеточного метода SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

Механическое поведение материалов, используемых в расчете, определяется уточненной моделью деформирования и разрушения Джонсона-Холмквиста (для материала «Идеал») и Джонсона-Кука (сердечник и оболочка ударника, подложка). Материал геометрической модели ударника (сердечник и оболочка), подложки и плитки считался однородным (сплошная среда). Сетка конечных элементов системы «Плитка – подложка – ударник» состояла из 2,2 млн. элементов. Коэффициент сухого трения между подложкой, керамической плиткой и металлическими частями ударника $\mu=0,28$. Скорость ударника в момент взаимодействия с преградой составила $V=830$ м/с.

Результаты численных расчетов представлены в виде перемещений и напряжений при взаимодействии ударника с керамической плиткой и подложкой в зависимости от времени (рис. 1, а). На рисунке красный цвет показывает максимальную деформацию в данный момент времени. Рассчитан баланс полной и кинетической энергии ударника и керамической плитки во времени, при их взаимодействии (рис. 1, б). Результаты расчетов хорошо согласуются с данными полученными экспериментальным путем.

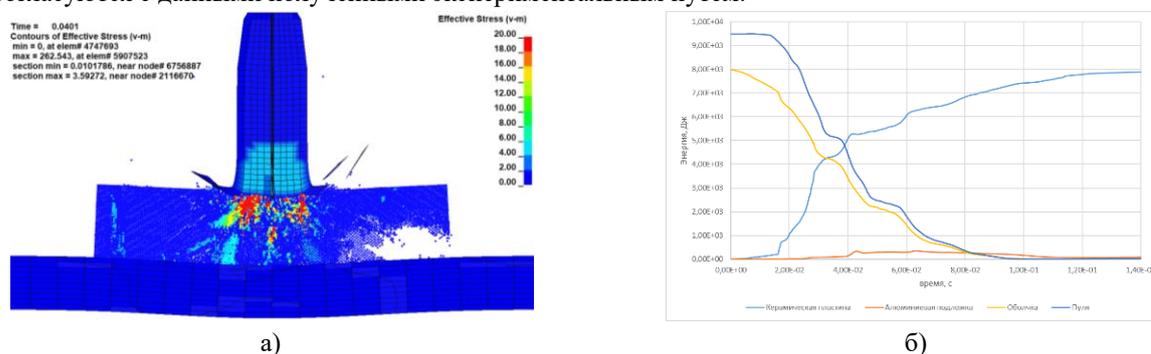


Рисунок 1 – Результаты численных расчетов: а) расчетная картина напряжений в керамической плитке при взаимодействии с ударником (плоскость симметрии); б) баланс полной и кинетической энергии ударника и керамической плитки при их взаимодействии

Проведено численное исследование взаимодействия ударника с новым керамическим материалом «Идеал». Уточненные коэффициенты в моделях разрушения Джонсона-Холмквиста и Джонсона-Кука позволяют получать конфигурации разрушения материалов керамики и различных металлов, совпадающие с экспериментальными данными (для материала «Идеал» - распространение конической трещины (конус Герца)).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-13-00054.

Литература

1. Shevchenko V.Y., Koval'chuk M.V., Oryshchenko A.S. Synthesis of a new class of materials with a regular (periodic) interconnected microstructure// Glass Physics and Chemistry. 2019. Т. 45. № 6. С. 412-418
2. В.Я. Шевченко, А.С. Орыщенко, А.Н. Беляков, С.Н. Перевислов. Определение механических характеристик керамики «идеал» (композита алмаз–карбид кремния) // Физ. и хим. стекла, 2023, Т. 49, № 6, С.573-579
3. Шевченко В.Я., Орыщенко А.С., Лепин В.Н., Перевислов С.Н., Ломоносов И.В. и др. Измерение упругого предела Гюгонио в керамике «Идеал» Glass Physics and Chemistry (2023 г.)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКЛИНАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ПЕНТАГОНАЛЬНЫХ ВИСКЕРАХ

Шевчук Р.Э.¹, Красницкий С.А.^{1,2}, Смирнов А.М.¹, Гуткин М.Ю.^{1,3}

1 - Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

2 - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

3 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

re.shevchuk@niuitmo.ru

Уникальные функциональные свойства мультидвойниковых частиц ГЦК-металлов определяют их эффективное применение в различных областях современных нанотехнологий, включая катализ и плазмонику. Основные признаки их внутренней структуры, такие как преобладающая огранка плоскостями $\{111\}$ и циклическое двойникование, являются основными факторами, способствующими повышению их эксплуатационных свойств по сравнению с моно- и поликристаллическими аналогами. В частности, циклическое двойникование преимущественно отвечает за неоднородное распределение упругих напряжений внутри наночастиц, в т.ч. пентагональных вискерах (ПВ), провоцирующее запасание значительного количества энергии деформации [1,2]. Эта энергия имеет тенденцию к релаксации в рамках различных механизмов структурной деградаци, таких как образование дислокаций, зарождение пор и т.д. Актуальной проблемой является управление структурными дефектами, для чего, в первую очередь, необходимо выполнить корректную оценку неоднородных упругих напряжений ПВ.

Остаточные упругие напряжения и деформации, возникающие в ПВ, могут быть описаны в рамках дисклинационного подхода [3]. В рамках данного подхода, ПВ рассматриваются в теоретических расчетах как цилиндрическое тело, на оси которого расположена положительная клиновая дисклинация мощностью $\omega = 2\pi - 5 \arccos(1/3)$. Такой подход не позволит корректно учесть локальное изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности ребер проволоки и огранку частиц, хотя известно, что в окрестности ребер напряжения могут релаксировать за счет зарождения кристаллических дефектов [4]. Использование конечно-элементного (КЭ) моделирования позволит учесть влияние огранки частиц на распределение остаточных напряжений в ПВ [5].

В данной работе выполняется КЭ моделирование НДС ПВ в рамках дисклинационного подхода (дискретная модель), также аналогичное поле остаточных упругих напряжений в наночастице реализуется при помощи ее нагрева в рамках термомеханической аналогии (распределенная модель). Соответствующие КЭ модели и основные результаты выполненных расчетов представлены на рис. 1, где (а), (с) – дискретные модели, (b), (d) – распределенные модели.

Моделирование методом КЭ относительно огранки реальных наночастиц указывает на неточность цилиндрического приближения, получаемого в аналитических моделях. Пятиугольная огранка заметно влияет на упругие поля, наблюдается снижение напряжений вблизи краев ПВ. В результате энергия деформации, определенная численно для пятиугольного сечения, оказывается ниже, чем определенная аналитически для круглого сечения аналогичной площади. Показано, что на энергию деформации призматического тела с угловой собственной деформацией $\varepsilon^*_{\phi\phi}$ влияют эффекты формы поверхности, в отличие от случая дилатационного включения ($\varepsilon^*_{xx} = \varepsilon^*_{yy} = \varepsilon^*_{zz}$) призматической формы с энергией деформации, зависящей только от площади поперечного сечения.

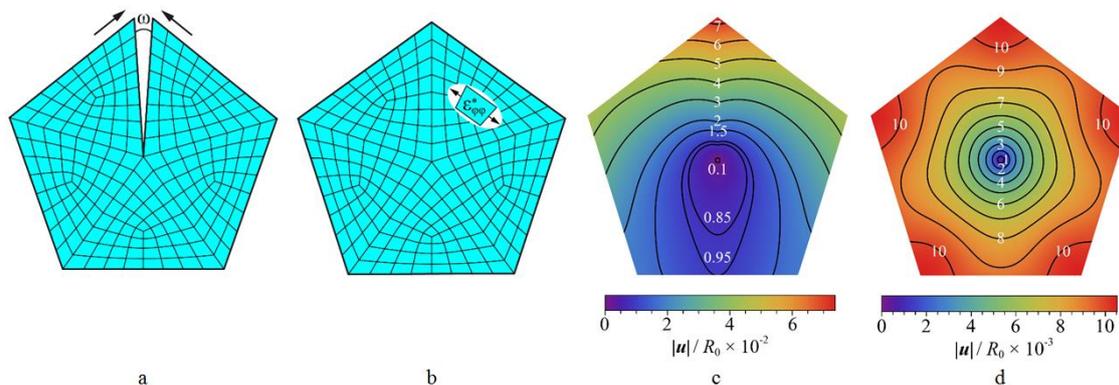


Рис. 1. КЭ сетки (а), (b) и полные перемещения $|u|$ (с), (d) в поперечном сечении ПВ.
 R_0 – радиус круга с площадью, эквивалентной площади сечения пентагональной формы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-72-10014.

Литература

1. Gryaznov V. G., Kaprelov A.M., Romanov A.E., Polonskii I.A. Phys. Status Solidi (b). 167(2), 441 (1991).
2. Marks L.D., Peng L. J. Condens. Matter Phys. 28(5), 053001 (2016).
3. A. E. Romanov, A. L. Kolesnikova, Rev. Adv. Mater. Technol. 3(1), pp. 55-95 (2021).
4. Y. Ding, X. Sun, Z.L. Wang, S. Sun, Appl. Phys. Lett. 100(11), 111603 (2012).
5. S. Patala, L.D. Marks, M.O. de la Cruz, J. Phys. Chem. C. 117(3), pp. 1485-1494 (2013).

ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ СОСТАВНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ПОРИСТОЙ ОСНОВОЙ И ПРЕДНАПРЯЖЕННЫМИ ОДНОРОДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Шейдаков Д.Н., Лыжов В.А.

*Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия
sheidakov@mail.ru*

В современной автопромышленности и авиастроении широко применяются различные высокопористые материалы, такие как металлические и полимерные пены. Конструкции из этих материалов обладают рядом преимуществ: малый вес, высокая удельная прочность, возможность поглощать энергию и т.д. Как правило, они имеют составную структуру — пористая основа покрыта прочной и жесткой оболочкой. Это необходимо для защиты от коррозии и воздействия высоких температур, а также оптимизации механических свойств при нагружении. При этом покрытие нередко содержит внутренние напряжения, что может являться как побочным эффектом технологического процесса его нанесения, так и требуемым функциональным свойством. Частое использование такого рода составных конструкций обуславливает актуальность их исследований на предмет прочности и устойчивости.

В данной работе проведен анализ бифуркации равновесия трехслойной нелинейно-упругой толстой сферической оболочки при внутреннем и внешнем гидростатическом давлении. При этом предполагалось, что средний слой оболочки (основа) выполнен из высокопористого материала, а внутренний и внешний слои (покрытия) однородны, предварительно деформированы и содержат внутренние напряжения. Следует отметить, что поведение пористых материалов часто не может быть адекватно описано в рамках классической модели сплошной среды из-за влияния микроструктуры. Для учета последней целесообразно использовать модель континуума Коссера, т.е. среды с моментными напряжениями и вращательным взаимодействием частиц. В связи с этим в ходе настоящего исследования применялся оригинальный подход: для описания поведения высокопористой основы составной сферической оболочки использовались определяющие уравнения нелинейного микрополярного тела, а поведение покрытий изучалось в рамках классической теории упругости. Устойчивость исследовалась в точной трехмерной постановке статическим методом Эйлера. Так как у составных тел с внутренними напряжениями отсутствует единая естественная (т.е. ненапряженная) отсчетная конфигурация, то при выводе линеаризованных уравнений равновесия для различных слоев рассмотренной трехслойной оболочки использовалась запись определяющих соотношений материала относительно разных отсчетных конфигураций. С помощью специальной подстановки на основе полиномов Лежандра анализ устойчивости сферической оболочки сведен к решению линейной однородной краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В результате численных расчетов найдены критические кривые и соответствующие им моды выпучивания, а также построены области устойчивости в плоскости параметров нагружения. При этом подробно проанализировано влияние внутренних напряжений в покрытиях, а также их толщины и упругих свойств на бифуркации равновесия составной сферической оболочки с высокопористой основой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00462, <https://rscf.ru/project/23-21-00462/>.

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ С СЕГРЕГАЦИЯМИ

Бобылев С.В.¹, Шейнерман А.Г.¹, Еникеев Н.А.², Валиев Р.З.²

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
2 - Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия
asheinerman@gmail.com

Предложена модель, объясняющая повышенную прочность ультрамелкозернистых сплавов, содержащих зернограничные сегрегации. В рамках предложенной модели эти сегрегации рассматриваются как однородные эллипсоидальные включения и выступают источниками упругих напряжений, влияющих на испускание решеточных дислокаций из границ зерен. Эти сегрегации закрепляют сегменты решеточных дислокаций на начальном этапе испускания дислокаций из границ зерен, а преодоление дислокациями упругих полей сегрегаций требует увеличения нагрузки, что приводит к повышению предела текучести. В случае ультрамелкозернистого алюминиевого сплава 1570 модель предсказывает увеличение предела текучести за счет зернограничных сегрегаций в диапазоне от 100 до 300 МПа в зависимости от формы сегрегаций и расстояния между ними. Показано, что максимальное значение предела текучести этого сплава достигается в случае, если форма сегрегаций близка к сферической, а сегрегации характеризуются высокой концентрацией растворенных атомов. Это означает, что упрочнение требует образования зернограничных сегрегаций в виде небольших концентрированных кластеров, а не однородного распределения растворенных атомов по границам зерен. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ НА КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРА В ПОТОКЕ ГАЗА

Шишаева А.С., Иванов О.О.

НИИ механики МГУ, Москва, Россия
anastasiashishaeva@rambler.ru

Ветроэнергетика – одно из наиболее перспективных направлений поисков возобновляемых источников энергии. Для генерации электрической энергии под воздействием ветра чаще всего применяются ветряки. Однако, их сложно эксплуатировать в пустынях или в областях с экстремально холодным климатом. Сложный механизм ветряка быстро изнашивается из-за попадания песка или образования изморози в зазорах между элементами конструкций. Для областей с экстремальным климатом целесообразно разработать альтернативные ветрогенераторы. Такой альтернативой могут стать электростанции, генерирующие электроэнергию из колебания деформируемых шнуров в потоке воздуха.

Трехмерную задачу колебания упругого шнура кругового сечения в потоке воздуха можно свести к двумерной задаче колебания в потоке цилиндра, закрепленного на пружине с эффективной жесткостью. Задача колебания цилиндра рассматривалась ранее во многих работах. Из работы [1] известно, что область неустойчивости цилиндра в дозвуковом потоке газа относительно невелика. При этом, известно, что близко расположенная к цилиндру пластина может существенным образом повлиять на частоту схода вихрей с цилиндра [2]. Цель данной работы - численное исследование влияния пластины на колебания закрепленного на пружине цилиндра.

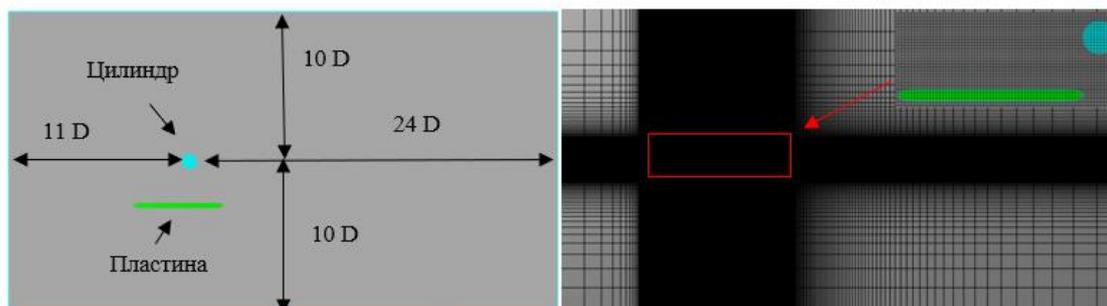


Рис. 1. Постановка задачи и расчетная сетка.

Моделирование обтекания колеблющегося цилиндра осуществляется в программном комплексе FlowVision. Используется прямоугольная расчетная область с размерами порядка $20D \times 35D$, где D – диаметр цилиндра (см. Рис. 1). Длина пластины составляет порядка $6D$. Решаются уравнения Навье-Стокса и уравнение колебания твердого тела с одной степенью свободы, закрепленного на пружине. Характерный интервал чисел Рейнольдса набегающего потока $Re = 160-320$. При расчете используется прямоугольная расчетная сетка 185×74 . Рассматривается двумерное течение в плоскости XY. Поток воздуха движется вдоль оси X, цилиндр колеблется перпендикулярно потоку вдоль оси Y. Пластина расположена вдоль оси X около цилиндра.

В ходе исследования обнаружено, что пластина оказывает влияние на колебания цилиндра только если он в положении равновесия находится на расстоянии меньше D от поверхности пластины по оси Y. Также получено, что перемещение цилиндра относительно пластины вдоль оси X практически не влияет на характер колебаний цилиндра. Исключение – расположение цилиндра в следе за пластиной.

