Прогнозирование напряженно-деформированного состояния полимерного армированного трубопровода с учетом технологических остаточных напряжений / А.А. Каменских, Ю.С. Кузнецова, Л.Р. Сахабутдинова, А.А. Червов, К.А. Бугаев. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.06 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 4. – С. 72–85.

Perm Polytech Style: Kamenskikh A.A., Kuznetsova Yu.S., Sakhabutdinova L.R., Chervov A.A., Bugaev K.A. Prediction of the Polymer Reinforced Pipeline Stress-Strain State taking into Account Technological Residual Stresses. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 4, pp. 72-85. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.06

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.06
УДК 539.373

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНОГО АРМИРОВАННОГО ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

А.А. Каменских[1], Ю.С. Кузнецова[1], Л.Р. Сахабутдинова[1], А.А. Червов[2], К.А. Бугаев[2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
[2]ООО «Лукойл-инжиниринг», Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 08 апреля 2025 г.
Одобрена: 13 августа 2025 г.
Принята к публикации: 25 сентября 2025 г.

Ключевые слова:

полимерные армированные трубы, полиэтилен, стекловолокно, технологическая механика, эффективные характеристики, остаточные напряжения, напряженно-деформированное состояние, давление, эксплуатация, моделирование, МКЭ.

АННОТАЦИЯ

Приводятся постановки и результаты численной реализации трех этапов прогнозирования напряженно-деформированного состояния полимерных армированных трубопроводов (ПАТ) под действием внутреннего давления с учетом остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления. Для этого на первом этапе построены процедуры прогнозирования эффективных характеристик армированного слоя; на втором этапе решена задача о прогнозировании остаточных технологических напряжений; на третьем этапе решена задача об отыскании напряженно-деформированного состояния под действием внутреннего давления с учетом остаточных технологических напряжений. Решение поставленных задач осуществлено численно методом конечных элементов.

Данное исследование носит поисковый характер, направленный на выявление проблемных зон конструкции ПАТ, формирование и отработку методологии проведения моделирования поведения под действием различных нагрузок. В рамках представленной работы рассмотрены упругие характеристики материалов и стационарные формулировки задач. Рассмотренные задачи позволили провести качественную приближенную оценку напряженно-деформированного состояния ПАТ в процессе изготовления и эксплуатации, выявить закономерности деформирования и зоны возможного разрушения элементов конструкции. Для поиска и формулирования отбракованных характеристик, рекомендаций по монтажу и эксплуатации необходимо реализовать переход к более сложным моделям описания поведения материалов, учитывающих температурные и временные зависимости механических характеристик полиэтилена высокой плотности ПЭ 100 и композиционного материала на его основе.

© **Каменских Анна Александровна** – к. т. н., доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», e-mail: anna_kamenskih@mail.ru.
Кузнецова Юлия Сергеевна – к. ф.-м. н., доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», e-mail: suhodolchik@mail.ru.
Сахабутдинова Ляйсан Рамилевна – к. т. н., доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», e-mail: lyaysans@list.ru.
Червов Антон Анатольевич – ведущий специалист управления инновационного развития центра по научно-исследовательским, опытно-конструкторским работам и инновациям, e-mail: anton.chervov@lukoil.com.
Бугаев Константин Анатольевич – начальник управления инновационного развития центра по научно-исследовательским, опытно-конструкторским работам и инновациям, e-mail: konstantin.A.Bugaev@lukoil.com.

Anna A. Kamenskikh – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, e-mail: anna_kamenskih@mail.ru.
Yulia S. Kuznetsova – PhD in in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, e-mail: suhodolchik@mail.ru.
Lyaysan R. Sakhabutdinova – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, e-mail: lyaysans@list.ru.
Anton A. Chervov – Leading Specialist, Innovative Development Department, the Center for Research, Development and Innovation, e-mail: anton.chervov@lukoil.com.
Konstantin A. Bugaev – Head of the Innovative Development Department, Center for Research, Development and Innovation, e-mail: konstantin.A.Bugaev@lukoil.com.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

PREDICTION OF THE POLYMER REINFORCED PIPELINE STRESS-STRAIN STATE TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESSES

A.A. Kamenskikh[1], Yu.S. Kuznetsova[1], L.R. Sakhabutdinova[1], A.A. Chervov[2], K.A. Bugaev[2]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2]LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 08 April 2025
Approved: 13 August 2025
Accepted for publication:
25 September 2025

Keywords:

polymer reinforced pipes, polyethylene, fiberglass, technological mechanics, effective characteristics, residual stresses, stress-strain state, pressure, operation, modeling, FEM.

ABSTRACT

The paper presents statements and results of the numerical implementation of three stages of predicting the stress-strain state of polymer reinforced pipes (PRP) under internal pressure by taking into account residual stresses arising during the manufacturing process. Prediction of effective characteristics in the reinforced layer is built at the first stage. The problem of predicting residual stresses is solved at the second stage. The problem of finding the stress-strain state under the internal pressure taking into account the residual stresses is solved at the third stage. The solution to the set problems was carried out numerically by using the finite element method. This aims at identifying problem areas of the PRP design, development and evolution of a methodology for modeling behavior under various loads. Elastic characteristics of materials and stationary formulations of problems are considered within the presented work. The considered problems made it possible to conduct a qualitative approximate assessment of the PRP stress-strain state during manufacturing and operation and to identify patterns of deformation and zones of possible destruction of structural elements. In order to find and formulate rejected characteristics, recommendations for installation and operation it is necessary to implement more complex models aimed at describing the material behavior and taking into account the temperature and time dependencies of the mechanical characteristics of high-density polyethylene PE 100 and composite materials based on it.

