

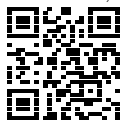
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПРЕМИАЛЬНЫХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования ползучести материала класса прочности P110, применяемого для изготовления труб нефтегазового сортамента с резьбовыми соединениями класса «Премиум». Математическое описание накопления деформаций ползучести в процессе эксплуатации соединения выполнено с использованием модели деформационного упрочнения. Идентификация параметров модели осуществлялась посредством численного решения нелинейного дифференциального уравнения методом Рунге–Кутты четвертого порядка и последующей минимизации отклонений между расчетными и экспериментальными данными. При прогнозировании обусловленной ползучестью релаксации контактных давлений в радиальном уплотнении типа «металл–металл» проведено сопоставление результатов, полученных по модели деформационного упрочнения и вязкоупругой модели Максвелла–Вихерта. При этом в качестве нагрузки был выбран самый тяжелый режим эксплуатации нефтегазовой колонны: действие внутреннего давления и растяжения с выдержкой в течении заданного временного интервала. После выдержки было реализовано нагружение в соответствии с требованиями стандартов, регламентирующих проведение натурных испытаний для имитации эксплуатации резьбового соединения в скважине: воздействие осевых растягивающих и сжимающих нагрузок с внутренним и внешним давлениями со специальной последовательностью нагружения. Оценка герметичности резьбового соединения с учетом релаксации контактных давлений проводилась на основе сформулированного критерия по газонепроницаемости, характеризующего способность уплотнительного узла сохранять герметичность в условиях действия газовой среды. Сравнение двух моделей наглядно показывает консервативность модели деформационного упрочнения для оценки релаксации контактных давлений в условиях ползучести. Разработанная методика может быть применима при конструировании резьбовых соединений класса «Премиум» и оценки возможности их эксплуатации в условиях высокотемпературных скважин и при использовании специальных методов добычи нефти и газа.

Ключевые слова: ползучесть, модель деформационного упрочнения, вязкоупругость, премиальные резьбовые соединения, герметичность

Стрелков Кирилл Сергеевич, аспирант лаборатории механики новых материалов и технологий; e-mail: ks.strelkov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9203-9599>



для цитирования: Стрелков К. С. Применение модели деформационного упрочнения для оценки герметичности премиальных резьбовых соединений // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2026. № 2(68). С. 119–131. DOI: 10.37972/chgpu.2026.68.2.008. EDN: GMZHZY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

K. S. Strelkov

APPLICATION OF THE STRAIN HARDENING MODEL FOR SEALABILITY ESTIMATION OF PREMIUM THREADED CONNECTIONS

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russia

Abstract. This study reports the results of creep tests performed on specimens of P110-grade steel used in the manufacture of Oil Country Tubular Goods (OCTG) equipped with premium threaded connections. To describe material creep during connection service, the parameters of a strain-hardening model were identified by numerically integrating a nonlinear differential equation using the fourth-order Runge–Kutta method. Creep-induced relaxation of contact pressure within the radial metal-to-metal seal was then evaluated by comparing the strain-hardening formulation with the Maxwell–Wiechert viscoelastic model.

The numerical analysis considered a threaded connection subjected to combined axial tension and internal pressure, followed by a prescribed load-hold period. Upon completion of the hold stage, the connection was exposed to a loading sequence consistent with the requirements of the applicable full-scale qualification standard, thereby reproducing representative downhole operating conditions. Sealability was assessed using a sealability criterion based on the contact-pressure distribution within the sealing region.

Comparison of the two constitutive approaches showed that the strain-hardening model predicts a more pronounced creep-induced reduction in sealing performance and therefore provides a more conservative estimate of contact pressure relaxation. The proposed methodology may be employed in the design of premium threaded connections and in the assessment of their suitability for high-temperature well conditions and specialized production technologies.

Keywords: creep, strain hardening model, viscoelasticity, OCTG, sealability

Kirill S. Strelkov, Scientific Researcher; e-mail: ks.strelkov@yandex.ru;

<https://orcid.org/0009-0001-9203-9599>



to cite this article: Strelkov K. S. Application of the strain hardening model for sealability estimation of premium threaded connections // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2026. No 2(68). p. 119–131. DOI: 10.37972/chgpu.2026.68.2.008

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение. Резьбовые соединения класса «Премиум» широко используются при строительстве нефтяных и газовых скважин, в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах, давлениях и механических нагрузках. Характерными конструктивными особенностями таких соединений являются оптимизированная геометрия резьбового профиля и наличие специального уплотнительного узла с радиальным натягом.