Литература

1. Feng C.C. // The Measurements of Vortex-induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-section Cylinder. Master's Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada. 1968
2. Bearman, P. W., Zdravkovich, M. M. // Flow around a circular cylinder near a plane boundary. Journal of Fluid Mechanics 89(1), 1978, 33-47.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ФОРМАЛЬНЫЕ АСИМПТОТИКИ ДЛЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИССИПАТИВНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ, ВСТРОЕННОГО В ОДНОМЕРНУЮ СРЕДУ, ОПИСЫВАЕМУЮ ТЕЛЕГРАФНЫМ УРАВНЕНИЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Шишкина Е.В.¹, Гаврилов С.Н.¹, Порошин И.О.², Мочалова Ю.А.¹

1 - Институт проблем машиноведения РАН, Россия

*2 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
Россия*

shishkina_k@mail.ru

Рассматривается задача о колебаниях линейного диссипативного осциллятора, встроенного в волновод, поведение которого описывается телеграфным уравнением в частных производных. В частном случае возможно движение осциллятора с докритической скоростью вдоль волновода. Если осциллятор и волновод являются недиссипативными, и параметры их постоянны, при удовлетворении определенных условий (условия локализации) в системе возможны незатухающие колебания, локализованные в окрестности осциллятора. Предполагается, что диссипация как в осцилляторе, так и в волноводе мала, а все параметры системы медленно меняются во времени и (для волновода) в пространстве. Также предполагается, что условия локализации выполняются в некоторой окрестности осциллятора в каждый отдельный момент времени. Предложенная довольно общая постановка задачи позволяет описывать механические системы различной природы. В результате исследования получено выражение для главного члена универсальной формальной асимптотики, описывающей локализованные колебания осциллятора. Используемый метод имеет черты метода многих масштабов, метода ВКБ и пространственно-временного лучевого метода. В недиссипативном случае главный член разложения амплитуды получен в виде явной функции (точнее, алгебраического выражения), зависящего только от предельных значений параметров системы в данный момент времени. В диссипативном случае главный член разложения амплитуды, вообще говоря, представляет собой функционал, зависящий от истории параметров системы (хотя в некоторых частных случаях результат может быть получен в виде функции времени и параметров системы). Возможность нахождения главного члена универсальной асимптотики в виде функции в случае нескольких переменных параметров является неочевидным фактом, не вытекающим из прямого обобщения результатов для частных случаев с одним переменным параметром. Аналитические результаты проверены путем сравнения с численными расчетами, получено хорошее соответствие.

Литература

1. S.N. Gavrilov, I.O. Poroshin, E.V. Shishkina, Yu.A. Mochalova. Universal formal asymptotics for localized oscillation of a discrete mass-spring-damper system of time-varying properties, embedded into a one-dimensional medium described by the telegraph equation with variable coefficients // arXiv preprint 2404.14196 (2024). DOI: 10.48550/arXiv.2404.14196

ТЕРМОЭЛЕКТРОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ МИКРОВОЛНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Шоркин В.С.¹, Вильчевская Е.Н.², Альтенбах Х.³, Ромашин С.Н.¹

1 - Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

3 - Отто-фон-Герике Университет, Магдебург, Германия

v.s.shorkin@yandex.ru

Рассматривается воздействие микроволнового облучения (МВО) на диэлектрик. Его материал способен поглощать проникающую в него электрическую энергию. Предложена модель ее преобразования в механическую и тепловую энергию – электрокалорического эффект и эффект электрострикции. Построение модели обусловлено широким применением этих эффектов в разнообразных научных и производственных целях.

В предложенной модели используется связь переменных, характеризующих напряженно-деформированное состояние континуума, с величинами, характеризующими электродинамические, тепловые и механические процессы. Построение подобных связей использовано, например, в работе [1]. В данной работе упомянутые связи устанавливаются с помощью дополнительных параметров, вводимых в модель, наиболее полно и адекватно, отражающие влияние МВО на термоупругие процессы. Идея метода заимствована из работы [2]. Еще одной особенностью предлагаемой модели является учет нелокальных взаимодействий репрезентативных частиц материала. Так учитываются потенциальные силы Кулона, порожденные между их электрическими диполями. Электрокалорический эффект связывается с понятием вращательной температуры. Этот учет применяется при построении материальных соотношений по аналогии с рассуждениями, представленными в работе [3]. При построении термодинамических соотношений предполагалось, что объемная плотность внутренней энергии материала является суммой плотностей потенциальной энергии упругих деформаций, тепловой и электрической энергий. Базисными термодинамическими параметрами, определяющими внутреннюю энергию, приняты энтропия, классический тензор деформаций и квадрат вектора поляризации.

Уравнения термо- электро- упруго состояния континуума, которые построены для однородных, изотропных линейно упругих твердых материалов, применены и для жидких сред. Для описания исследуемых эффектов в качестве характеристики упругого состояния оказалось достаточным использования объемного модуля упругости.

Рассмотрено воздействие плоской монохроматической поляризованной электромагнитной волны на не намагничивающийся диэлектрик, занимающий полубесконечное пространство. Уравнение теплопроводности классическое одномерное неоднородное. Его правая часть, которая характеризует поглощенную энергию, пропорциональна быстро экспоненциально убывающей с ростом глубины проникновения МВО (закона Бугера). В работе получено, что коэффициент пропорциональности является линейной комбинацией двух материальных параметров диэлектрика. Первый характеризует его способность к электрострикции, а второй – к возникновению электрокалорического эффекта.

Теоретические построения иллюстрируются примером расчета нагрева жидкости – воды, и незначительного охлаждения твердого тела – кварца. Результаты качественно совпадают с известными данными.

Литература

1. Elena A. Ivanova Modeling of thermal and electrical conductivities by means of a viscoelastic Cosserat continuum Continuum // Mech. Thermodyn. 34. 2022. 555–586.
2. Ivanova Elena, Vilchevskaya Elena. Zhilin's Method and its Modifications // Encyclopedia of Continuum Mechanics / Ed. by H. Altenbach, A. Öchsner. 2018. 1–9.
3. Shorkin V.S., Vilchevskaya E.N., Altenbach H. Linear theory of micropolar media with internal nonlocal potential interactions // ZAMM Journal of applied mathematics and mechanics: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 103:2. 2023. e202300099.

ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИНЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

Штегман В.О., Фрейдин А.Б.

Институт проблем машиноведения РАН, Россия
vshtegman@gmail.com

Потеря устойчивости структурного элемента означает потерю несущей способности и является нежелательной. Однако, потеря устойчивости может быть использована как механизм релаксации напряжений. В данном исследовании рассматривается потеря устойчивости элемента анода литий-ионного аккумулятора в результате химической реакции. Реакция литизации кремния проходит в две стадии, сосредоточена на фронте реакции и сопровождается деформацией превращения, которая, в свою очередь, порождает напряжения, вызывает сжимающую силу реакции опоры, если перемещение элемента ограничено, и может привести к потере устойчивости элемента анода [1]. Помимо этого, напряжения возникающие в результате литизации кремния могут замедлить, блокировать реакцию и привести к растрескиванию анода. Baggetto *et al.* [2] предложили периодическую сотовую структуру кремниевого анода, элементы которой теряют устойчивость в процессе литизации, высвобождая упругую энергию деформации.

Данное исследование является продолжением работы, в которой аналитически исследована кинетика фронта реакции до момента потери устойчивости и исследовано влияние параметров материала и геометрических параметров пластины на время до момента потери устойчивости структурного элемента [3]. Численно исследуется потеря устойчивости структурного элемента и распространение фронта химической реакции до и после потери устойчивости. В качестве элемента структуры выбрана шарнирно закрепленная пластина с двумя фронтами реакции. Взаимосвязь кинетики фронта реакции и НДС моделируется с помощью тензора химического сродства [4]. Реакция предполагается сосредоточенной на фронте химической реакции, а диффундирующий компонент реакции полностью поглощается реакцией. Химическая реакция сопровождается деформацией превращения, которая считается параметром материала. Предполагается линейно-упругий отклик материала, малые деформации и плоское деформированное состояние, решается стационарное уравнение диффузии. Численное моделирование реализовано в программе конечно элементного моделирования с использованием пользовательского алгоритма постобработки на языке Python. Определён момент потери устойчивости, исследована кинетика фронта реакции и прогиб структурного элемента в зависимости от времени реакции, параметров материала и значений химической энергии.

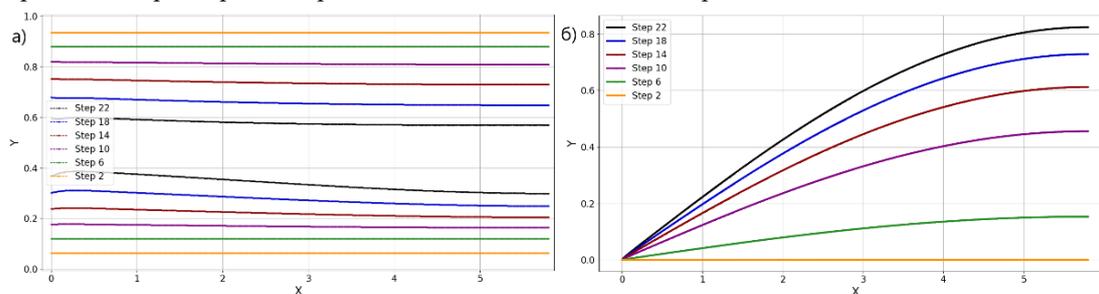


Рис 1. а) Положение фронта химической реакции и б) прогиб срединной линии пластины в различные моменты времени.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ИПМаш РАН (тема №124041500009-8).