Введение

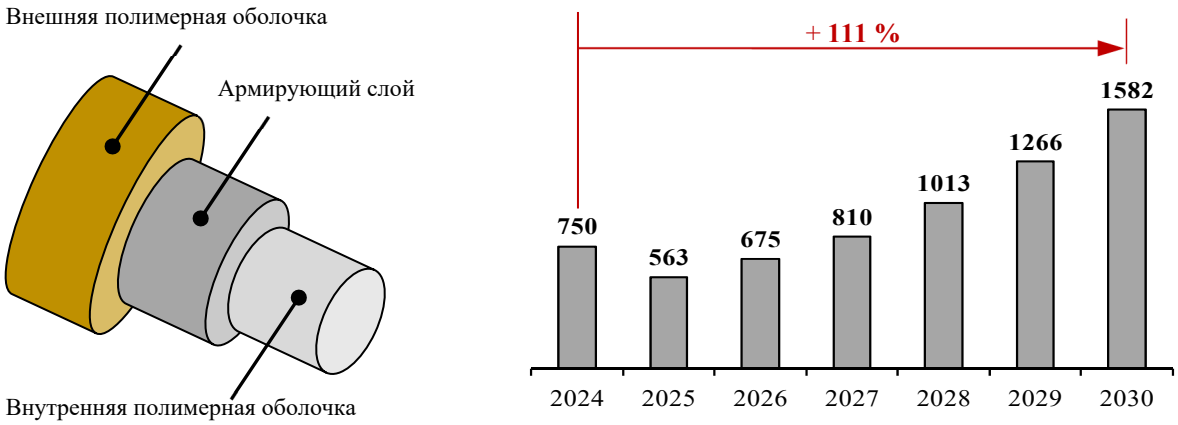
Транспортировка нефти и нефтепродуктов по трубопроводам является одним из важнейших звеньев топливно-энергетического комплекса России. От состояния трубопроводов напрямую зависят экономические, технологические показатели нефтяных предприятий, а также экологическое состояние природных объектов вблизи пролегания нефтепроводов [1]. В процессе эксплуатации трубопроводы постоянно подвергаются комбинированному воздействию: высокому внутреннему рабочему давлению транспортируемого продукта, внешнему давлению массива грунта, температурным перепадам внешней среды. Природно-климатические условия, антропогенные и техногенные воздействия, механические и коррозионные повреждения, а также качество производства труб влияют на безотказную (безаварийную) работу трубопроводов [2; 3].

В настоящее время в нефтегазовой сфере активно используются полимерные армированные трубы (ПАТ) [4; 5]. Конструктивно ПАТ состоит из внутренней полимерной оболочки, армирующего слоя, внешней полимерной оболочки (рис. 1, *a*). Применение ПАТ является перспективным способом борьбы с коррозией трубопроводов, эксплуатируемых в средах, транспортирующих коррозионно-активные флюиды. В настоящее время ведется внедрение полимерных трубопроводов в системы промысловых трубопроводов нефтедобывающих организаций [6]. С 2020 по 2023 г. разработаны и приняты два ГОСТа [7; 8], регламентирующие требования к ПАТ, два ГОСТа [9; 10], регламентирующие требования к строительству и эксплуатации ПАТ. С 2021 по 2024 г. открыты 5 новых технологических линий по производству ПАТ. Согласно данным экспертной оценки прогнозируется увеличения производства и строительства трубопроводов из ПАТ в 2 раза к 2030 году (рис. 1, *b*) [11], что связано с увеличением эксплуатационного и разведочного бурения [12], технологическим развитием разработки мало- и среднедебитных скважин [13; 14], усилением контроля технического состояния трубопроводов [15] и т.д.

Согласно ФНИП «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов, необходимо обеспечить диагностирование и оценку технического состояния в процессе эксплуатации. На текущий момент методов, позволяющих проводить диагностику и оценку технического состояния ПАТ, в России и мире нет.

Поскольку конструкция ПАТ является многоэлементной, и каждый элемент конструкции имеет свое назначение, то для поиска методов диагностирования и оценки технического состояния необходимо определить отбраковочные характеристики для каждого конструктивного элемента.

Одним из первых этапов определения отбраковочных характеристик элементов конструкции ПАТ является моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) полимерно-композиционной трубы для локализации проблемных зон, величин силовых и температурных нагрузок, формулирования технических заданий на натурные испытания [16; 17].



a *b*

Рис. 1. Упрощенная схема ПАТ (*a*) и прогноз строительства ПАТ-трубопроводов (*b*)

Fig. 1. Simplified diagram of the PRP (*a*) and forecast for the construction of PRP pipelines (*b*)

В рамках первого этапа исследования для конструкции ПАТ рассматривается идеальный контакт между технологическими слоями. Армирующий слой изготовлен путем спирально-перекрестной намотки с углом ± 55° к оси трубы и спеканием между собой и оболочками. Армирующие ленты представляют собой стеклянные однонаправленные волокна (~70 % объемной доли), полимерная матрица – ПЭ 100 (~30 % объемной доли).

Известно, что такие параметры, как угол намотки, количество армированных слоёв, соотношение волокна и связующего, толщина внутреннего полиэтиленового (ПЭ) слоя оказывают сильное влияние на механические свойства труб [18]. Некоторые исследования демонстрируют, что изменение толщины армирующей ленты на величину в 0,1 мм и угла намотки может приводить к снижению давления разрушения на 16 % [19]. Конструктивные особенности (толщина стенки трубы, длина, вид армирования) существенно влияют на жесткостные и прочностные характеристики труб [18; 20]. Температура также является одним из важных факторов [21], в [22] экспериментально доказано, что с повышением температуры снижается гибкость труб. Механическое поведение полимерных армированных труб чаще всего исследуется, исходя из эксплуатационной нагрузки [23–26]. Однако большинство приведенных расчетов осуществлены без учета остаточных напряжений, которые присутствуют в трубах независимо от наличия или отсутствия внешнего воздействия. Остаточное напряжение возникает в процессе производства трубопроводов, и, как следствие, может существенно повлиять на механические характеристики полимерных труб, работающих под давлением [27]. Остаточные напряжения могут приводить к развитию дефектов при эксплуатации, что в первую очередь ускоряет процесс разрушения труб [28; 29]. Величина остаточного напряжения существенно влияет на пластическую деформацию трубы [30], образование и развитие трещин на ее поверхности [31–33]. Наличие остаточных напряжений подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями [34–36].