Создаваемый при сборке натяг обеспечивает формирование области контактного взаимодействия, параметры которой в значительной степени определяют герметичность соединения. Однако при продолжительном воздействии механических нагрузок и температур, достигающих 350°C , в материале труб и муфт могут накапливаться необратимые деформации ползучести. Их развитие сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния уплотнительного узла и может приводить к снижению контактных давлений и последующей утрате герметичности [1, 2].

Прогнозирование изменения контактного взаимодействия во времени может выполняться с использованием различных реологических и феноменологических моделей материала. В настоящей работе сопоставлены два подхода к описанию релаксации контактных давлений применительно к премиальному резьбовому соединению собственной разработки.

1. Экспериментальное и теоретическое исследование ползучести.

Для построения экспериментальных кривых ползучести при различных температурных режимах в лаборатории «Гибридные наноструктурные материалы» НИТУ МИСИС были проведены испытания цилиндрических образцов на одноосное растяжение. Продолжительность выдержки под нагрузкой составляла 300 ч, а температура испытаний принималась равной 150°C , 250°C и 350°C .

В каждом температурном режиме образцы нагружались до уровня, составляющего 95% минимального предела текучести. Значение предела текучести было предварительно определено по результатам статических испытаний на одноосное растяжение, выполненных в АО «Выксунский металлургический завод» (АО "ВМЗ"). Выбранная интенсивность нагружения соответствует уровню эквивалентных напряжений по критерию текучести Мизеса, применяемому при комплексной квалификационной оценке резьбовых соединений обсадных и насосно-компрессорных труб [3].

Образцы для исследования изготавливались из муфтовой заготовки. Из материала той же заготовки впоследствии были изготовлены натурные образцы премиального резьбового соединения ОМК VEGA [4]. Такой подход обеспечил соответствие механических свойств материала лабораторных образцов характеристикам исследуемого соединения.

2. Определение параметров модели ползучести. Анализ экспериментальных результатов показал, что при температуре 350°C на кривой ползучести отчетливо выделяются первичная и вторичная стадии процесса. Для

температур 150°C и 250°C выраженный участок первичной ползучести в пределах рассматриваемой продолжительности испытаний практически отсутствует.

В связи с необходимостью описания как неустановившейся, так и установившейся стадий ползучести в качестве определяющего соотношения была принята модель деформационного упрочнения. Ее основу составляет степенной закон Нортона [5], дополненный зависимостями от накопленной деформации ползучести и температуры:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = C_1 \sigma_{\text{экв}}^{C_2} \varepsilon_c^{C_3} \exp\left(-\frac{C_4}{T}\right), \quad (1)$$

где ε_c — эквивалентная деформация ползучести; $\sigma_{\text{экв}}$ — эквивалентное напряжение, МПа; T — температура, К; C_1, C_2, C_3, C_4 — постоянные, которые подбираются на основе экспериментальных данных, причем $C_4 = Q/R$ (Q — энергия активации, Дж; R — газовая постоянная, Дж/(моль·К)).

Определение параметров уравнения (1) выполнялось по следующей вычислительной схеме:

1. Для заданного набора коэффициентов C_1, C_2, C_3 и C_4 численно интегрировалось нелинейное дифференциальное уравнение ползучести (1). Интегрирование проводилось методом Рунге–Кутты четвертого порядка.

2. Полученная расчетная зависимость сопоставлялась с экспериментальными значениями, после чего методом наименьших квадратов минимизировалась целевая функция:

$$f = \sum_{i=1}^n \left(\varepsilon_i^{\text{эксп}} - \varepsilon_i^{\text{мод}}(C_1, C_2, C_3, C_4) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\varepsilon_i^{\text{эксп}}$ — экспериментальное значение деформации ползучести для i -ой точки кривой; $\varepsilon_i^{\text{мод}}(C_1, C_2, C_3, C_4)$ — значение модели деформационного упрочнения для i -ой точки кривой.

