

**ОТЗЫВ официального оппонента на диссертацию на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
Артамоновой Нины Брониславовны на тему:
«Численная реализация модели Био при больших деформациях»
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»**

Актуальность темы исследования. При строительстве зданий и инженерных сооружений нередко в качестве грунтов оснований являются водонасыщенные грунты, среди которых встречаются и слабые грунты. Примером слабых водонасыщенных грунтов могут служить грунты Эмеретинской долины, где были построены олимпийские объекты г. Сочи. Следует отметить, что уплотнение водонасыщенных дисперсных грунтов под нагрузкой, как правило, носит нелинейный характер. Эта нелинейность проявляется как в виде больших деформаций (геометрическая нелинейность), так и в виде пластических деформаций (физическая нелинейность). Поэтому разработка нелинейной модели поведения водонасыщенных материалов под нагрузкой, а именно, модели консолидации, которая учитывает не только упругое, но и его упругопластическое поведение, сопровождающееся изменением пористости и проницаемости, является актуальной задачей в различных областях хозяйственной деятельности человека. Это очень важная задача, например, при определении осадок, относительной разности осадок и кренов зданий и сооружений, а в дорожном строительстве – для определения деформаций автомобильных дорог и железнодорожных полотен. Также эта модель может быть использована в медицине для оценки степени тяжести механических травм человека с целью выбора стратегии последующего лечения при сильных ушибах или травмах головного мозга. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной и практически важной.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и трех приложений. Общий объем работы 157 страниц.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна, теоретическая и

практическая значимость, методология и методы исследования, перечисляются основные результаты и положения, выносимые на защиту, достоверность и обоснованность результатов, а также приводятся сведения об апробации работы и о структуре диссертации, дается краткий обзор диссертационной работы по главам. Во **введении** также приводится обзор публикаций по теме исследования, причем его продолжение распределено далее по главам.

В **первой главе** изложен вывод уравнений физически и геометрически нелинейной связанной модели консолидации. Дифференциальная постановка записана из общих законов сохранения механики сплошной среды и закона фильтрации Дарси с применением пространственного усреднения по представительному элементу объема. Уравнения фильтрации и изменения пористости сформулированы в лагранжевых координатах твердого каркаса с использованием относительной скорости движения жидкости в соответствии с методом ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Для численной реализации решения задачи методом конечных элементов автором диссертации была получена линеаризованная вариационная постановка задачи консолидации.

Во **второй главе** описывается алгоритм решения связанной задачи консолидации и приводятся результаты численного моделирования. Для решения системы уравнений модели консолидации используется обобщение неявной схемы с внутренними итерациями на каждом шаге по времени по методу Узава. Проведен анализ устойчивости решения линейной седловой задачи при аппроксимации гексагональными 8-и узловыми элементами приращений перемещений и порового давления (Q1-Q1) и гексагональными 20-и узловыми элементами приращений перемещений и 8-и узловыми элементами порового давления (Q2-Q1). Анализ устойчивости решения показал, что при аппроксимации линейной седловой задачи консолидации конечными элементами Q1-Q1 решение неустойчиво, возникают осцилляции порового давления, а при аппроксимации конечными элементами Q2-Q1 решение задачи устойчиво. В этом случае при использовании конечных элементов Q1-Q1 может помочь стабилизация задачи с помощью регулирования соотношения τ/h^2 , определяющего устойчивость решения, где

h – шаг сетки, а τ – шаг по времени. Приводятся примеры расчета нелинейной связанной задачи консолидации для гиперупругих материалов, упругие потенциалы которых описываются моделями Сен-Венана-Кирхгофа, Муни, Муни-Ривлина и Трелоара. Проведенные расчеты показали, что использование потенциала Сен-Венана-Кирхгофа приводит к некоторой неустойчивости решения. Это связано с тем, что потенциал Сен-Венана-Кирхгофа корректно описывает поведение материала только для деформаций до 5-10%, в то время как потенциалы Муни, Муни-Ривлина и Трелоара могут применяться для описания деформирования гиперупругого материала при больших деформациях ($>10\%$). При этом отметим, что для материалов аналогичных резинам, по данным экспериментальных исследований лучшую точность аппроксимации при деформации $\sim 20\%$ показывают потенциалы Муни и Трелоара, а потенциал Муни-Ривлина при этом менее точен, его целесообразно использовать при деформациях ($>40\%$). Исследовано влияние учета геометрической нелинейности и изменения пористости и проницаемости на расчетные значения порового давления. Это исследование показало, что учет уменьшения пористости и коэффициента фильтрации в расчетах напряженно-деформированного состояния при сжимающих нагрузках приводит к увеличению порового давления в сравнении со случаем постоянных значений пористости и коэффициента фильтрации. Рост порового давления происходит из-за того, что вода зажимается в суживающихся порах и не может быстро отфильтровываться при уменьшении проницаемости. Разработанная модель была применена для описания процесса деформирования биологических материалов, насыщенных кровью и плазмой, моделирующих головной мозг, в рамках модели теории упругости. Также решена модельная задача об упругопластическом деформировании пористого водонасыщенного грунта. Для моделирования определяющих соотношений использовалась деформационная теория пластичности.