Оценка и прогнозирование напряженно-деформированного состояния полимерно-композиционного трубопровода с учетом технологических остаточных напряжений является целью данной работы. Технология производства ПАТ в основном состоит из следующих этапов: производство несущей трубы, армирование, нанесение наружного слоя. Армирование нитями из стекловолокна по методу непрерывной намотки включает в себя подачу стеклоровинга, перемещение и смачивание нитей ровинга в ванне со связующим и, соответственно, намотку с последующим отверждением связующего [37; 38]. Степень натяжения армирующих нитей волокна и последующая термическая обработка конструкции существенно влияют на поля напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта [38–40]. В [41] показано, что остаточное напряжение в связующем в основном возникает из-за термических эффектов, вызванных усадкой при затвердевании, в то время как на остаточное напряжение в стекловолокне влияют как натяжение при намотке, так и усадка при затвердевании связующего.

Для оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния полимерно-композиционного трубопровода под действием эксплуатационных нагрузок рассмотрено последовательное решение трех задач механики деформированного твердого тела. Первая задача направлена на отыскание эффективных характеристик армированного слоя посредством многоуровневого моделирования [42]. Вторая задача направлена на определение остаточных полей напряжений, возникающих в ПАТ в процессе изготовления. В рамках третьей задачи рассмотрено деформирование ПАТ под действием постоянного внутреннего давления с учетом остаточных напряжений, полученных при решении второй задачи.

Материалы и методы

Рассматриваемая ПАТ представляет собой многослойную связанную конструкцию без теплоизоляционного слоя в защитной оболочке. Для проведения решения задач в силу симметрии нагрузок, механических характеристик материалов и протяженности конструкции принята гипотеза о плоскодеформированном состоянии конструкции. В рамках введенной гипотезы рассматривается поперечное сечение ПАТ, упрощенная схема и геометрические параметры приведены на рис. 2.

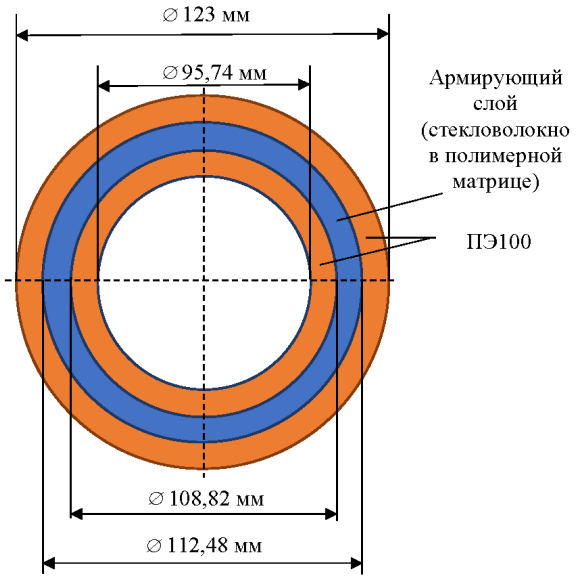


Рис. 2. Вид и геометрические характеристики сечения ПАТ

Fig. 2. Type and geometric characteristics of the PRP section

Основные физико-механические характеристики полиэтилена высокой плотности ПЭ 100 [43] и стекловолокна [44] приведены в таблице. В первом приближении, для отработки методологии проведения исследования материалы рассмотрены как линейно упругие и изотропные, без учета влияния температуры и времени.

Физико-механические свойства материалов

Physical and mechanical properties of materials

Свойства	ПЭ 100	Стекловолокно
Модуль упругости, МПа	1 100	80 000
Коэффициент Пуассона	0,3	0,24
Коэффициент температурного расширения, K^{-1}	1,8E-4	6E-6
Плотность, кг/м^3	949	1900
Предел текучести при растяжении, МПа	24	–
Предел прочности при разрыве, МПа	35	3500

Решение поставленных задач осуществлено численно, методом конечных элементов. Конечно-элементная сетка создана с помощью изопараметрических плоских восьми узловых элементов второго порядка аппроксимации с двумя неизвестными в каждом узле – Plane183. На границе сопряжения различных материалов реализованы граничные условия в виде равенства перемещения, температур и тепловых потоков (идеальный контакт).

Прогнозирование эффективных характеристик армированного слоя

Для прогнозирования эффективных характеристик армированного слоя, образованного стекловолокном и полимерной матрицей, сформулирована термоупругая задача механики для двух уровней представления материала. На первом уровне рассматривается монослой – бесконечные волокна, уложенные по гексагональной схеме в матрице из полиэтилена. Предполагается, что волокно и связующее изотропные материалы. На втором уровне рассмотрен пакет из монослоев, при этом монослои описаны как однородный трансверсально изотропный материал с распределенными эффективными характеристиками. Для пакета вычисляется набор характеристик, необходимый для дальнейшего описания его поведения как однородного ортотропного материала. В рамках численного прогнозирования эффективных характеристик рассмотрена общая постановка задачи теории упругости, с соответствующими граничными условиями.