3. Качество описания экспериментальных данных оценивалось с помощью коэффициента детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^{\text{эксп}} - \varepsilon_i^{\text{мод}})^2}{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^{\text{эксп}} - \bar{\varepsilon}^{\text{эксп}})^2}, \quad \bar{\varepsilon}^{\text{эксп}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{\text{эксп}}. \quad (3)$$

Сопоставление экспериментальных точек с кривыми, рассчитанными по модели деформационного упрочнения, приведено на Рис. 1. Для температур 350°C, 250°C и 150°C значения коэффициента детерминации составили соответственно 0.99, 0.43 и 0.01.

Невысокое качество аппроксимации результатов при 150°C и 250°C обусловлено малой интенсивностью ползучести на рассматриваемом временном интервале. В этих условиях измеряемые деформации оказываются сопоставимыми с погрешностью экспериментального оборудования, вследствие чего разброс данных затрудняет их описание единым определяющим соотношением (1).

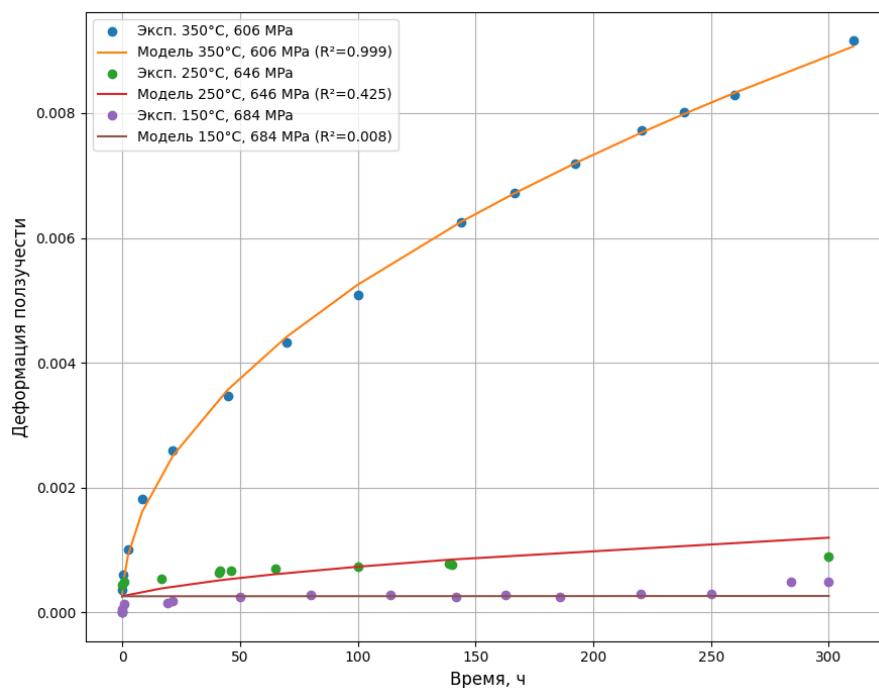


Рис. 1. Экспериментальные данные и кривые, полученные с помощью модели деформационного упрочнения.

Основное внимание в настоящем исследовании уделялось результатам, полученным при 350°C, поскольку данный температурный режим является наиболее неблагоприятным с точки зрения работоспособности резьбового соединения. Следует также отметить, что при исключении общей температурной зависимости из уравнения (1) и независимой идентификации коэффициентов C_1 , C_2 и C_3 для каждой экспериментальной кривой точность их аппроксимации может быть существенно повышена.

Корректность определенных параметров дополнительно проверялась путем конечно-элементного моделирования условий лабораторного эксперимента. Расчетная область представляла собой четверть продольного сечения цилиндрического образца; задача решалась в осесимметричной постановке. Поле накопленной деформации ползучести, полученное в конечно-элементной модели, а также сопоставление расчетной и экспериментальной кривых для температуры 350°C представлены на Рис. 2.

