Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Самарский государственный технический университет

Материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи»

(17-19 сентября 2024 г., Самара, Россия)

Том 2

Под редакцией В. П. Радченко

Содержание

<i>Мажеихова М. Г.</i> "Обобщенная краевая задача для дифференциального уравнения дробного порядка"	7
<i>Маковецкий В. И., Ситник С. М.</i> "Аналоги второго интеграла Сонина для различных типов функций Миттаг—Леффлера и их приме- нение в моделировании задач механики сплошной среды"	10
Максимова Е. А. "Решение задачи Коши для гиперболической си- стемы <i>n</i> уравнений со слабосингулярными характеристиками"	13
<i>Мамадалиев Н. А., Бекниязов А. Е.</i> "Задача преследования для дифференциально-разностных игр"	16
<i>Масаева О. Х.</i> "Задача Дирихле для обобщенного уравнения Пуассона в полуполосе"	20
<i>Миронов А. Н.</i> "Постановка задач Дарбу для уравнений Бианки".	23
<i>Мурашкин Е. В., Радаев Ю. Н.</i> "Об оценках кривизны материальных волокон при асимметричной деформации микрополярного упругого тела в терминах определяющей микродлины"	26
<i>Мустапокулов Х. Я.</i> "Дифференциально-разностные игры преследования с интегральными ограничениями на управления игроков"	29
<i>Небогина Е. В.</i> "Исследование диссипативных свойств материала при упругопластическом деформировании на основе структурной модели среды"	33
<i>Немировский Ю. В., Федорова Н. А.</i> "Примеры решения обратных задач слоисто-волокнистых плоских конструкций с криволинейным армированием"	38
Огородников Е. Н., Унгарова Л. Г., Чемерская Л. С. "Мате- матические модели наследственно упругого тела и решения задачи од- ноосной ползучести"	41
Орипов Д. Д., Уринов А. К. "Исследование одной начально-гра- ничной задачи для вырождающегося уравнения в частных производных высокого четного порядка"	46
Осман А. "Перепутанные состояния в нелинейной двухкубитной мо- дели"	49
<i>Осянина Л. В.</i> "Моделирование и идентификация процессов теплооб- мена котлоагрегата"	53
Павлов В. Ф., Вакулюк В. С., Лунин В. В., Морозов А. Ю., Коваль И. Ю. "Исследование влияния вида концентратора напряже- ний на многоцикловую усталость поверхностно упрочненных образцов"	57
Паровик Р. И. "Математическое моделирование микросейсмических колебаний с помощью динамической системы Селькова с переменными коэффициентами и наследственностью"	61
Паршин Е. И. "Упрощённая математическая модель оптического дат- чика водорода"	64

Петросян А. С. "Теоремы существования и единственности для одного класса нелинейных интегральных уравнений в критическом случае"	68
Попов Н. Н. "Решение плоской нелинейной стохастической задачи пол- зучести с учетом упругих деформаций"	71
Радченко В. П., Саушкин М. Н., "Решение теоретико-экспери- ментальных задач формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях в Самарской научной школе".	77
Радченко В. П., Саушкин М. Н., Шишкин Д. М. "Решение зада- чи реконструкции полей остаточных напряжений в поверхностно упроч- нённом призматическом образце с несквозной поперечной V-образной трещиной в упругопластической постановке"	79
Сабитов К. Б. "Начально-граничная задача для уравнения колебаний круглой пластины, жестко закрепленной по краю"	86
<i>Савинова Е. В.</i> "Исследование несвязанных термоэлектроупругих по- лей в жестко закрепленной круглой пластине"	89
<i>Савинова Е. В.</i> "Исследование связанных термоэлектроупругих по- лей в шарнирнозакрепленной круглой пластине"	95
Сайфулин М. Ж. "Использование псевдослучайных последователь- ностей с асимметричным алфавитом для корреляционной обработки хро- матографических данных"	101
<i>Сайфулин М. Ж.</i> "Моделирование псевдослучайных последовательностей Лежандра с асимметричным алфавитом"	104
Самарин А. Ю. "Динамика взаимодействующих квантовых частиц"	107
Сараев Л. А. "Моделирование стохастических фазовых превращений в нестабильных материалах"	110
Сараев Л. А., Юкласова А. В. "Стохастические траектории дина- мики развития объемов валового регионального продукта и объемов ре- гиональных производственных ресурсов"	119
Сергиенко Д. Ф., Паровик Р. И. "Компьютерное моделирование высокочастотной геоакустической эмиссии"	126
<i>Скалько Ю. И., Гриднев С. Ю.</i> "Математическая модель с неотра- жающими граничными условиями"	129
Смольков М. И., Крутов А. Ф., Фролов М. А. "Дескриптор трёх- периодических поверхностей на основе оператора Лапласа—Бельтрами"	132
Степанова Л. В., Фомченкова М. А. "Теоретические и конечно- элементные решения механики разрушения анизотропных сред"	136
Стрелков К. С. "Использование аналитических моделей для определения параметров поверхности уплотнения резьбовых соединений класса «Премиум»"	140
Стрелков К. С., Попов А. Л. "Определение контактного давления на уплотнительной поверхности премиальных резьбовых соединений при помощи аналитических моделей"	144