Уравнения равновесия:

$$\mathrm{div}\hat{\sigma}(\mathbf{X}) = 0, \quad \mathbf{X} \in V; \tag{1}$$

– геометрические соотношения теории малых деформаций

$$2\hat{\varepsilon}(\mathbf{X}) = \nabla u(\mathbf{X}) + \left(\nabla u(\mathbf{X})\right)^T + \varepsilon^T, \quad \mathbf{X} \in V, \tag{2}$$

$$\varepsilon^T(\mathbf{X}) = \hat{\alpha}\Delta T(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in V;$$

– граничные условия

$$u(\mathbf{X}) = U(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in S_u, \tag{3}$$

– определяющие соотношения

$$\hat{\sigma}(\mathbf{X}) = \mathbf{C}^T\hat{\varepsilon}(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in V, \tag{4}$$

где $\hat{\sigma}$, $\hat{\varepsilon}$ – тензоры напряжений и деформаций с компонентами σ_{ij} и ε_{ij} соответственно; $\mathbf{C}$ – тензор механических материальных констант; $\hat{\alpha}$ – тензор коэффициентов линейного температурного расширения; $u(\mathbf{X})$ – вектор перемещений с компонентами u_i; $\mathbf{X}$ – радиус-вектор произвольной точки тела, имеющий компоненты x_i; $U(\mathbf{X})$ – заданный на части S_u границы S вектор перемещений с компонентами U_i.

Для построения конечно-элементного аналога созданы две модели: ячейка периодичности для монослоя, представительный объем для многослойного трубопровода. Модели представлены на рис. 3.

Для построения полного набора характеристик монослоя и представительного объема последовательно проведены серии вычислительных экспериментов:

− исследование при деформировании в направлении кольцевого армирования (окружная координата), направление *x* на рис. 3;

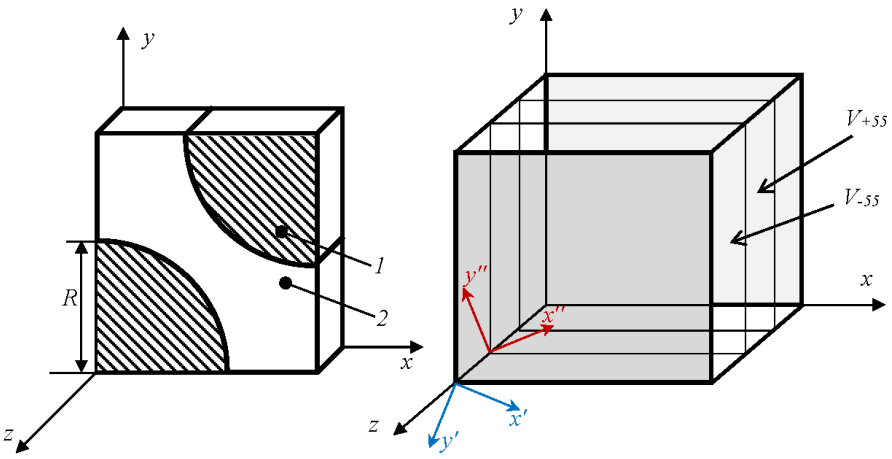
− исследование при деформировании в направлении перпендикулярном кольцевому армированию (осевая координата), направление *y* на рис. 3;

− исследование при деформировании в направлении перпендикулярном плоскости слоев, направление *z* на рис. 3, *b*;

− исследование температурного расширения в трех плоскостях.

Используя возможности встроенного языка программирования инженерного пакета, реализована автоматизированная процедура прогнозирования эффективных механических характеристик материала, которая позволяет учесть объемное содержание волокон в армированном слое.

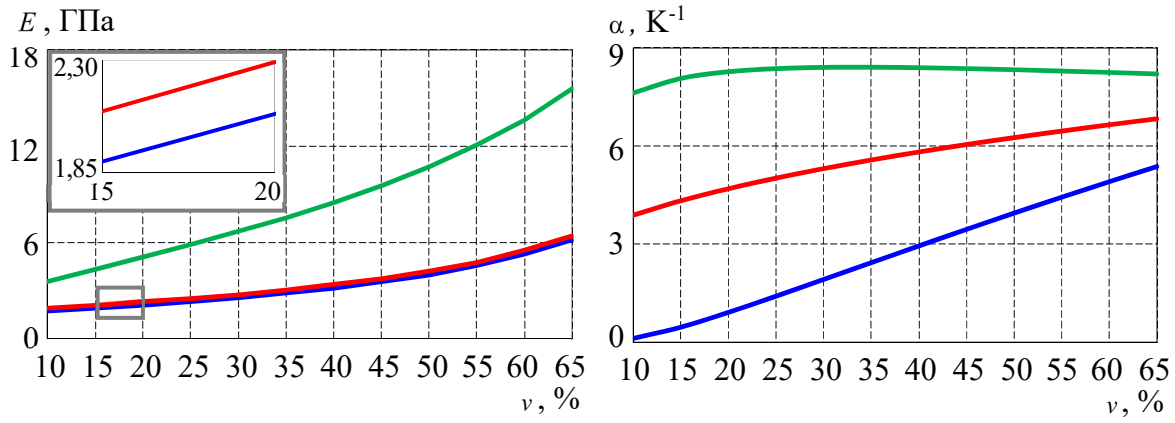
Для оценки влияния объемного содержания волокна на механические характеристики материала построены зависимости модулей Юнга и коэффициента линейного температурного расширения в трех главных направлениях для случаев 2, 4 и 7 слоев армирования трубы. В каждом случае объемная доля волокон **v** варьировалась от 10 до 65 % включительно. Полученные зависимости для случая 7 слоев армирования представлены на рис. 4.