3. Сравнение модели деформационного упрочнения и модели Максвелла–Вихерта при оценке герметичности премиального соединения. Количественная оценка герметичности соединения класса «Премиум» требует определения изменения контактных давлений в радиальном

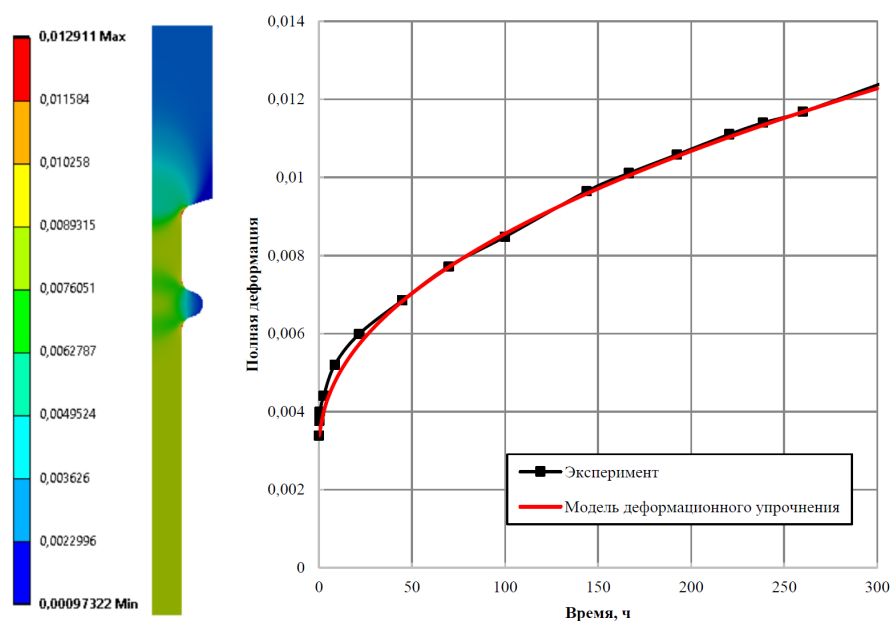


Рис. 2. Распределение эквивалентных деформаций ползучести в модели и сравнение экспериментальной и расчётной кривых.

уплотнительном узле вследствие длительного накопления деформаций ползучести. Для решения этой задачи в программном комплексе ANSYS была разработана детальная осесимметричная конечно-элементная модель резьбового соединения ОМК VEGA.

На торцевой поверхности ниппеля задавалось осевое усилие, а в центральном сечении муфты вводились граничные условия симметрии. Внутреннее давление прикладывалось к внутренним поверхностям трубы и муфты, а также к поверхностям упорного торца ниппеля и ответного упора муфты.

На поверхности радиального уплотнения применялся алгоритм проникновения давления, учитывающий локальное распределение контактных давлений. Для программной реализации данного алгоритма был разработан пользовательский скрипт на языке APDL.

Расчетная последовательность включала следующие этапы:

- 1) устранение исходного геометрического перекрытия контактирующих поверхностей и формирование напряженного состояния, соответствующего сборочному натягу;
- 2) одновременное приложение растягивающего осевого усилия и внутреннего давления, соответствующих наиболее неблагоприятному режиму квалификационных испытаний;
- 3) выдержка соединения под постоянной нагрузкой в течение установленного интервала времени.

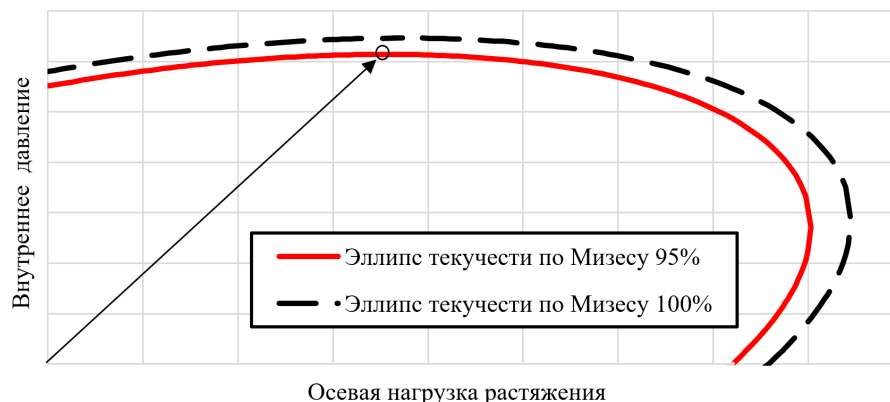


Рис. 3. Эллипс текучести по Мизесу и выбранное сочетание нагрузок для оценки герметичности.

Сочетание осевой нагрузки и внутреннего давления выбиралось таким образом, чтобы напряженное состояние оставалось в пределах упругой области эллипса текучести Мизеса, построенного в координатах «осевая нагрузка — внутреннее давление». Направление перехода к нагрузкам второго расчетного этапа показано стрелкой на Рис. 3.