Литература

1. Zhang K., Li Y., Wu J., Zheng B., Yang F. Lithiation-induced buckling of wire-based electrodes in lithium-ion batteries: A phase-field model coupled with large deformation // *International Journal of Solids and Structures*. 2018;144-145: 289–300.
2. Baggetto L., Danilov D., Notten P.H.L. Honeycomb-structured silicon: Remarkable morphological changes induced by electrochemical (De)lithiation // *Advanced Materials*. 2011;23: 1563–1566.
3. Shtegman V.O., Morozov A.V., Freidin A.B., Müller W.H. On buckling induced by a chemical reaction // *Materials Physics and Mechanics*. 2021, T. 47. N. 1. С. 1-19. DOI: 10.18149/MPM.4712021_4.
4. Freidin A.B. Chemical affinity tensor and stress-assist chemical reactions front propagation in solids // In: *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids. San Diego, California, USA. November 15–21, 2013. V009T10A102.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ОКОЛО СКВАЖИНЫ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Шутов Г.М., Ахметов Д.И., Бурнаев Е.В., Вановский В.В.

*Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), Россия
g.shutov@skoltech.ru*

Стандартный подход для моделирования динамики жидкости - численное решение гидродинамических дифференциальных уравнений [1], хотя он требует много времени и ресурсов. В качестве альтернативы, в последнее время активно исследуется применение нейронных сетей. Один из успешных подходов включает использование "физически-информированного машинного обучения", где функция ошибки включает в себя уравнения, описывающие процесс [2]. Это делает пространство решений физически обоснованным и улучшает надежность предсказаний. Однако, многие текущие исследования не учитывают специфические особенности реальных данных. В представленной работе, методы физически-информированного машинного обучения используются для создания модели скважины на нефтяном месторождении, которая учитывает поля проницаемости и давления, физику движения жидкости и наличие скважины.

Для генерации датасета были проведены расчёты в численном симуляторе TNavigator. В каждом сценарии модель инициализировалась со случайными картой проницаемости, числом и положением скважин и забойными давлениями в скважинах. Затем скважины отрабатывали в течении фиксированного временного интервала, а на каждом временном шаге сохранялось поле давлений.

Физически-информированная модель скважины - это нейронная сеть, которая берёт на вход карты проницаемости и граничные условия по давлениям, а на выходе выдаёт поля давлений. Архитектура представлена на Рисунке 1. Данная модель обучалась на данных, а также на физически-информированной функции ошибок, которая была выведена из уравнения фильтрации.

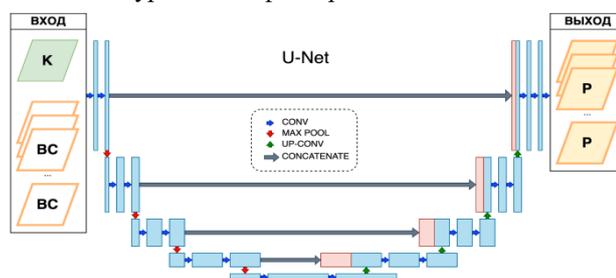


Рисунок 1 - Архитектура нейронной сети U-Net [3], реализованная в данной работе. Скрытые слои обозначены голубыми и розовыми прямоугольниками. Синими стрелками обозначены свёртки (CONV), красными стрелками - пулинг (MAX POOL), зелёными стрелками - обратные свёртки (UP-CONV), серыми стрелками - конкатенация (CONCATENATE). На вход подаются карта проницаемости (K) и граничные условия (BC) для каждого временного шага. На выходе для каждого временного шага выдаются давления (P).

Таким образом, физика фильтрации была включена в модель, и модель предсказывала поля давлений вокруг скважин, учитывая неоднородность пласта а также влияние других скважин. Пример динамики результирующих полей давлений во времени представлен на Рисунке 2.

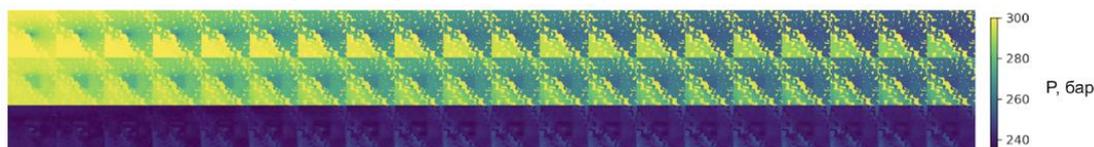


Рисунок 2. Примеры предсказанных полей давлений в зависимости от времени. Верхний ряд - настоящие поля давлений средний ряд - поля давлений, предсказанные нейронной сетью, нижний ряд - модуль разницы полей давлений.

В результате, средняя ошибка модели в каждой ячейке пространственного домена - 3.8 бар. Помимо точности, данная модель значительно ускорила расчёт: в среднем, она предсказывает поле давлений 3 миллисекунды, в то время как численный расчёт занимал 30 секунд. Такое ускорение использовалось в дальнейшем для решения обратной задачи - предсказания полей давлений всего нефтяного пласта.

Данная работа поддержана Аналитическим центром при Правительстве РФ (договор субсидирования 000000D730321P5Q0002, грант №70-2021-00145 от 02.11.2021).

Литература

1. Dake, L.P., Fundamentals of Reservoir Engineering. ELSEVEIR, AE Amsterdam, The Netherlands, 1985.
2. Song, S., Zhang, D., Mukerji, T., and Wang, N. Gansim- surrogate: An integrated framework for conditional geomodelling and uncertainty analysis. 2022. (<https://doi.org/10.31223/X5N357>)
3. Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. CoRR, abs/1505.04597, 2015. (<https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА СЛАБОУГАРМОНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОЙ ЦЕПОЧКИ: НАХОЖДЕНИЕ СКОРОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ВОЗМУЩЕНИЯ НА БОЛЬШИХ ВРЕМЕНАХ ПО НАЧАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ

Щербинин С.А.^{1,2}, Кривцов А.М.^{1,2}

*1 - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия
stefanshcherbinin@gmail.com*

С помощью подхода энергетической динамики [1] исследуется временная эволюция возмущения с конечной энергией в бесконечной моноатомной нелинейной одномерной решётке. Рассмотрение ограничивается случаем длинноволновых низкоамплитудных возмущений, поэтому в качестве модели используется цепочка α -FPU и её континуальная версия, описываемая уравнением Кортевега-де Фриза (KdV). Анализируется движение энергетического центра возмущения, величины, которая позволяет охарактеризовать положение возмущения в пространстве. Известно, что на больших временах любое возмущение в системе, описываемой уравнением KdV, трансформируется в набор солитонов, сохраняющих свою форму бесконечно долго, и расплывающийся «осциллирующий хвост». Солитоны выстраиваются один за другим, начиная с солитона с наибольшей амплитудой (он является самым быстрым) и заканчивая солитоном с наименьшей амплитудой (он является самым медленным), позади которого располагается движущийся в противоположную солитонам сторону осциллирующий хвост. Ясно, что все эти части исходного возмущения после распада не взаимодействуют. Энергетический центр любого солитона движется с постоянной скоростью, как и энергетический центр осциллирующего хвоста на больших временах. Таким образом, на больших временах любое энергетическое возмущение в системе, описываемой уравнением KdV, распространяется с постоянной скоростью.

С использованием двух интегралов движения уравнения KdV удаётся точно найти скорость энергетического центра изолированного возмущения на больших временах по начальной форме этого возмущения, если оно распадается только на солитоны (без осциллирующего хвоста). Наличие же осциллирующего хвоста, хоть и нарушает точность оценки, однако возникающая поправка оказывается мала.

Даётся физическая интерпретация двух рассмотренных интегралов движения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-11-00363.

Литература

1. Krivtsov, A.M.: Dynamics of matter and energy. Z. Angew. Math. Mech. 103, e202100496 (2023)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМАЛЬНОГО КОНТАКТА ШЕРОХОВАТОГО ШТАМПА С ДВУХСЛОЙНЫМ УПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ

Яковенко А.А., Горячева И.Г.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Нанесение различных покрытий на контактирующие поверхности тел является одним из эффективных способов улучшения трибологических свойств сопряжений. Однако моделирование взаимодействия тел при наличии промежуточных слоев представляет собой сложную задачу с точки зрения получения аналитического решения, особенно, если необходимо также учесть поверхностную шероховатость, свойственную всем реальным телам.

В настоящей работе рассмотрен контакт шероховатого сферического штампа и двухслойного упругого основания. С использованием приближения тонкого слоя [1] и введения функции дополнительной податливости [2] получено численно-аналитическое решение и исследовано влияние параметров слоя и шероховатости на номинальные и фактические контактные характеристики.

Поверхностная шероховатость штампа моделируется периодической системой одинаковых осесимметричных неровностей одинаковой высоты. Задача рассматривается на двух масштабных уровнях: микроуровень (размеру отдельной неровности) и макроуровень (размер номинальной области контакта). На микроуровне решается периодическая контактная задача, которая определяет распределение фактических контактных характеристики (контактные давления, площадь контакта), а также зависимость дополнительного смещения от номинального давления, которая затем используется для решения задачи на макроуровне. На макроуровне решение задачи сводится к нахождению функции контактного давления $p(r)$ из интегрального уравнения с нелинейным внеинтегральным членом.