<i>Тупоносова Е. П., Голованов П. А.</i> "Разработка методики степенной и корреляционной идентификации процесса кадрового обеспечения нефтяной отрасли"	148
<i>Тупоносова Е. П., Еремеева А. А.</i> "Регрессионные и динамические модели кадрового обеспечения промышленной структуры"	152
<i>Турдиев Х. Н, Усмонов Д. А.</i> "Нелокальная задача для дробно- временного телеграфного уравнения с дробной производной Прабхакара"	" 156
Узденова А. М., Узденов М. Х., Ханфенова С. А. "Математическая 2D-модель сверхпредельного переноса ионов в трехслойной электромембранной системе в гальванодинамическом режиме"	159
<i>Устинов К. Б., Гандилян Д. В.</i> "О граничных условиях в задачах о деформировании тонких пластин"	163
Фомин Л. В., Далинкевич А. А., Басалов Ю. Г. "Длительное разрушение составного растягиваемого стержня в условиях ползучести и влияния активной среды"	166
Хаецкий П. В. "Математическая модель напряженно-деформирован- ного состояния после двухстороннего упрочнения призматических об- разцов"	170
Хайруллаев У. Б., Темирова С. Б. "Приближенное решение краевых задач для параболо-гиперболического уравнения дробного порядка с оператором Капуто"	175
Хачатрян Х. А. "О конструктивной разрешимости одного класса нелинейных интегральных уравнений Гаммерштейна—Волтерра"	178
Цветков В. В. "Виртуальная пуско-наладка в системах автоматиче- ского управления гидроагрегатами"	181
Шляхин Д. А., Юрин В. А. "Исследование неосесимметричного тер- моэлектроупругого состояния длинного пьезокерамического цилиндра в несвязанной постановке"	185
Шляхин Д. А., Юрин В. А. "Неосесимметричная задача термоупру- гости для длинного анизотропного цилиндра"	190
Эргашева С. Б. "Задача с комбинированными условиями Трикоми, Франкля и Бицадзе—Самарского для уравнения смешанного типа"	194
Яковлева Ю. О. "Решение задачи Гурса для одной системы диф- ференциальных гиперболических уравнений третьего порядка методом Римана"	197
Litvinov V. L., Litvinova K. V. "Mathematical modeling of stochastic oscillations of a viscoelastic rope with a moving boundary"	200
Mamanazarov A. O. "Inverse source problem for the heat equation with the space-dependent non-local operator"	202
Shorokhov S. G. "Modeling hyperbolic equation by a neural network with a quasiclassical loss functional"	206
Tverdyi D. A., Parovik R. I. "Finding the optimal value of the order of the fractional derivative in a nonlinear integro-differential mathematical model of the dynamics of solar activity at the stage of ascent"	210

Использование аналитических моделей для определения параметров поверхности уплотнения резьбовых соединений класса «Премиум»

К. С. Стрелков

Институт проблем механики им. А. Ю. Ипплинского РАН, Россия, 119526, Москва, пр. Вернадского, 101, к.1.