a *b*

Рис. 3. Ячейка периодичности (*a*) и представительный объем (*b*): *1* – наполнитель (волокно); *2* – связующее; R – радиус волокна; $V_{\pm 55}$ – слои с заданным углом армирования; *x'*, *y'*, *x''*, *y''* – локальные системы координат

Fig. 3. Periodicity cell (*a*) and representative volume (*b*): *1* – filler (fiber); *2* – binder; R – fiber radius; $V_{\pm 55}$ – layers with a given reinforcement angle; *x'*, *y'*, *x''*, *y''* – local coordinate systems



a *b*

Рис. 4. Зависимости механических характеристик от объемной доли волокна: *a* – модуль Юнга; *b* – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР); зеленый – осевое, синий – окружное, красный – радиальное направления

Fig. 4. Mechanical properties as a function of fiber volume fraction: *a* – Young's modulus; *b* – coefficient of linear thermal expansion; green – axial, blue – circumferential, red – radial directions

Установлено, что снижение доли армирующего волокна до минимального значения в рассматриваемом композите ведет к снижению модуля упругости в осевом направлении на 75 %, в окружном и радиальном направлении на 35 %. Величина модуля упругости в радиальном направлении выше на 9,7 %, чем в окружном, при 10 % объемной доли волокна. Увеличение объемной доли волокна постепенно снижает различия модуля упругости в радиальном и окружном направлении. При объемной доле волокна 65 % различие достигает 3,5 %. Влияние объемной доли волокна на коэффициент линейного температурного расширения наиболее существенно в радиальном направлении. Таким образом, получены значения эффективных характеристик для армированного слоя, в зависимости от количества слоев и объемной доли волокна. Отмечено, что при рассмотрении моделей упругости максимальные значения в осевом направлении, а в радиальном и окружном практически идентичны, что обеспечивается симметричностью схемы армирования.

Прогнозирование остаточных напряжений в процессе изготовления

Для прогнозирования остаточных напряжений в трубопроводе решается задача о моделировании технологического процесса изготовления. Технологический процесс изготовления представлен в виде поэтапного увеличения толщины трубопровода с учетом текущего распределения температур в конструкции и температуры вновь укладываемого материала. Такой подход позволил свести решение задачи к последовательному решению набора стационарных задач термоупругости, что существенно сократило требования к вычислительным ресурсам. В силу симметричности конструкции и нагрузок рассмотрена 1/4 часть сечения ПАТ. На рис. 5 представлена расчетная схема: V_1 – существующий объем, на первом шаге соответствующий лейнеру, который имеет температуру окружающей среды. V_i – объем, соответствующий формируемому слою на текущем шаге с температурой расплавленной полимерной матрицы. По мере формирования новых слоев объем V_1 увеличивается. S_1 внутренняя поверхность ПАТ. Геометрия ПАТ характеризуется внутренним радиусом лейнера R_1, внутренним и внешним радиусом армированного слоя R_{r1_1} и R_{r1_2} соответственно, а также внешним радиусом внешней оболочки R_{os}.

В первом приближении решено рассмотреть задачу в виде последовательного решения набора стационарных задач, каждая из которых соответствует формированию нового слоя конструкции. Для оценки напряженно-деформированного состояния трубы в процессе изготовления необходимо решать два типа задач. Первая задача – это отыскание распределения температурных полей, реализующихся в конструкции на каждом шаге изготовления, которая включает:

– стационарное уравнение теплопроводности:

$$\nabla^2 T(\mathbf{X}) = 0; \tag{5}$$

– граничные условия:

$$\begin{aligned} T(\mathbf{X}) &= T_1, \mathbf{X} \in V_1, \\ T(\mathbf{X}) &= T_i, \mathbf{X} \in V_i, \end{aligned} \tag{6}$$

где $T(\mathbf{X})$ – стационарное температурное поле; $\mathbf{X}$ – радиус-вектор произвольной точки тела, имеющий компоненты x_i; T_1, T_i – начальные температуры объемов V_1, V_i соответственно.

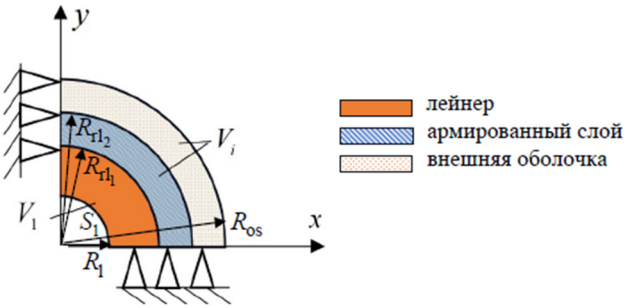


Рис. 5. Расчетная схема для моделирования технологического процесса создания ПАТ и эксплуатации

Fig. 5. Calculation scheme for modeling the technological process of creating and operating a PRP

Вторая задача – это определение напряженно-деформированного состояния конструкции на каждом шаге технологического процесса производства с учетом полученного распределения температур. Для этого последовательно решается краевая задача теории упругости (1)–(4), дополненная условием:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}) = \sigma_0, \mathbf{X} \in V_1, \tag{7}$$

где σ_0 – напряжения, полученные на предыдущем шаге.