В качестве примера, на рис.1 представлено распределение номинальных контактных давлений (обезразмеренных на характеристики полупространства $E'_2 = E_2/(1 - \nu_2^2)$) при внедрении гладкого и шероховатого штампов в упругий слой, лежащий на упругом полупространстве, и в упругое полупространство. Радиальная координата r обезразмерена на радиус номинальной области контакта a_0 в случае шероховатого штампа и двухслойного основания. Считалось, что модуль упругости слоя в два раза меньше модуля упругости полупространства. Из результатов следует, что наличие шероховатости и мягкого тонкого слоя ведет к снижению максимальных значений номинальных контактных давлений, а также к увеличению размеров номинальной области контакта.

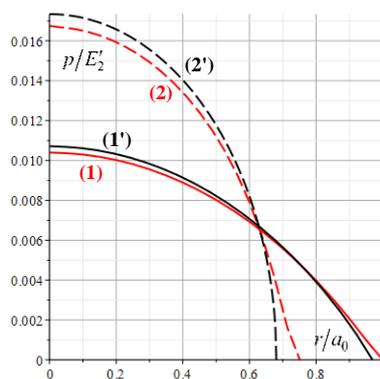


Рис. 1. Распределение контактных давлений $p(r)$ при внедрении шероховатого (1,2) и гладкого (1',2') штампов в упругий слой на упругом полупространстве (1,1') и в упругое полупространство (2,2').

Работа выполнена в рамках исследования по гранту РФФИ № 22-49-02010.

Литература

1. Г. П. Александрова // Контактные задачи изгиба плит, лежащих на упругом основании, МТТ, 1 1973. 97–106
2. G. Goryacheva // Mechanics of discrete contact, Tribol. Int., 39:5 2006. 381–386

ЭФФЕКТ НАРУШЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ С ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

Якуничков А.Н.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия
art-ya@mail.ru

В работе исследовалось, при каких условиях протекание химических реакций в газовой фазе может нарушить термодинамическое равновесие смеси и как это нарушение искажает результаты традиционного континуального моделирования химической кинетики. Для этого автором был разработан оригинальный подход, основанный на сравнении результатов моделирования химической кинетики на молекулярном и континуальном уровне. Для молекулярного моделирования использовался метод событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD), не требующий предположения о термодинамическом равновесии смеси, для континуального – традиционные методы континуального описания физико-химических процессов в газовой динамике (запись скорости химической реакции по закону действующих масс, а коэффициентов скорости – в форме Аррениуса).

Так как изучалось нарушение термодинамического равновесия, вызванное именно протеканием химических реакций, задачи ставились в 0-мерной постановке. В случае молекулярного расчета всегда решалась трехмерная задача с периодическими граничными условиями. Сначала были решены задачи с кинетическим механизмом, состоящим из одной реакции без тепловыделения. При континуальном подходе этот случай допускает аналитическое решение, которое использовалось для верификации как континуального, так и молекулярного решателя. Далее были рассмотрены одиночные реакции, но уже с тепловыделением или теплопоглощением. Ожидаемо, что наиболее сильно термодинамическое равновесие реагирующей смеси нарушается при значительном тепловыделении, но показано, что это возможно и в результате быстрых реакций без тепловыделения.

Результаты для одиночных реакций позволили сформулировать условия, при которых следует ожидать существенного нарушения термодинамического равновесия смеси в случае цепных кинетических механизмов. Этот анализ был применен к кинетическим механизмам горения водорода: из полных систем реакций были выделены характерные циклы и зацепляющиеся реакции, для которых следует ожидать существенного отличия результатов молекулярного и континуального подходов. Было проведено молекулярное и континуальное моделирование этих выделенных фрагментов кинетических механизмов. Сравнение результатов молекулярного и континуального моделирования показало, что предположение термодинамического равновесия смеси (использующееся при записи коэффициентов скоростей химических реакций в континуальном подходе) может принципиально исказить результаты моделирования не только по составу продуктов, но и по термодинамическим параметрам процесса.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова, вычислительных ресурсов МСЦ РАН и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-11-00117.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ И ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС

Якупов Н.М., Якупов С.Н., Гумаров Г.Г.

ИММ - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Россия
yzsrr@mail.ru

Современные конструкции работают в тяжелых эксплуатационных условиях. Они испытывают вибрационные нагрузки, находятся под воздействием магнитного поля Земли и остаточной намагниченности, находясь вблизи магнитных аномалий [1]. Наличие сред, механических и физических полей, вызывают

существенный коррозионный износ и деградацию элементов конструкций.

Известно, что на поверхности металла, находящегося в водной или другой среде, образуется тонкий защитный пассивирующий слой, разрушение которого приводит к коррозионному износу [2]. Среди факторов, влияющих на разрушение защитного слоя, можно отметить воздействие механических и физических полей. Известно влияние деформации поверхности на коррозию [3]. Влияние активного магнитного поля на процесс коррозии отмечено в [4]. При этом на процесс коррозии оказывает влияние направление силовых линий магнитного поля [5]. В работе приведены результаты исследований влияния механической вибрации и остаточной намагниченности на процесс коррозионного износа [6,7]. Для оценки степени коррозии образцов используется экспериментально-теоретический метод, разработанный в лаборатории НМО ИММ ФИЦ КазНЦ РАН.

Влияние вибрации. Исследовано влияние вибрации на коррозионный износ тонкостенных стальных элементов в водной среде. Выполнены две серии работ: тонкие круглые образцы из стали устанавливаются горизонтально и вертикально в емкостях со средой. Емкости размещаются на вибрирующей площадке, прикрепленной к компрессору. Образцы выдерживаются в течение заданного времени в водной среде при различных режимах работы компрессора. Зависимость «давление p - прогиб H » представлена на рис. 1. Установлено, что вибрация способствует более быстрому разрушению защитного пассивирующего слоя, образуемого в процессе коррозии, и тем самым способствует ускоренной коррозии.

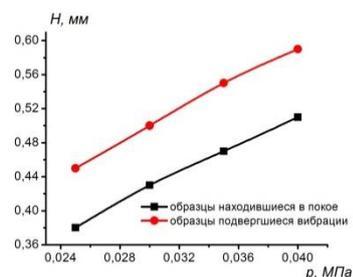


Рис. 1. Зависимость « p - H »

Влияние остаточной намагниченности. Приводятся результаты исследований влияния остаточной намагниченности MRN на коррозионный износ стальных образцов в водной среде. Рассмотрены три случая исходной намагниченности образцов. Зависимость «тангенциальная жесткость $V_{ср}$ - исходная намагниченность MRN» представлена на рис. 2. Впервые отмечено, что до критической намагниченности стальных образцов коррозия в водной среде уменьшается, а затем начинает расти.

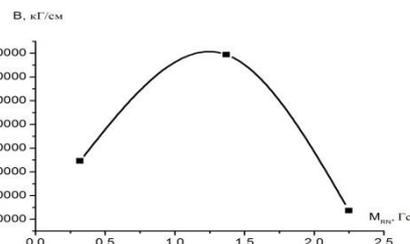


Рис. 2. Зависимость « $V_{ср}$ - MRN»

Выводы. Вибрация и остаточная намагниченность влияют на процесс коррозии. Обнаруженные эффекты имеют важное теоретическое значение при изучении явления коррозии с учетом наличия вибрации и исходной остаточной намагниченности, а также большое практическое значение, в частности, при проектировании и эксплуатации различных конструкций и сооружений из стали для их защиты от коррозионного разрушения

Литература

1. Кузьмин М.И., Катрич Н.М., Гумеров Р.Р. и др. // Нефтяное хозяйство. 2012. № 12. С.66-68.
2. Frumkin A.N. // Phys. Chem. 1932. V. 44. № 7. P. 116.
3. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // Пробл. прочности. 2012. № 2. С.76-84.
4. Yee Chin Tang, Davenport A.J. // J. Electrochemical. Soc. 2007. V. 154. No 7. P. 362-370.
5. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. // ДАН. 2015. Т. 463. № 6. С.684-686.
6. Якупов Н.М., Якупов С.Н. // ДАН, 2018. Т.479, №6. С.626-628.
7. Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гумаров Г.Г., Якупов Н.М. // ДАН. 2024. Т. 514. № 1. С.49-52. (в печати)

НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ЛОКАЛЬНЫМ УГЛУБЛЕНИЕМ

Якупов С.Н., Киямов Х.Г., Мухамедова И.З.

ИММ - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Россия
tamas_86@mail.ru

При проектировании конструкций идет процесс синтеза формы будущей конструкций и материала, из которого она будет изготовлена. При этом значение формы конструкции, по словам Эдуардо Торроха, имеет большое значение для обеспечения необходимой ее жесткости и прочности: “Лучшим сооружением является то, надежность которого обеспечивается главным образом за счет его формы, а не за счет прочности его материала...” [1]. В связи с этим возникает необходимость в надежных методах расчета конструкций любой формы. В работе [2] изложен эффективный двумерный метод расчета тонкостенных оболочечных конструкций сложной геометрии. Однако в двумерной постановке невозможно оценить уровень концентрации напряжений: в области несвязных локальных углублений и царапин; в области локального крепления контура и т.д. В статье [3] описано развитие идеи, изложенной в [2], для расчета массивных и тонкостенных элементов конструкций сложной геометрии трехмерными конечными элементами. Вопросы сходимости и достоверности результатов расчета по [2,3] рассмотрены в [4]. В данной работе рассмотрены вопросы моделирования циклических оболочек сложной геометрии с локальными углублениями трехмерными конечными элементами на базе [3]. Срединная поверхность оболочки (рис. 1) описывается циклической поверхностью [5], которая образуется движением окружности переменного радиуса вдоль направляющей кривой эллиптической формы. Частным случаем циклических оболочек является фрагмент тороидальной оболочки.