Третья глава посвящена оценке эффективных деформационных характеристик грунтов (в том числе и скальных), тензора передачи порового давления (параметра Био) и тензора расширения при замерзании свободной

воды на основе асимптотического метода усреднения дифференциальных уравнений с периодическими быстро осциллирующими коэффициентами. В соответствии с методом асимптотического усреднения задача определения вышеперечисленных свойств диссертант свел к решению соответствующих периодических задач на ячейке. Так как структура грунтов не удовлетворяет условию периодичности, то для корректного решения задачи необходимо в качестве ячейки периодичности брать представительный элемент объема. Как правило, представительный элемент объема имеет сложную для численной реализации структуру. Поэтому для упрощения задачи диссертантом было введено новое «обобщенное» определение представительной объема (области), меньшего по размеру, чем представительный объем, соответствующий классическому определению. В представлении диссертанта, согласно этому определению, области являются представительными, если точки соответствия какого-либо эффективного свойства (модуля Юнга или коэффициента Био) и пористости ложатся на одну кривую. В соответствии с новым определением представительного объема периодические задачи на ячейке были сведены к краевым, решая которые диссертант исследовала зависимости эффективных упругих модулей и параметра Био от пористости. Результаты расчетов модуля общей деформации (модуля Юнга) с использованием метода асимптотического усреднения показали хорошее соответствие с результатами экспериментальных исследований. Отметим также, что диссертантом были самостоятельно разработаны алгоритмы определения тензора передачи порового давления и тензора расширения при замерзании.

В **заключении** сформулированы основные полученные результаты и общие выводы по диссертации.

В **приложениях** приводятся более детально выводы уравнений модели консолидации.

Основные результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем и обладающие новизной:

1) Сформулирована математически обоснованная и численно реализована в программном коде, разработанным диссертантом, достаточно общая

формулировка задачи совместного деформирования пористой среды с протекающей через поры жидкостью в рамках физической и геометрической нелинейности. Постановка задачи выведена в скоростях перемещений твердой фазы и давления жидкости в дифференциальном и вариационном видах.

2) Переформулированы уравнения фильтрации и изменения пористости в лагранжевых координатах твердого каркаса с использованием относительной скорости движения жидкости в соответствии с ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) подходом.

3) Показано, что учет геометрической нелинейности приводит к заметному снижению расчетных значений порового давления, а учет изменения пористости и проницаемости материала – к существенному увеличению величин порового давления на начальном этапе процесса консолидации.

4) С использованием метода асимптотического усреднения примененного к уравнениям, описывающим процесс консолидации насыщенной жидкостью пористой среды и процесс пучения пористой водонасыщенной среды при замерзании, получены локальные задачи для определения параметра Био и тензора расширения соответственно.

5) Данное диссертантом «обобщенное» определение представительной области позволяет вычислять эффективные свойства среды на областях меньшего размера, нежели представительный элемент объема.

Достоверность результатов обоснована использованием строгих математических методов из областей математического и функционального анализа, теории дифференциальных уравнений и математической физики, классических методов механики сплошных сред и подтверждается хорошим соответствием результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований.

По тексту диссертации имеются незначительные замечания:

1. В диссертации в отношении структуры грунтов встречается терминологическая неточность, а именно, иногда вместо термина «скелет грунта» используется термин «каркас грунта» (стр. 20).

2. На стр. 39 допущена неточность в выражении, где написано: «Движение материальной частицы φ_t ...», – откуда обозначение φ_t воспринимается как обозначение частицы, хотя это отображение, описывающее движение частицы. Также на стр. 60 допущена неточность, где написано, что матрица $\mathbb{B} > 0$.
3. В левой части формулы (1.7.7) допущена опечатка – вместо полной производной стоит частная производная (стр. 40).
4. На стр. 50 написано, что в определяющих соотношениях (1.9.7) могут использоваться: гиперупругий материал и гипопругий материал. Причем к случаю гипопругого материала относится теория пластического течения или деформационная теория пластичности при отсутствии смены нагрузки и разгрузки. Если в деформационной теории пластичности при отсутствии смены нагрузки и разгрузки можно пользоваться соотношениями, описывающими гипопругий материал, то в теории пластического течения нельзя, т.к. в ней необходимо учитывать ещё и траекторию нагружения.
5. На стр. 65 написано, что «как видно из (2.3.7), конечные элементы для аппроксимации перемещений скелета и давления воды должны быть разными». Это слишком категоричное утверждение, что и подтверждается следующим ниже текстом о возможности использования элементов Q1-Q1 при соблюдении условия $\tau/h^2 > const$. Также можно использовать элементы Q2-Q2.
6. Непонятен смысл изложения модели пластического течения для описания упругопластического деформирования (см. параграф 2.6, раздел «*Определяющие соотношения упругопластического деформирования грунта*»), если она не используется в диссертации, а используется модель деформационного типа.

В заключение следует отметить, что диссертационная работа выполнена качественно и на высоком уровне, а указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационная работа оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, автореферат правильно и полной мере отражает содержание диссертации.

Таким образом, соискатель Артамонова Нина Брониславовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

Доктор технических наук,

ВРИО директора ИМПРИМ РАН,

Зав. отделом механики структурированной

ВЛАСОВ Александр Николаевич

17.11.2020г.

подпись

Контактные данные:

тел.: +7(915) 414 44 38, e-mail: bah1955@yandex.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Адрес места работы:

125040, (Россия) г. Москва, Ленинградский проспект, д. 7, стр. 1

ИПРИМ РАН

Тел.: +7 (495) 946-18-06; e-mail: iam@iam.ras.ru

Подпись сотрудника ИПРИМ РАН

А.Н.. Власова удостоверяю

Ученый секретарь



Ю. Н. Карнет