Аннотация

С целью определения оптимальных геометрических параметров уплотнительной поверхности премиальных резьбовых соединений, проведен анализ существующей модели оценки газонепроницаемости.

Ключевые слова: трубы нефтегазового сортамента, уплотнительная поверхность, контактное давление, газонепроницаемость.

Введение. Для обеспечения герметичности при строительстве нефтегазовых скважин необходимо применять такие конструкции премиальных резьбовых соединений, на уплотнительной поверхности которых формируется пятно контактного давления, удовлетворяющее определенным критериям.

Можно выделить 4 типа уплотнений, применяемых в премиальных резьбовых соединениях труб: «конус – конус», «сфера – конус», «сфера – цилиндр» и «сфера – сфера» [1]. При этом три последних типа можно объединить в один вид «сферического» уплотнения. Уплотнение «конус – конус» обладает довольно протяженной площадкой контакта, как правило, занимающей всю поверхность уплотнительного пояска, а также — концентраторами контактных давлений на его концах, что может приводить к повреждениям поверхности и последующей утечке. Уплотнение сферического типа обеспечивает более сконцентрированное в определенной области уплотнительных поверхностей распределение контактных давлений. Его ширину можно варьировать за счет как величины натяга, так и за счет радиуса сферы для уплотнения типа «сфера – конус» или «сфера – цилиндр», а также за счет сочетания радиусов для уплотнения типа «сфера – сфера». При этом ширину контактной зоны необходимо максимизировать в определенных пределах, так как этот параметр является критичным с точки зрения герметичности. При этом с точки зрения теории контактного взаимодействия, контакт типа «сфера – сфера» можно привести к контакту типа «сфера – конус», используя эквивалентный радиус [2].

Для подбора оптимальных параметров на основе критерия герметичности, рационально использование аналитической модели. Такая модель была

Образец для цитирования

Стрелков К. С. Использование аналитических моделей для определения параметров поверхности уплотнения резьбовых соединений класса «Премиум» / Материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (17–19 сентября 2024 г., Самара, Россия). Т. 2. Самара: СамГТУ, 2024. С. 140–143.

Сведения об авторе

Кирилл Сергеевич Стрелков 🖄 🕩 http://orcid.org/0009-0001-9203-9599 аспирант; e-mail:ks.strelkov@yandex.ru разработана в [1], однако авторы не представили алгоритм подбора ключевых параметров герметизирующего узла.

1. Оценка газонепроницаемости премиального резьбового соединения. По аналогии с [3], представим общее выражение для показателя газонепроницаемости в виде:

$$W_{a} = \int_{-w_{s}}^{w_{s}} p(x)^{n} dx,$$
(1)

где p(x) — распределение конатктного давления на уплотнительной поверхности, w_s — полуширина контактной зоны в мм, а показатель n = 1,4 для случая отсутствия резьбоуплотнительной смазки. Для описания распределения контактного давления вдоль ширины контактной зоны, воспользуемся соответствующим выражением из теории контактного взаимодействия Герца:

$$p(x) = \frac{E}{4(1-\mu)R_s}\sqrt{w_s^2 - x^2},$$
(2)

где R_s — эквивалентный радиус контактной области, мм; E — модуль упругости, МПа; μ — коэффициент Пуассона.

Если подставить распределение контактного давления из (2) в (1) и выполнить интегрирование, получим:

$$W_a = 0,425 \left(\frac{E}{2(1-\mu)R_s}\right)^{1,4} \frac{\pi^{3/2} w_s^{12/5}}{1+\sqrt{5}}.$$
(3)

Из (3) видно, как зависит показатель газонепроницаемости от механических характеристик трубы и муфты, геометрии контактных поверхностей и ширины пятна контакта.

По аналогии с [3] определим также критерий газонепроницаемости:

$$W_{ac} = 10 \left(\frac{p_g}{p_a}\right)^{0.838},\tag{4}$$

где p_g — давление газа, p_a — атмосферное давление.