На первом этапе выполняется задачу параметризации: циклическая оболочка задается параметрами прямоугольного параллелепипеда и определяются координатные векторы, компоненты метрического тензора и символы Кристоффеля; при этом локальное углубление (рис. 2) задается эллиптической формы в дефектном элементе. На втором этапе рассматриваемая область параллелепипеда разбивается на конечные элементы и решение в каждом из них представляется в виде интерполяционного эрмитового кубического сплайна трех переменных. Разрешающие соотношения выводятся из вариационного уравнения Лагранжа.

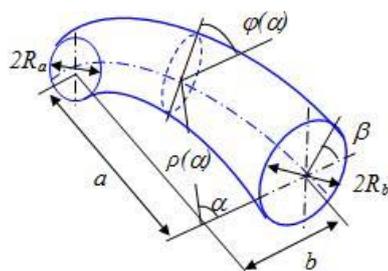


Рис. 1. Циклическая поверхность



Рис. 2. Область локального углубления

На базе разработанной численной модели выполнены отдельно расчеты циклических оболочек с дефектом в виде локального углубления, расположенного на наружной поверхности и на внутренней поверхности. Выявлены области концентрации напряжений при различных параметрах дефекта.

Идея параметризации всей области и аппроксимация искомых переменных кубическими сплайнами позволяет получать согласованные трехмерные конечные элементы. Разработанная численная модель позволяет определять НДС рассматриваемой оболочки и оценить уровень концентрации напряжений в дефектной области.

Литература

1. Демокрит в его фрагментах и свидетельствах древности / Под ред. и с комм. Г.К. Баммеля. М.: ОГИЗ, 1935. 382 с.
2. Якупов Н.М. // Исследования по теории оболочек. Тр. семинара. Казань: КФТИ КФАН СССР, 1984. В.17. Ч. II. С.4-17.
3. Yakupov S.N., et al.// Case Studies in Construction Materials. V.19, 2023, e02360.
4. N.M. Yakupov, H.G. Kiyamov, I.Z. Mukhamedova // Lobachevskii J. Math. 43 (5) (2022) 1218-1223
5. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 752 p.

НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В РЕШЁТКЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН В СВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ

Ялыч Е.С., Зимин Б.А.

БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия
ialych_es@voenmeh.ru

Существование в металлах свободных электронов никак не учитывается в теории упругости и термоупругости. Рассматриваются кристаллические среды со свободными носителями заряда. Примерами таких сред являются металлы и полупроводники [1]. На решётку в электрическом поле E действует некоторая сила, пропорциональная градиенту E . Соответственно при деформации решётки под действием силы, пропорциональной ∇E , в проводнике возникает ток, который при учёте принципа Онсагера пропорционален $\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z}$ (пьезоток) [2].

Из уравнений Максвелла и гидродинамики для электронов с учётом пьезотока для уравнений динамики решётки можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial t} + 4\pi J_p - 4\pi\beta_3 \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} &= 0, \\ \frac{\partial J_p}{\partial t} - \frac{\omega_p^2}{4\pi} E_z + \gamma_{ef} J_p &= 0, \\ \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \beta_3 \frac{\partial E_z}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad 1)$$

где ρ – плотность материала,

$(\lambda+2\mu)$ – модули Ламе,

ω_p – ленгмюровская частота для электронов,

E_z – напряжённость электрического поля,

J_p – ток в электронной плазме,

β_3 – коэффициент пропорциональности для $\beta_3 \nabla E_z$, действующей на решётку силы.

Дисперсионный анализ (1) указывает, что при наличии поля, вызывающего дополнительный дрейф электронов, акустическая волна в кристалле может стать плазменной волной раскачки.

Акустическая волна может стать нарастающей. Дополнительный дрейф носителей может быть обусловлен, например, наличием внешнего электрического поля, наличием разрушения структуры, что в свою очередь вызовет неустойчивость звуковой волны.

Литература

1. Пустовойт В.И. Взаимодействие электронных потоков с упругими волнами решётки // УФН, 1969, т. 97 (2), с. 257-306.
2. Sudenkov, Yu. V. and B. A. Zimin. "Effect of "the thermal piston" in a dynamic thermoelastic problem." International Journal of Heat and Mass Transfer 85 (2015): 781-786.

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

Абдулин И.М.	267	Богданов А.Н.	33
Абрамов А.Д.	131	Богданович Е.Е.	178
Абрамян А.К.	8	Бойко А.В.	34
Абу Даввас Я.	270	Бондарев Д.В.	105
Авдонушкин Д.В.	9, 157	Борисенков Б.С.	35
Агамиров В.Л.	52	Боровков А.И.	4, 157, 175, 220
Агамиров Л.В.	52	Боронин С.А.	113
Адамов А.А.	78	Боршевский С.А.	36
Айзикович С.М.	10	Бочкарев С.А.	138
Алгазин С.Д.	230	Братенков М.А.	221
Алексеев А.А.	39	Брюханов И.А.	210
Альтенбах Х.	3, 285	Букашкина О.С.	37
Андреев К.	65	Буковский П.О.	38
Андреева А.И.	10	Булгаков А.Н.	39
Антонова М.Н.	11, 16	Бурнаев Е.В.	211, 287
Антонова О.В.	12	Бут И.И.	40, 79
Антуфьев Д.В.	13	Бушманов О.Е.	27
Аронов П.С.	202	Быстров Н.Е.	269
Артамонов Д.И.	64	Быченков В.А.	187
Арутюнян А.Р.	14, 188, 215	Вадивасова Т.Е.	200
Архангельский Е.А.	34	Вакуленко С.А.	8, 41
Астапов Я.К.	15	Валиев Р.З.	16, 283
Астафьев И.А.	105	Валиев Р.Р.	16
Асфандияров Ш.А.	15	Валиев Х.Х.	121
Атрошенко С.А.	16	Вани М.Ф.	38
Аунг К.М.	140	Вановский В.В.	211, 287
Афанасьев А.А.	10	Варелджан М.В.	80
Ахметов Д.И.	287	Вареник К.А.	42
Ахунова А.Х.	17	Васильков С.А.	216
Аюпова Г.К.	18	Ваулина О.С.	141
Бабешко В.А.	3, 19, 76	Вахтерова Я.А.	42
Бабешко О.М.	3, 19, 76	Веденяпин В.В.	43
Бабушкин А.В.	20	Вельмисов П.А.	44
Бабушкина А.В.	20	Верезуб Н.А.	45, 195, 196
Баимова Ю.А.	17, 21, 130	Вестяк В.А.	46
Баймуратова А.Р.	178	Вилински-Мазур К.А.	132
Балабанов С.В.	240	Вильчевская Е.Н.	95, 285
Баландин Д.В.	92	Вин Ко Ко.	47
Банщикова И.А.	204	Виндокуров И.В.	78
Барсуков А.Р.	60	Витохин Е.Ю.	48
Бартоломей М.Л.	190	Вичужанин Д.И.	198
Басалов Ю.Г.	258	Власов А.Н.	121
Батура Н.И.	22	Вознесенская Н.В.	99
Баяндин Ю.В.	23	Волков А.Е.	26, 61, 75, 237
Бекежанова В.Б.	24	Волков А.И.	48, 49
Белов А.А.	100, 187	Волков И.А.	49
Белоусова О.Е.	268	Ворович Е.И.	247
Беляев А.К.	25, 233	Вуколов Е.А.	50, 75
Беляев С.П.	96	Вшивков А.Н.	190
Беляев Ф.С.	26, 61, 75, 237	Габдуллахатов А.И.	51
Белякова Т.А.	27	Гаврилов А.А.	66, 278
Белянкова Т.И.	247	Гаврилов С.Н.	52, 168, 284
Бердюгин Д.А.	28	Гаджимагомедов Г.Г.	22
Берестова С.А.	29, 207	Гасва А.П.	52
Беспалова А.С.	30	Галактионов Д.Е.	99
Бессонов Н.М.	21	Галанин М.П.	202
Бесчеров Д.Е.	31	Галанская Ю.Н.	22
Бирюков Д.А.	28	Галиев Р.Р.	27
Бобровницкий Ю.И.	109	Галкина Е.Б.	255
Бобылев С.В.	32, 283	Галяутдинова А.Р.	25
Богатенко Т.Р.	32	Гамаюнова Д.Ю.	154