Для анализа влияния ползучести на релаксацию контактных давлений были сопоставлены результаты двух вариантов расчета. В первом случае использовалась модель деформационного упрочнения (1), во втором — описанная в работах [1, 6] вязкоупругая модель Максвелла–Вихерта.

В модели Максвелла–Вихерта релаксационный модуль материала представляется посредством разложения в ряд Прони [7, 8]. Параметры такого представления определяются из следующего соотношения:

$$\alpha E_0 T_{ij} m_j = e_j \quad (4)$$

где α — калибровочный коэффициент; E_0 — мгновенный модуль упругости; T_{ij} — компоненты тензора времен релаксации, m_j — компоненты тензора безразмерных параметров Прони, e_j — компоненты тензора изменения мгновенного модуля.

Методом Монте-Карло было установлено, что для решения уравнения (4) достаточно использовать $n = 6$ точек. Последующее увеличение их количества практически не изменяет точность аппроксимации. Вместе с тем модель Максвелла–Вихерта относится к классу линейных вязкоупругих моделей и не воспроизводит нелинейную зависимость скорости деформирования от уровня действующих напряжений. Для согласования расчетных и экспериментальных характеристик в нее был введен дополнительный калибровочный коэффициент.

Газонепроницаемость соединения оценивалась по критерию, основанному на интегральном анализе распределения контактных давлений в пределах радиального уплотнения [9, 10]:

$$n_g = \frac{W_a}{W_{ac}}, \quad W_a = \int_{-a}^a p(x)^k dx, \quad W_{ac} = B \left(\frac{q}{p_a} \right)^m \quad (5)$$

где $p(x)$ — распределение контактного давления в определенный момент времени; a — полуширина контактной зоны, мм; параметры для случая отсутствия резьбоуплотнительной смазки (соответствует методике испытаний [2] при использовании процедуры прогрева образца): $k = 1.4$, $m = 0.838$, $B = 10 \text{ МПа}^k \text{ мм}$; q — заданное давление, МПа; p_a — атмосферное давление, МПа.

Результаты численного решения по двум рассматриваемым моделям материала приведены на Рис. 4 и Рис. 5.

Согласно данным Рис. 4, применение модели деформационного упрочнения приводит к существенно большему перемещению области контактного взаимодействия по сравнению с расчетом по модели Максвелла–Вихерта. Одновременно наблюдается более интенсивное сокращение ширины контактной зоны. При этом максимальные значения контактного давления, прогнозируемые двумя моделями к концу рассматриваемого интервала, оказываются приблизительно одинаковыми.

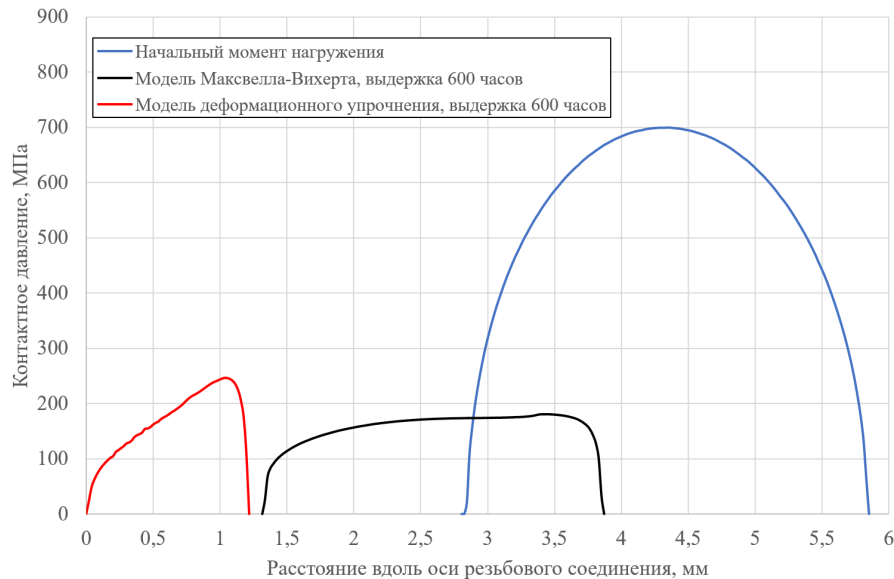


Рис. 4. Распределение контактных давлений на уплотнительной поверхности в начальный момент нагружения и после выдержки 600 часов для двух моделей.