Задача отыскания эволюции НДС конструкции ПАТ в процессе изготовления предполагает постепенное наращивание толщины с учетом начальных напряжений в каждом слое, в том числе возникающих от усилия натяжения лент. В пакете инженерного анализа данный процесс смоделирован с помощью технологии «оживления» конечных элементов [45], которая позволяет активировать и деактивировать состояние элемента на определённом шаге решения. При этом на первом шаге деактивируются элементы, соответствующие армированным слоям и внешней оболочке, путем умножения их жёсткости на коэффициент понижения. Затем последовательно активируются элементы, соответствующие вновь нанесенному слою, путем возвращения значений жесткости к их исходным значениям. Активация происходит без записи истории деформации, однако деформации рассчитываются для вновь активированных элементов на основе текущих и начальных значений нагрузок. Следова-

тельно, активированные элементы имеют начальное преднапряженное состояние. Для учета натяжения армирующего материала в конечных элементах задано начальное напряжение, которое можно определить по соотношению $\sigma_0 = F_0/b_l h$, где F_0 – сила натяжения, b_l – ширина, h – толщина полосы стеклоровинга.

В результате решения поставленной задачи получены значения максимальных и минимальных компонент остаточных напряжений для каждого шага изготовления. Рассмотрены случаи формирования ПАТ с 2 и 7 слоями армирования. На рис. 6 представлены распределения максимальных и минимальных значений главных компонент тензора напряжений для армированного слоя.

Кроме этого, проведен анализ распределения компонент тензора напряжений в защитных оболочках. Получено, что радиальные напряжения в полиэтилене и армированном слое отличаются незначительно. В окружном и осевом направлениях напряжения в армированном слое на порядки выше, чем в полиэтилене. При этом в армированном слое отмечен устойчивый рост напряжений по мере увеличения толщины ПАТ, в полиэтилене при этом увеличиваются значения сжимающих напряжений. Кроме этого, установлено, что увеличение количества слоев армирования ведет к росту остаточных напряжений в трубопроводе, при этом в материалах конструкции не отмечено превышения пределов прочности.

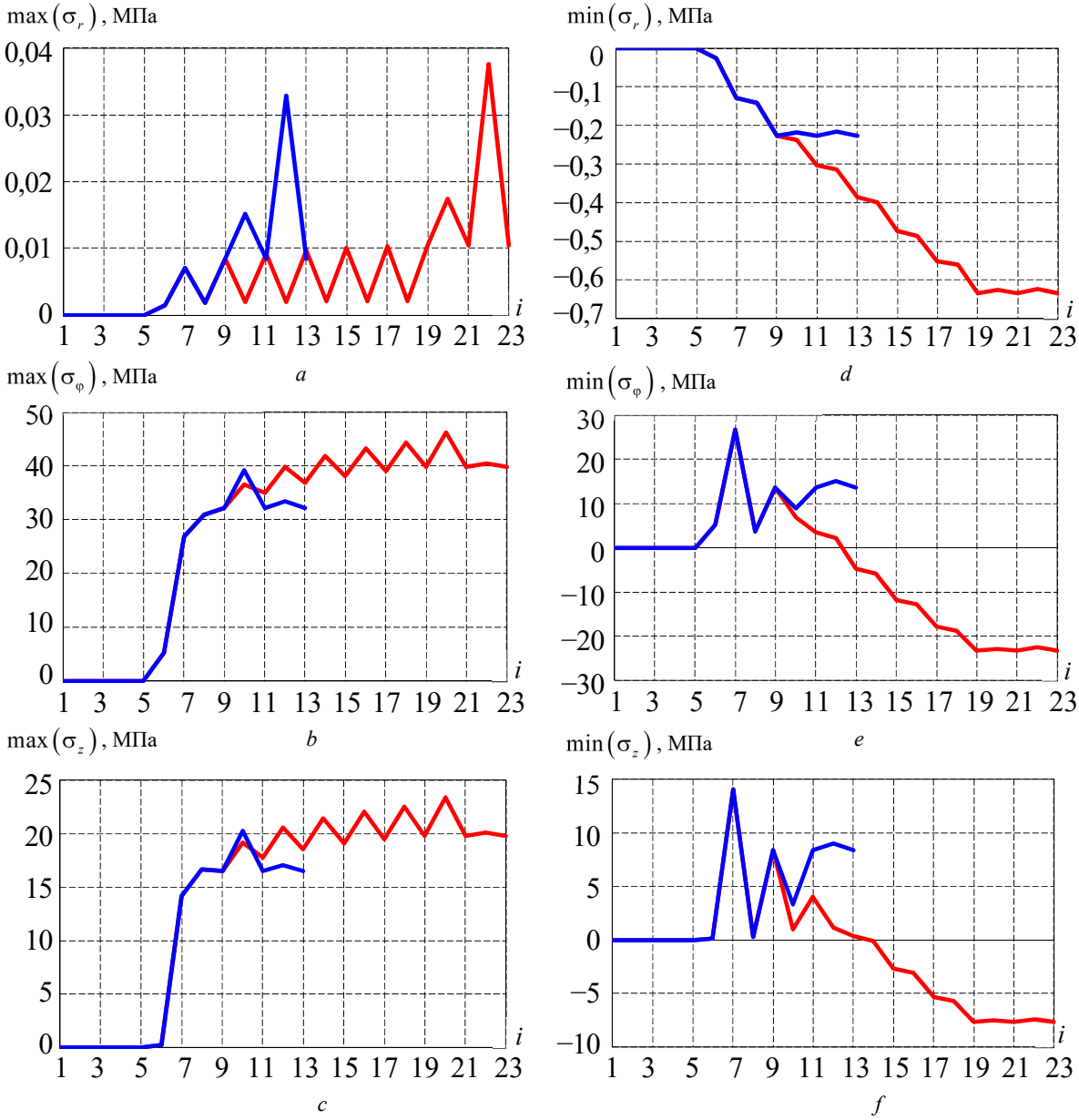


Рис. 6. Зависимость компонент напряжений в армированном слое по шагам технологического процесса *i*: *a*, *b*, *c* – максимальные; *d*, *e*, *f* – минимальные; *a*, *d* – радиальные; *b*, *d* – окружные; *c*, *e* – осевые; синяя линия – 2 слоя армирования, красная линия – 7 слоев армирования