Гандилян Д.В.	250	Епихин А.Д.	61
Гарифуллина Р.А.	53, 165	Епихин А.С.	40
Гачегова Е.А.	190	Ереев М.Н.	31, 144
Гендельман О.В.	115	Еремин А.А.	80
Генне Д.В.	60	Еремина Г.М.	81
Герасимов С.И.	53, 54, 83	Ермаков А.Д.	72
Гермамо А.Й.	55	Ермоленко О.А.	82
Герцен Т.А.	150	Ерофеев В.И.	83, 153
Гилёв Н.И.	24	Ерофеева И.В.	82
Гиниятуллин Р.Р.	56	Ершов А.Д.	84
Гладких Е.А.	117	Ефимов Е.А.	85
Глазков С.А.	61	Жамакочян К.А.	219
Глебов С.Г.	92	Жигарев В.А.	86, 162, 197
Глушков Е.В.	57, 58, 80, 82	Жигачёва Н.И.	120, 161
Глушкова Н.В.	57, 58, 80, 82	Жмайло М.А.	175, 220
Голосов А.М.	117	Жукова И.Н.	269
Голуб М.В.	59, 217, 262	Журавков М.А.	114
Голубев Ю.Ф.	158, 159	Заболотский А.В.	65
Гольх Р.Н.	60	Заворохин Г.Л.	87, 157
Горбаченко Д.Ф.	26, 61	Зайев Д.К.	118
Горбушин А.Р.	61	Зайцева О.Н.	178
Городилов Л.В.	267	Зайченко А.Ю.	219
Горынин А.Г.	62	Залевский Н.С.	115
Горынин Г.Л.	62	Занина Э.А.	264
Горячева И.Г.	5, 289	Зарецкая М.В.	3
Гращенко А.С.	63	Зарипов Р.Р.	104
Гребенников А.С.	15, 191	Захаров А.Ю.	87
Грекова Е.Ф.	64	Захаров П.В.	88, 172
Гречкин Б.В.	64	Звягин А.В.	89, 274
Грибкова М.С.	61	Земсков А.В.	89
Григорьев А.С.	65	Зеньков Е.В.	155
Грищенко А.И.	176	Зимин Б.А.	293
Груздков А.А.	66	Зиновьева Т.В.	25
Гузев М.А.	6, 72, 117, 212	Злобина Е.А.	90
Гузей Д.В.	66	Знаменская И.А.	91
Гульятёв В.И.	39	Зотов А.Н.	92
Гумаров Г.Г.	290	Зыков А.С.	53
Гуркина Н.Ю.	67	Зырянов Н.А.	93
Гуткин М.Ю.	68, 128, 162, 174, 281	Иванов А.М.	96
Далинкевич А.А.	258	Иванов М.Я.	97, 98
Дедова Д.В.	69	Иванов О.О.	283
Диваков А.К.	120, 161	Иванов П.С.	48, 99
Дигилов А.В.	70	Иванова А.Б.	94
Дмитриев А.И.	65, 71	Иванова Е.А.	95, 184
До Н.Д.	73	Ивановский А.В.	100
Добрянский В.Н.	71	Игумнов Л.А.	100, 187
Долов Т.Р.	100	Извеков О.Я.	101
Долуденко А.Н.	72	Ильичев А.Т.	102
Дорофеенко С.О.	167	Иртегов В.Д.	243
Дорошенко О.В.	217	Кабанова П.К.	103
Дроздов С.О.	74	Кадыйров А.И.	104
Дуарте М.	37	Казаринов Н.А.	16
Дугин Д.И.	61	Казачек Н.Е.	105
Дьяченко С.В.	119	Казачек С.В.	105
Евард М.Е.	26, 50, 61, 75, 237	Калинин В.А.	221
Евграфова А.В.	75	Калинин Д.А.	105
Евдокимов В.С.	3, 19, 76	Калмыков А.П.	53, 54
Евдокимова О.В.	3, 19, 76	Канцырев Б.Л.	106
Евстифеев А.Д.	16	Капинос С.А.	54
Егоров Д.К.	77, 132	Капшуков Л.М.	106
Еленская Н.В.	78	Карамов Р.И.	107
Елистратов С.А.	79	Карасева У.П.	108
Еникеев Н.А.	283	Карнет Ю.Н.	121

Карпов И.А.	109	Лепешкин А.Р.	140
Карра Ж.-Б.	60	Лисенкова Е.Е.	83
Каштанова С.В.	110	Лисин Е.А.	141
Келлер И.Э.	78	Лисина И.И.	141
Кириллов Б.А.	132	Литвинчук С.Ю.	49
Киселев А.Б.	111	Лобачев М.И.	116, 142
Киселев А.П.	112	Лобовиков Д.В.	143
Киселев Ф.Б.	113	Лобода О.С.	183
Киямов Х.Г.	291	Логинов Д.П.	111
Клименко Л.С.	156	Лозовой В.В.	76
Клименко Ю.Т.	113	Локтева Н.А.	36
Климкович Н.М.	114	Ломов С.В.	107
Ковалева М.А.	115, 116	Лонин К.А.	144
Ковалёва М.А.	236	Лукин А.В.	13, 15, 144, 189, 224, 248, 253
Кожанова П.А.	116	Лукьяшко О.А.	268
Кожевников Е.В.	117, 212	Лупанов В.Г.	203
Козик А.Е.	61	Луцкий А.Е.	145
Колаян Ю.М.	118	Льжов В.А.	282
Колесникова А.Л.	68, 128, 174	Лысакова Е.И.	162, 230
Коломенский Д.С.	77, 132	Лысенко А.М.	146, 214
Колчанов Н.В.	156	Лычёв А.С.	148
Колыванов А.Ю.	119	Лычев С.А.	147
Коновалов Г.В.	120, 161	Лычёва Т.Н.	149
Константиновская Т.В.	145	Любимова Н.Ю.	150
Коптев А.В.	120	Ляжков С.Д.	35, 151
Корнев Ю.В.	121	Лямина Е.А.	152
Корнеев В.Г.	122	Ляховский В.	181
Корнеев И.А.	200	Май Куок Чиен	241
Коробенков М.В.	123	Майер А.Е.	203
Коровайцева Е.А.	199	Майер П.Н.	203
Короленко В.А.	235	Макарушкин Д.В.	104
Корянов В.В.	159	Мальханов А.О.	153
Косьянчук В.В.	124	Манухина К.Д.	190
Кочкин А.С.	88	Маняхин И.А.	60
Кравченко М.Н.	125	Маркеев А.П.	153
Кравчинский С.А.	126	Марков В.В.	98
Крайнов А.Ю.	126, 127, 165, 166	Марков Н.С.	8, 93
Красницкий С.А.	128, 232, 281	Марковский А.Н.	154
Кривцов А.М.	21, 131, 288	Мартиросов М.И.	46, 69, 264
Кривцова А.А.	129	Мартыненко С.И.	167
Крылова К.А.	130	Марчук Н.А.	155
Кудряшов Н.А.	135, 177	Марышев Б.С.	75, 156
Кудряшова О.Б.	131	Маслов Л.Б.	175, 220
Кузин С.А.	48	Маслов М.Г.	31
Кузнецов В.Г.	56	Маслов С.А.	172
Кузькин В.А.	18, 84, 118, 131, 182, 246	Матвеев К.А.	223
Кузьмин А.А.	132	Матвеева А.И.	9, 157
Кузьмин В.А.	53	Матвеев В.П.	138, 255
Кукушкин С.А.	63, 133, 179	Матыгулина Е.В.	143
Куликов Д.А.	31	Мацковский А.А.	87, 157
Куртц Ю.	32	Мелкумова Е.В.	158, 159
Кутуков А.А.	135	Меркулов Д.И.	160
Кучмин А.Ю.	161	Меркулова И.И.	160
Кучумов А.Г.	217	Метрикин В.С.	276
Лаврова С.Ф.	135	Мещеряков Ю.И.	120, 161
Ларченко В.П.	125	Мизин С.В.	97
Ле Ван Хао	89	Микаелян К.Н.	162
Левин В.А.	98	Минаков А.В.	66, 86, 162, 197, 230, 278, 279
Ледков А.С.	136	Минаков В.Д.	60
Ледкова Т.А.	137	Миньков Л.Л.	127
Лекомцев С.В.	138	Миронов М.А.	163
Леонтьев В.Л.	139	Митрофанов А.А.	165
Леонтьева А.В.	153	Михайлова Н.В.	164