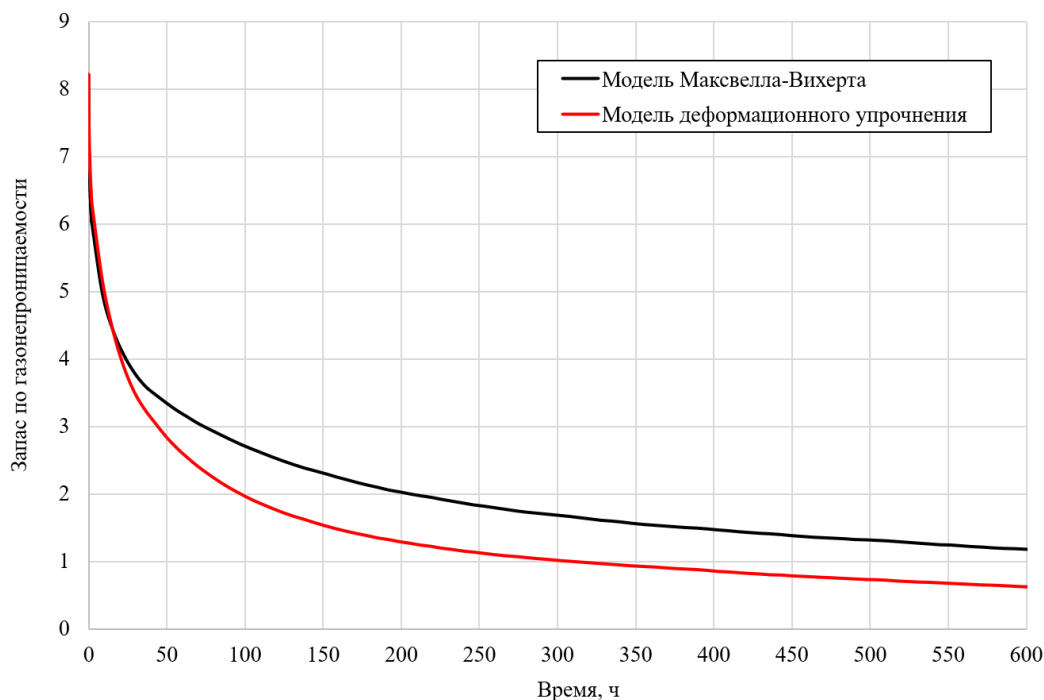


Рис. 5. Изменение запаса по газонепроницаемости при выдержке с нагрузкой растяжением и внутренним давлением.

Из зависимостей, представленных на рис. 5, следует, что после 600 ч непрерывной выдержки уменьшение запаса газонепроницаемости составляет 92 % при использовании модели деформационного упрочнения и 85 % при использовании модели Максвелла–Вихерта. Более того, расчет по модели деформационного упрочнения показывает, что условие герметичности, определяемое критерием (5), перестает выполняться уже после 300 ч действия постоянной нагрузки.

Для обеих моделей дополнительно исследовалась герметичность соединения после продолжительной выдержки при последующем прохождении маршрута квалификационных испытаний, регламентированного стандартом [3]. Нагрузочное воздействие на соединение задавалось сочетанием осевого усилия — растягивающего либо сжимающего — и внутреннего или внешнего давления. На основе анализа зависимости на Рис. 5 в качестве времени выдержки был выбран интервал 100 часов, так как начиная с этого значения разность между значениями запаса по газонепроницаемости для двух кривых принимает постоянное значение. Оценка герметичности конструкции проводилась по запасу по газонепроницаемости и ширине контактной зоны как по двум ключевым параметрам оценки герметичности. Результаты моделирования представлены на Рис. 6 и Рис. 7 соответственно.