Из (3) и (4) формируется запас по газонепроницаемости:

$$n_g = \frac{W_a}{W_{ac}} = 0.04 \left(\frac{E}{2(1-\mu)R_s}\right)^{1.4} \frac{\pi^{3/2} w_s^{12/5}}{1+\sqrt{5}} \left(\frac{p_a}{p_g}\right)^{0.838}.$$

2. Подбор параметров уплотнения на основе запаса по газонепроницаемости. Таким образом, можно построить зависимость запаса газонепроницаемости от ширины контактной зоны и эквивалентного радиуса в виде некоторой поверхности (рис. 1). В данном случае для построения поверхности использовались следующие значения атмосферного давления и давления газа: $p_a = 0,1$ МПа, $p_g = 115$ МПа. Величина давления газа соответствует максимальному внутреннему давлению, действующему при испытаниях резьбового соединения с внешним диаметром 177,8 мм, толщиной стенки 12,65 мм, группой прочности Q125 [4].



Рис. 1. Запас газонепроницаемости в завссимости от геометрических параметров и полуширины контактной зоны для резьбового соединения с внешним диаметром 177,8 мм, толщиной стенки 12,65 мм, группой прочности Q125.

На основании рисунка 1 можно сделать вывод, что минимальный запас по герметичности, составляющий 1,1, обеспечивается шириной контактной зоны, принимающей значения больше 1,2 мм и эквивалентным радиусом меньше 160 мм. Следует отметить, что в рассмотренной модели не учитывается изменение пятна контакта на уплотнительной поверхности вследствие действия нагрузок. Поэтому предложенный метод расчета рекомендуется применять на первых этапах разработки премиального соединения, в дальнейшем сопровождая его полноценными расчетами методом конечных элементов по маршрутам нагружения, регламентированными соответствующими стандартами [5].

Заключение. Полученная методика позволяет проводить предварительную оценку газонепроницаемости премиального резьбового соединения и определять оптимальные значения геометрических параметров поверхности уплотнения сферического типа.

Библиографический список

- Yang B. et. al. Torque on the Sealability of Sphere-Type Premium Connection for Tubing and Casing Strings // Processes, 2023. vol. 11. pp. 256.
- 2. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения.. М.: Физматлит, 2013. 312 с.
- Xu H. et. al. A Quantitative Model to Calculate Gas Sealing Capacity and Design Sealing Parameters for Premium Connection // Mathematical Problems in Engineering, 2020. pp. 2– 3.
- 4. API Recommended Practice 5C5 "Procedures for Testing Casing and Tubing Connections" // American Petroleum Institute, 2017. 198 pp.

 Стрелков К. С., Попов А. Л. Влияние ползучести на герметичность резьбовых соединений класса «Премиум» // Сб. тр. Междунар. научн. конф. «Актуальн. пробл. прикл. матем., информ. и механ.», 2024. С. 678–685.

Using the analytical models to determine the sealing surface parameters of premium threaded connections

K. S. Strelkov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, 101/1, Vernadskogo prospekt, Moscow, 119526, Russian Federation.

Abstract

In order to determine the optimal geometrical parameters of the premium connections sealing surface, an analysis of the existing sealability evaluation model was carried out.

Keywords: OCTG, sealing surface, contact pressure, sealability.

Author's Details:

Kirill S. Strelkov 🖄 🕩 http://orcid.org/0009-0001-9203-9599 graduate student; e-mail:ks.strelkov@yandex.ru

Please cite this article in press as:

Strelkov K. S. Using the analytical models to determine the sealing surface parameters of premium threaded connections, In: *Proceedings of the XII All-Russian Scientific Conference with International Participation "Mathematical Modeling and Boundary Value Problems*" (September, 17–19, 2024, Samara, Russian Federation). Vol. 2, Samara State Technical Univ., Samara, 2024, pp. 140–143 (In Russian).

Определение контактного давления на уплотнительной поверхности премиальных резьбовых соединений при помощи аналитических моделей

К. С. Стрелков, А. Л. Попов

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Россия, 119526, Москва, пр. Вернадского, 101, к.1.