Михеев Е.В.	53, 165	Порошин И.О.	284
Моисеева К.М.	165, 166	Порубов А.В.	192
Молоканов А.А.	167	Порфирьев М.С.	31
Мордасова Е.А.	68	Посохова С.Д.	116
Морозов Н.Ф.	16	Посудневская А.О.	72
Мосягина А.А.	48	Потапов А.Г.	193
Мочалова Ю.А.	52, 168, 284	Привалова О.В.	144
Мошаров В.Е.	61	Прозорова Э.В.	194
Мошин А.А.	169	Прокофьев В.В.	34, 194
Мулляджанов Р.И.	221	Просвиряков Е.Ю.	29
Муравицкая Л.А.	280	Простомолотов А.И.	45, 195, 196
Муромцев Д.Н.	121	Пряжников А.И.	197
Мухамедова И.З.	291	Пряжников М.И.	86, 197, 230
Мыльников В.В.	170	Пугачева Н.Б.	198
Мюллер В.	95	Пшеничных С.Г.	199
Наймарк О.Б.	171, 202	Пятаков П.А.	163
Налетова В.А.	160	Рабинский Л.Н.	69
Нарсеев А.С.	88, 172	Радченко В.Н.	61
Натяганов В.Л.	172, 173	Ракишева И.О.	217
Нгуен Ван Туен	174	Рамазанов И.Р.	200
Нежинская Л.С.	175	Редьков А.В.	201
Некрасов Д.А.	169	Реснина Н.Н.	96
Нечаева А.В.	67	Ржонсницкий А.В.	110
Никитюк А.С.	202	Ривис Н.М.	28
Никифорова И.В.	276	Ридель А.А.	53
Никишин А.П.	176	Риккерт В.	95
Николайчик М.А.	114	Ровойой Э.	12
Нифонтов Д.Р.	135, 177	Роготнев А.А.	202
Новокшенов А.Д.	9, 116, 126, 142, 157	Родин А.С.	202
Нуриев А.Н.	178	Родионов Е.С.	203
Нуруллаев Э.М.	150	Родюшкин В.М.	82
Оберемок А.А.	127	Рожков М.А.	232
Ожгихин И.П.	20	Романенко Е.И.	204
Осеев В.Г.	48, 99	Романов А.В.	205
Осипов А.В.	133, 179	Романов А.Е.	68, 128, 174, 206
Очеретяный С.А.	194	Романовская Е.М.	29, 207
Павилайнен Г.В.	180	Ромашин С.Н.	285
Павлов Ю.В.	181	Рощева Т.А.	207
Павлова А.В.	242	Ру Ж.-Н.	209
Пантелеев И.А.	181	Рубаник В.В.	96
Панфилов И.А.	10	Рубаник мл. В.В.	96
Патрушев В.Л.	144	Рублев И.А.	208
Пашкин В.Д.	18, 182	Рубцов С.Е.	242
Пашковский Д.М.	183, 184	Руссков А.А.	43
Пелевина Д.А.	160	Рыжак Е.И.	209
Первислов С.Н.	185	Рябинина А.Ю.	210
Перель М.В.	186	Рябов А.А.	211
Петров А.Н.	100, 187	Рябокоть Е.П.	117, 212
Петров П.С.	157	Рязанцева М.Ю.	253
Петров Ю.В.	11	Сабирова О.С.	249
Петручок А.И.	188	Савватимова П.Р.	146, 214
Пигусов Е.А.	48	Савёлова К.Э.	272
Пикалов Р.С.	189	Савина Е.А.	207
Пипия Г.Т.	263	Савина Я.Н.	16
Пискун Н.В.	189	Савицкий О.А.	163
Плехов О.А.	190	Савчук Д.В.	31
Погорелко В.В.	203	Сайтова Р.Р.	215
Подлесный Д.Н.	219	Сайфуллин Д.Д.	216
Полеткин К.В.	224, 248	Сайченко Н.Д.	217
Полянский В.А.	67, 222	Саламатин А.А.	218
Пономарева С.Н.	191	Салганская М.В.	219
Попов И.А.	13, 15, 144, 189, 224, 248	Салганский Е.А.	219
Попович С.С.	91	Салех Л.О.А.	263

Самоловов Д.А.	18, 118, 182	Топейцев Г.В.	194
Саркисян Л.С.	219	Травников В.А.	221
Саркисян С.О.	219	Третьяков Д.А.	245
Сафиева Р.З.	125	Трофимов А.М.	269
Сафина Л.Р.	130	Троценко Д.И.	201
Сафронова А.А.	220	Трунова И.Н.	21, 246
Сахаров А.Н.	210	Турбаков М.С.	117, 212
Сахаров Д.И.	221	Турков В.А.	160
Сволфс Й.	107	Турчин А.С.	247
Седова Ю.С.	222	Тюренкова В.В.	275
Селиванов Ю.С.	223	Уафа С.Б.	3, 19, 76
Селин Н.А.	224	Удалов П.П.	224, 248
Селютина Н.С.	225, 261	Уздин А.М.	249
Сергеев К.С.	32	Умнов В.В.	183
Сергейчев И.В.	107	Урсуленко Н.С.	201
Сердюк Д.О.	89, 225	Устинов К.Б.	250
Середкин А.В.	221	Уткин А.А.	251
Сероваев Г.С.	255	Фан Т.Ш.	252
Сибгатуллин И.Н.	79	Фарманян А.Ж.	253
Сиваков Н.С.	226	Федоренко Р.В.	253
Сидоренко В.В.	228	Фёдоров А.Ю.	255
Сизиков В.С.	229	Федорова М.Ю.	249
Силов В.Ю.	53, 165	Федотенков Г.В.	42, 225, 252
Синицын А.А.	230	Федюшкин А.И.	254
Синюхина С.В.	209	Филатов Е.В.	194
Скоробогатова А.Д.	230	Филиппенко Г.В.	256
Скрипка Н.А.	217	Фимин Н.Н.	43
Слепнев А.В.	200	Фоменко С.И.	59, 257
Слюняев А.В.	231	Фомин Л.В.	258
Смагин Е.И.	46	Фортова С.В.	72
Смирнов А.М.	128, 232, 281	Фрейдин А.Б.	94, 103, 108, 208, 259, 286
Смирнов В.В.	236	Фролов В.А.	55, 260
Смирнов И.В.	164	Фролова Е.А.	52
Смирнов Н.Н.	233	Хайретдинова Д.Д.	261
Смирнов С.А.	233	Халиуллина А.С.	218
Смирнова М.Н.	275	Ханазарян А.Д.	262
Смолин А.Ю.	81	Хасанов М.М.	7
Соловьев С.А.	144	Хлопин С.В.	263
Соломонов Д.Г.	234	Хомченко А.В.	264
Соляев Ю.О.	71, 235	Храмов Д.А.	265
Сорокин С.А.	236	Храмцов Д.П.	169
Стамов Л.И.	275	Цаплин В.А.	131
Стародубова М.С.	75, 237	Цветков М.В.	219
Старостенкова М.Д.	172	Цветкова Ю.Ю.	219
Степанова И.В.	238	Цгоев Ч.А.	221
Стрелкова Г.И.	32	Циркунов Ю.М.	265
Судьенков Ю.В.	188	Цыкунов О.И.	266
Суханов А.А.	233, 239	Чаньшев А.И.	267, 268
Сушников В.А.	263	Чеботарев С.Д.	269
Сычев М.М.	185, 240, 280	Чеврычкина А.А.	270
Тамарова Ю.А.	44	Чекмарев Д.Т.	270
Тарасенко Ф.Д.	175	Черенькая Л.В.	263
Тарлаковский Д.В.	73, 241, 253	Чернова А.А.	271
Таташев А.Г.	241	Черныш Е.В.	6
Ташкинов М.А.	78	Чернышов М.В.	272
Телятников И.С.	242	Чесноков А.А.	273
Темнов А.Н.	47	Чечеткин В.М.	43
Титоренко Т.Н.	243	Чирков В.А.	216
Тихонов В.С.	37	Чугайнова А.П.	274
Тлеуленов Р.Р.	166	Чугунов С.С.	77
Товстик Т.П.	244	Чудаков А.Я.	22
Токталиев П.Д.	167	Шайхулов Р.М.	100
Томилина Т.М.	15, 146, 191, 214	Шалагаев В.В.	67

Шалев Э.	181	Шоркин В.С.	285
Шалунов А.В.	131	Штегман В.О.	286
Шамина А.А.	89, 274, 275	Штукин Л.В.	144, 248
Шапошников Д.Е.	276	Шугуров А.Р.	71
Шатров А.В.	277	Шуляпов С.А.	163
Шведов И.Н.	104	Шумилин С.С.	211
Шебелев А.В.	162, 278, 279	Шутов Г.М.	287
Шебелева А.А.	278, 279	Щербинин С.А.	53, 165, 288
Шевченко А.В.	280	Эрбаш Б.	186
Шевченко В.Я.	185, 240, 280	Юделевич А.М.	99
Шевчук Р.Э.	281	Юдин Е.В.	8, 93
Шейдаков Д.Н.	282	Юдинцева А.И.	49
Шейнерман А.Г.	32, 162, 283	Явич Н.Б.	211
Шелехов Н.Э.	106	Яковенко А.А.	289
Шепелев И.А.	51, 64	Якунчиков А.Н.	290
Шефер И.А.	24	Якупов Б.А.	164
Шехмаметьев Р.М.	217	Якупов Н.М.	56, 290
Шилько Е.В.	65	Якупов С.Н.	290, 291
Широков А.Н.	39	Якуш С.Е.	226
Шитикова М.В.	30	Ялыч Е.С.	293
Шишаева А.С.	283	Янковская У.И.	172
Шишкина Е.В.	52, 168, 284	Яшина М.В.	241