Fig. 6. Dependence of stress components in the reinforced layer by process *i* steps: *a*, *b*, *c* – maximum ones; *d*, *e*, *f* – minimum ones; *a*, *d* – radial; *b*, *d* – circumferential; *c*, *e* – axial; blue line – 2 reinforcement layers, red line – 7 reinforcement layers

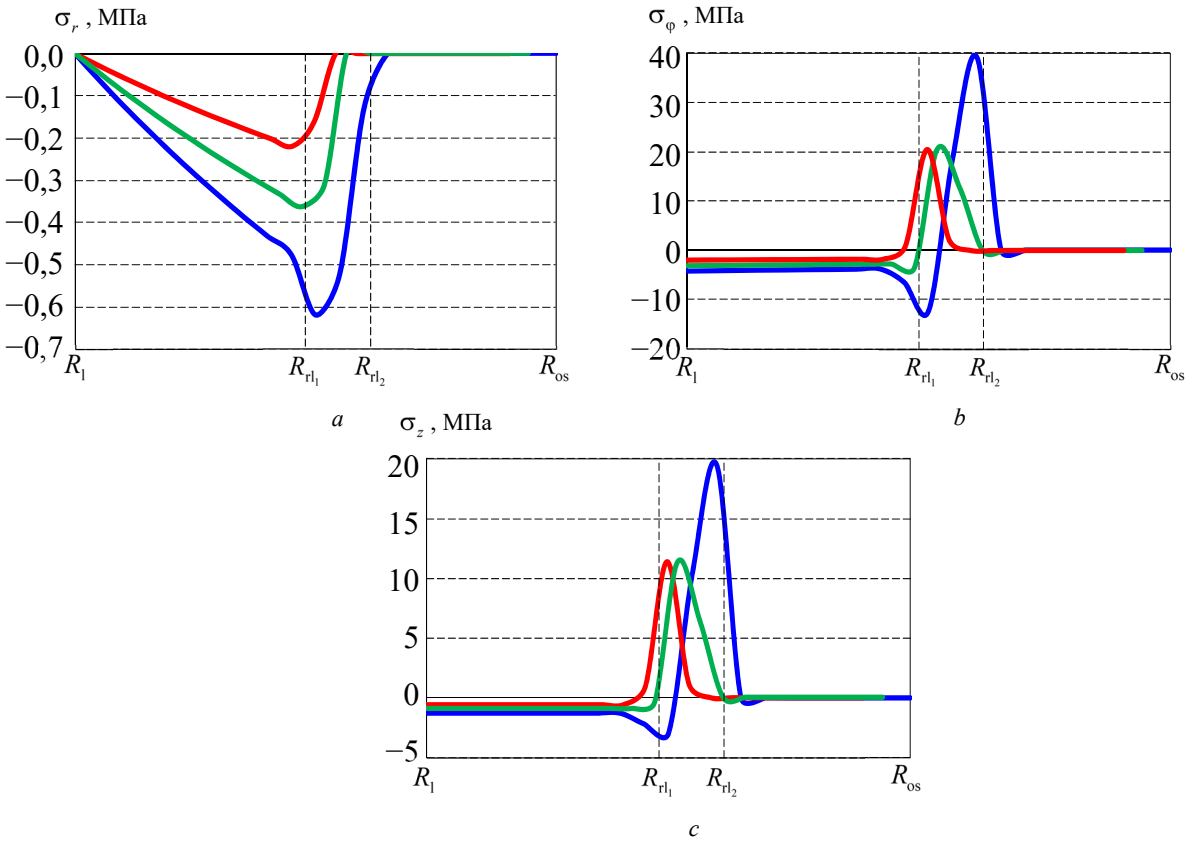


Рис. 7. Распределения компонент напряжений по толщине трубы: *a* – радиальные; *b* – окружные; *c* – осевые; красный – 2 слоя, зеленый – 4 слоя, синий – 7 слоев армирования

Fig. 7. Distribution of stress components across the pipe thickness: *a* – radial; *b* – circumferential; *c* – axial; red – 2 layers, green – 4 layers, blue – 7 layers of reinforcement

Построены распределения значений компонент тензора остаточных напряжений по толщине ПАТ для трех вариантов армирования. Полученные зависимости представлены на рис. 7.

Получено, что максимальные значения напряжения реализуются в армированном слое, при этом на внешней границе армированного слоя происходит скачок напряжений, что может указывать на вероятность возникновения технологических дефектов в этой зоне. При рассмотрении случая из 7 слоев стеклоровинга максимальное значение окружного значения напряжения превышает предел прочности на разрыв для материала ПЭ 100, что указывает на высокую вероятность разрушения связующего материала в этой зоне, что нарушит монолитность конструкции и может привести к негативным последствиям при эксплуатации [45].

Прогнозирование НДС под действием внутреннего давления

Для оценки влияния остаточных технологических напряжений на деформированное состояние ПАТ под действием эксплуатационных характеристик выбран случай действия на конструкцию с семью слоями армирования постоянного внутреннего давления. Для этого предварительно отдельно решена задача в стационарной упругой постановке, без учета остаточных напряжений, объемных сил тяжести и изменения температуры конструкции. Расчетная схема представлена на рис. 5, на внутреннюю поверхность ПАТ S_1 действует постоянное внутреннее давление.

Для математического описания поведения трубопровода система уравнений (1)–(4) дополняется следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}\big|_{r\in S_1} &= -P, \\ \sigma_{rr}\big|_{r\in S_2} &= 0. \end{aligned} \tag{8}$$

Величина давления P принята постоянной и равной 4 МПа, что соответствует нормативным условиям эксплуатации.