Стоит отметить, что на Рис. 6 значения запаса по газонепроницаемости отсутствуют для точек 1, 4, 13, 14, 15, 21, так как для этих точек нет нагружения

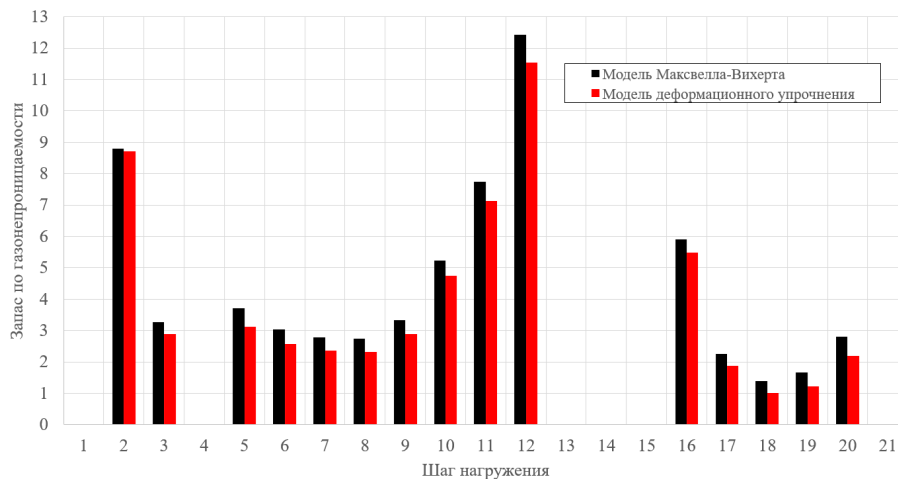


Рис. 6. Изменение запаса по газонепроницаемости после выдержки и действия нагрузок.

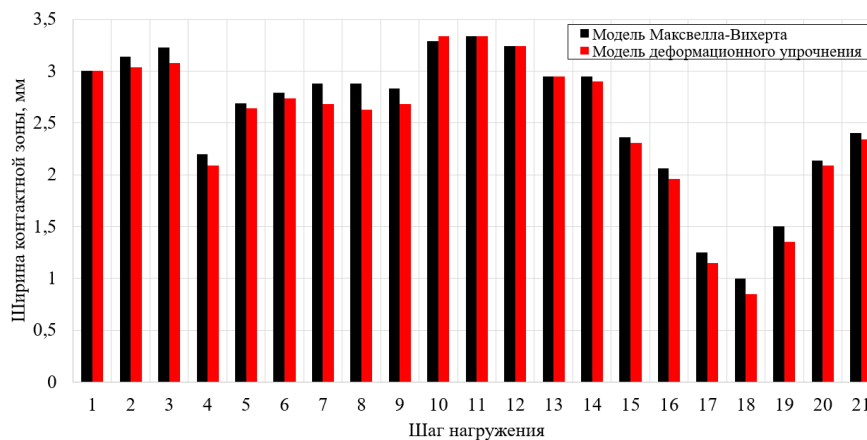


Рис. 7. Изменение ширины контактной зоны после выдержки и действия нагрузок.

давлением, что является обязательной компонентой критериев (5). Из диаграмм видно, что характер изменения данных характеристик подобен для двух моделей, при этом наиболее существенная разница возникает на шаге нагружения 18 при действии внешнего давления и растяжения и составляет 28% и 15% для запаса по газонепроницаемости и ширине контактной зоны соответственно. При этом для модели деформационного упрочнения запас по газонепроницаемости для этого шага близок к 1, что может приводить к утечке при эксплуатации

резьбового соединения с текущими параметрами и с подобной последовательностью нагружения в скважине. Таким образом корректную оценку применимости резьбового соединения в условиях ползучести необходимо оценивать по модели деформационного упрочнения как по наиболее консервативной.

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование ползучести материала труб нефтегазового сортамента производства АО «Выксунский металлургический завод». Полученные при различных температурах зависимости деформации от времени были описаны посредством модели деформационного упрочнения. Для прогнозирования релаксации контактных давлений в радиальном уплотнении результаты данной модели сопоставлялись с расчетами по вязкоупругой модели Максвелла–Вихерта.

Количественный анализ герметичности показал, что модель деформационного упрочнения прогнозирует более интенсивное уменьшение ширины контактной зоны и запаса газонепроницаемости. Таким образом, применительно к рассматриваемой конструкции она обеспечивает более консервативную оценку продолжительности сохранения герметичности резьбового соединения.

В качестве продолжения исследования планируется проведение испытаний на ползучесть при других уровнях напряжений и подбор соответствующих параметров моделей, а также натурных испытаний резьбового соединения в условиях АО "ВМЗ".