Аннотация

С целью последующей оценки герметичности, был проведен анализ существующих аналитических моделей для описания пятна контакта в зоне уплотнения на основе промышленной конструкции резьбового соединения OMK VEGA с применением конечно-элементного моделирования, а также экспериментальных данных.

Ключевые слова: уплотнительная поверхность, контактное давление, задача Герца, эквивалентный радиус.

Введение. Премиальные резьбовые соединения широко используются при строительстве нефтегазовых скважин, обеспечивая их конструкционную целостность, прочность и герметичность [1,2]. В отличие от стандартных резьбовых соединений нефтегазового сортамента, в которых герметичность, как правило, обеспечивается только за счет натяга в резьбовой части, а также резьбоуплотнительной смазки, в резьбовых соединениях класса «Премиум» реализован специальный уплотнительный узел, который можно классифицировать по форме сопрягаемых поверхностей. Для описания распределения контактного давления на уплотнительной поверхности и последующей оценки герметичности, рационально использование аналитической модели. Такая модель была разработана в [3], однако авторы не представили её реализацию для конкретной промышленной конструкции резьбового соединения с применением валидации при помощи метода конечных элементов (МКЭ).

1. Определение ширины контактной зоны. Для определения ширины контактной зоны была использована аналитическая модель, полученная в [3] для упругой области деформирования зоны контакта:

$$w_s = 2\sqrt{\frac{2(1-\mu^2)R_s T_{se}}{\zeta \pi E}},$$
 (1)

Образец для цитирования

Сведения об авторах

Кирилл Сергеевич Стрелков 🖄 🕩 http://orcid.org/0009-0001-9203-9599 аспирант; e-mail:ks.strelkov@yandex.ru

Александр Леонидович Попов **●** http://orcid.org/0000-0002-4841-5657 доктор физико-математических наук; ведущий научный сотрудник; e-mail: popov@ipmnet.ru

Стрелков К. С., Попов А. Л. Определение контактного давления на уплотнительной поверхности премиальных резьбовых соединений при помощи аналитических моделей / Материалы XII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (17–19 сентября 2024 г., Самара, Россия). Т. 2. Самара: СамГТУ, 2024. С. 144–147.

где R_s — эквивалентный радиус контактной области, мм; T_{se} — крутящий момент на участке контакта уплотнения, Нм; ζ — коэффициент, зависящий от геометрических параметров резьбы и уплотнения, а также коэффициентов трения на соответствующих поверхностях, мм²; E — модуль упругости, МПа; μ — коэффициент Пуассона.

Верификация аналитической модели выполнялась с помощью конечноэлементной модели резьбового соединения ОМК VEGA (диаметр 177,8 мм, толщина стенки 12,65 мм, группа прочности Q125), построенной на основе измерений геометрических параметров одного из образцов, изготовленных в рамках квалификационных испытаний, а также результатов этих испытаний в виде зависимости крутящего момента от числа оборотов [4].

В число особенностей данного соединения входит геометрия уплотнительных поверхностей, которая в конечный момент свинчивания образует контакт выпуклой сферической поверхностью ниппеля с вогнутой сферической поверхностью муфты [5]. Эквивалентный радиус такой контактной области вычисляется по формуле [6]:

$$R_s = \frac{R_{s1}R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}},$$

где R_{s1} и R_{s2} — радиусы сфер контактных поверхностей ниппеля и муфты.

Крутящий момент на участке контакта уплотнения в выражении (1) был взят из диаграммы крутящего момента, полученной на квалификационных испытаниях в лаборатории China National Petroleum Corporation (Китай) и представленной на рисунке 1 [4]. Также на рисунке 1 представлена диаграмма свинчивания, полученная в настоящей работе для нескольких расчетных точек при помощи МКЭ.



Рис. 1. Диаграмма свинчивания резьбового соединения ОМК VEGA, экспериментальные данные и результаты, полученные при помощи МКЭ.

Подставив полученные параметры в выражение (1), получим значение полуширины пятна контакта в случае упругой модели: 1,64 мм.