Представленные результаты могут быть использованы при проектировании резьбовых соединений класса «Премиум», а также при расчетной оценке их работоспособности и ресурса в условиях эксплуатации геотермальных скважин.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. К. С. Стрелков написание текста рукописи, обзор литературы по теме статьи, проведение экспериментов, редактирование текста рукописи.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено по теме государственного задания (государственный регистрационный номер 124012500437-9).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. K. S. Strelkov writing the text of the manuscript, reviewing the literature on the topic of the article, conducting experiments, editing the text of the manuscript.

Competing interests. The author declare that they have no competing interests.

Funding. The study was carried out on the topic of the state assignment (state registration number 124012500437-9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков К. С. Теоретическое и экспериментальное исследование ползучести стали марки P110 // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2025. 4(66). С. 157–165. DOI: 10.37972/chgpu.2025.66.4.010.

2. Merliahad M., Giacomel B., Sakura K. Casing Connection Selection for Geothermal Applications Using Input From HPHT and Thermal Wells Testing Protocols // SPE/GRC Workshop: High-Temperature and Corrosion in Drilling and Production—Exploring Geothermal and Oil and Gas Synergies. Melbourne, Australia, 2017.
3. ГОСТ Р ИСО 13679-2023. Трубы стальные обсадные и насосно-компрессорные для нефтяной и газовой промышленности. Методы испытаний резьбовых соединений. Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию, 2023.
4. Резьбовое соединение трубных изделий нефтепромыслового сортамента: 2767871 / Д. В. Никифоров, К. С. Стрелков. Заявл. 2022. Опубл. 22.03.2022. Бюл. № 9.
5. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. 2-е изд. Москва: Машиностроение, 1975. 398 с.
6. Strelkov K. S., Murashkin E. V. Sealability of Premium Threaded Connections under Creep // Mechanics of Solids. 2025. Vol. 60, no. 7. P. 1–8. DOI: 10.1134/S0025654425607025.
7. Кристенсен Р. М. Введение в теорию вязкоупругости. Москва: Мир, 1974. 340 с.
8. Findley W. N., Lai J. S., Onaran K. Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity. Dover Publications, 1989. 364 p.
9. Murtagian G. R., Fanelli V., Villasante J. A., et al. Sealability of Stationary Metal-to-Metal Seals // Journal of Tribology. 2004. Vol. 126. P. 591–596. DOI: 10.1115/1.1715103.
10. Xie J. Numerical Evaluation of Tubular Connections for HPHT Applications // Proceedings of the Baosteel Conference. Shanghai, 2013. P. 6–14.

REFERENCES

1. Strelkov K. S. Theoretical and Experimental Study of Creep in P110 Grade Steel // Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State. 2025. 4(66). P. 157–165. DOI: 10.37972/chgpu.2025.66.4.010. (in Russian).
2. Merliahad M., Giacomel B., Sakura K. Casing Connection Selection for Geothermal Applications Using Input From HPHT and Thermal Wells Testing Protocols // SPE/GRC Workshop: High-Temperature and Corrosion in Drilling and Production—Exploring Geothermal and Oil and Gas Synergies. Melbourne, Australia, 2017.
3. GOST R ISO 13679-2023. Steel casing and tubing pipes for the oil and gas industry. Test methods for threaded connections. 2023. (in Russian).
4. Threaded Connection of Oilfield Tubular Goods: 2767871 / D. V. Nikiforov, K. S. Strelkov. 2022. (in Russian).
5. Malinin N. N. Applied Theory of Plasticity and Creep. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 398 p. (in Russian).
6. Strelkov K. S., Murashkin E. V. Sealability of Premium Threaded Connections under Creep // Mechanics of Solids. 2025. Vol. 60, no. 7. P. 1–8. DOI: 10.1134/S0025654425607025.

7. Christensen R. M. Introduction to the Theory of Viscoelasticity. Moscow: Mir, 1974. 340 p. (in Russian).
8. Findley W. N., Lai J. S., Onaran K. Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity. Dover Publications, 1989. 364 p.
9. Murtagian G. R., Fanelli V., Villasante J. A., et al. Sealability of Stationary Metal-to-Metal Seals // Journal of Tribology. 2004. Vol. 126. P. 591–596. DOI: 10.1115/1.1715103.
10. Xie J. Numerical Evaluation of Tubular Connections for HPHT Applications // Proceedings of the Baosteel Conference. Shanghai, 2013. P. 6–14.