Наряду со случаем чисто упругого контакта, была проведена верификация аналитической модели для упруго-пластической области деформирования зоны контакта, где согласно [3]:

$$w_s = 4R_s \frac{(1-\mu)C_1\sigma_y}{E}, \quad C_1 = 1,164 + 2,975\mu - 2,906\mu^2.$$
 (2)

Подставив полученные параметры в выражение (2), получим для полуширины пятна контакта значение 1,75 мм. Видно, что оно несколько больше, чем полученное из чисто упругого расчёта.

2. Распределение контактного давления на уплотнительной поверхности. Значения ширины контактной зоны, найденные с помощью выражений (1) и (2), используем для получения распределения контактных давлений на основе теории контактного взаимодействия Герца [7]:

$$p(x) = \frac{E}{4(1-\mu)R_s}\sqrt{w_s^2 - x^2}.$$

Сравнение полученных таким образом зависимостей с решением МКЭ представлено на рисунке 2.



Рис. 2. Распределение контактного давления для различных анатитических моделей и расчета МКЭ.

Из графиков, представленных на рисунке 2, видно, что ширина области контакта и значения контактного давления, определённые численно с помощью метода конечных элементов, находятся ближе к значениям, полученными с использованием аналитического решения в упругой области.

Заключение. Полученные результаты позволяют использовать аналитические модели в предварительных расчетах при подборе параметров геометрии уплотнительной поверхности премиальных резьбовых соединений для обеспечения необходимой ширины кольцевой контактной области, имея в виду, что наиболее консервативным здесь является решение по упругой модели.

Библиографический список

- 1. Sugino M. et. al. Development of an innovative high-performance premium threaded connection for OCTG // Proc. Offshore Technol. Conf., 2010. pp. 1–9.
- Zara E. M. et. al. Premium Connections Fatigue Assessment Methodology Fit for Multistage Hydraulic Fracturing Operations // Proc. SPE Annual Technical Conf. and Exhibition, 2021. pp. 1–12.
- Yang B. et. al. Torque on the Sealability of Sphere-Type Premium Connection for Tubing and Casing Strings // Processes, 2023. vol. 11. pp. 256.
- Mo Z. et. al. Connection Full Test Report on 177.80 x 12.65 Q125 OMK VEGA Casing API RP 5C5-2017 // The Testing Laboratory of Oil Tubular Goods, CNPC TGRI, 2023.
- 5. Никифоров Д. В., Стрелков К. С. Резьбовое соединение трубных изделий нефтепромыслового сортамента, патент на изобретение №2767871, 2021.
- 6. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения.. М.: Физматлит, 2013. 312 с.
- 7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия.. М.: Мир, 1989. 510 с.

Building of contact pressure distribution on the sealing surface of premium threaded connections using analytical models.

K. S. Strelkov, A. L. Popov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, 101/1, Vernadskogo prospekt, Moscow, 119526, Russian Federation.

Abstract

In order to subsequently evaluate the sealability, an analysis of existing analytical models was carried out to describe the contact pressure distribution on the sealing surface based on the industrial design of the OMK VEGA threaded connection using finite element modeling, as well as experimental data.

 ${\bf Keywords:}$ sealing surface, contact pressure, Hertz problem, equivalent radius.

Authors' Details:

Kirill S. Strelkov 🖄 🕩 http://orcid.org/0009-0001-9203-9599 graduate student; e-mail:ks.strelkov@yandex.ru

Aleksander L. Popov D http://orcid.org/0000-0002-4841-5657 Dr. Phys. & Math. Sci.; Leading Researcher; e-mail: popov@ipmnet.ru

Please cite this article in press as:

Strelkov K. S., Popov A. L. Building of contact pressure distribution on the sealing surface of premium threaded connections using analytical models., In: *Proceedings of the XII All-Russian Scientific Conference with International Participation "Mathematical Modeling and Boundary Value Problems"* (September, 17–19, 2024, Samara, Russian Federation). Vol. 2, Samara State Technical Univ., Samara, 2024, pp. 144–147 (In Russian).