В результате численного решения задачи получено напряженно-деформированное состояние ПАТ без учета остаточных технологических напряжений. Построены распределения компонент тензора напряжений по толщине без учета остаточных технологических напряжений. Полученные распределения представлены на рис. 8.

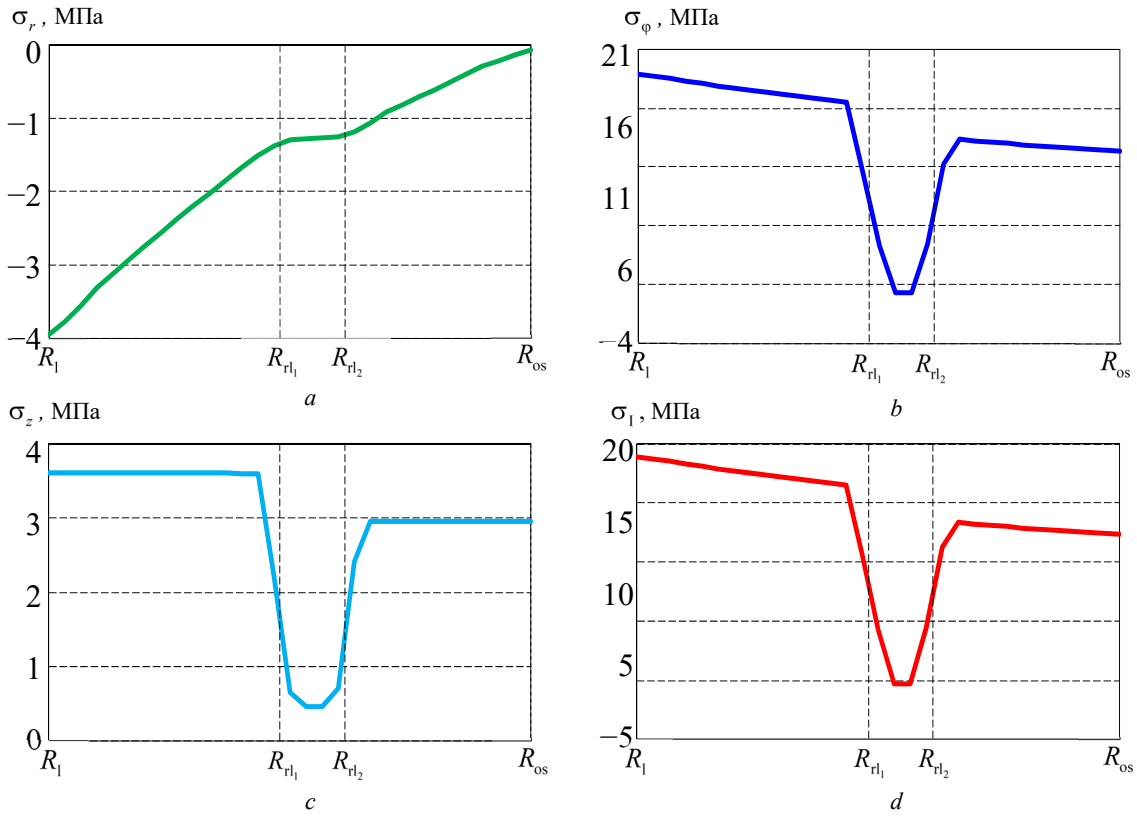


Рис. 8. Распределения компонент напряжений по толщине трубопровода: *a* – радиальные; *b* – окружные; *c* – осевые; *d* – первое главное

Fig. 8. Distribution of stress components across the pipeline thickness; *a* – radial; *b* – circumferential; *c* – axial; *d* – first main one

Получено, что под действием внутреннего давления радиальные напряжения носят сжимающий характер, с выходом на нулевые значения у внешней поверхности трубопровода. Максимальные окружные и осевые напряжения реализуются на внутренней поверхности, при этом в армирующем слое они существенно ниже. При этом максимальные значения принимают окружные напряжения, значения которых достигают 18,9 МПа. Пределы текучести для материала ПЭ 100 не достигаются. Однако резкий градиент на границах армированного слоя может негативно сказаться на монолитности конструкции и привести к межслоевым расслоениям в этой зоне.

Установлено, что в радиальном направлении ПАТ испытывает преимущественно сжимающую нагрузку, в окружном и осевом направлениях реализуются растягивающие усилия. Полученное напряжено-деформированное состояние соответствует известным решениям упругих задач о деформировании полых цилиндров под действием внутреннего давления [46]. При этом важно отметить, что в армированном слое реализуются максимальные радиальные деформации и сжимающие напряжения в окружном и осевом направлениях, что указывает на стесненное состояние материала в данных направлениях. При этом полученные величины напряжений не превышают известных пределов прочности материалов.

Для учета влияния остаточных технологических напряжений на напряженно-деформированного состояния трубопровода под действием постоянного внутреннего давления проведено последовательное численное решение: на первом этапе выполнено моделирование технологического процесса изготовления; на втором этапе полученная конструкция была нагружена внутренним постоянным давлением. Полученные в результате такого подхода распределения компонент тензора напряжений по толщине трубопровода представлены на рис. 9.

Установлено, что в окружном направлении максимальные напряжения реализуются в армированном слое, превышают предел прочности на разрыв для материала ПЭ 100, что свидетельствует о возможности возникновения межслоевых расслоений между слоями ровинга, преимущественно в зоне сопряжения с наружным слоем ПЭ 100. При этом увеличение внутреннего давления приведет к нарушению целостности конструкции [47].

Таким образом, при решении задач о прогнозировании напряженно-деформированного состояния гибких ПАТ в условиях монтажа и эксплуатации необходимо учитывать уровень остаточных напряжений, возникающий в конструкции.

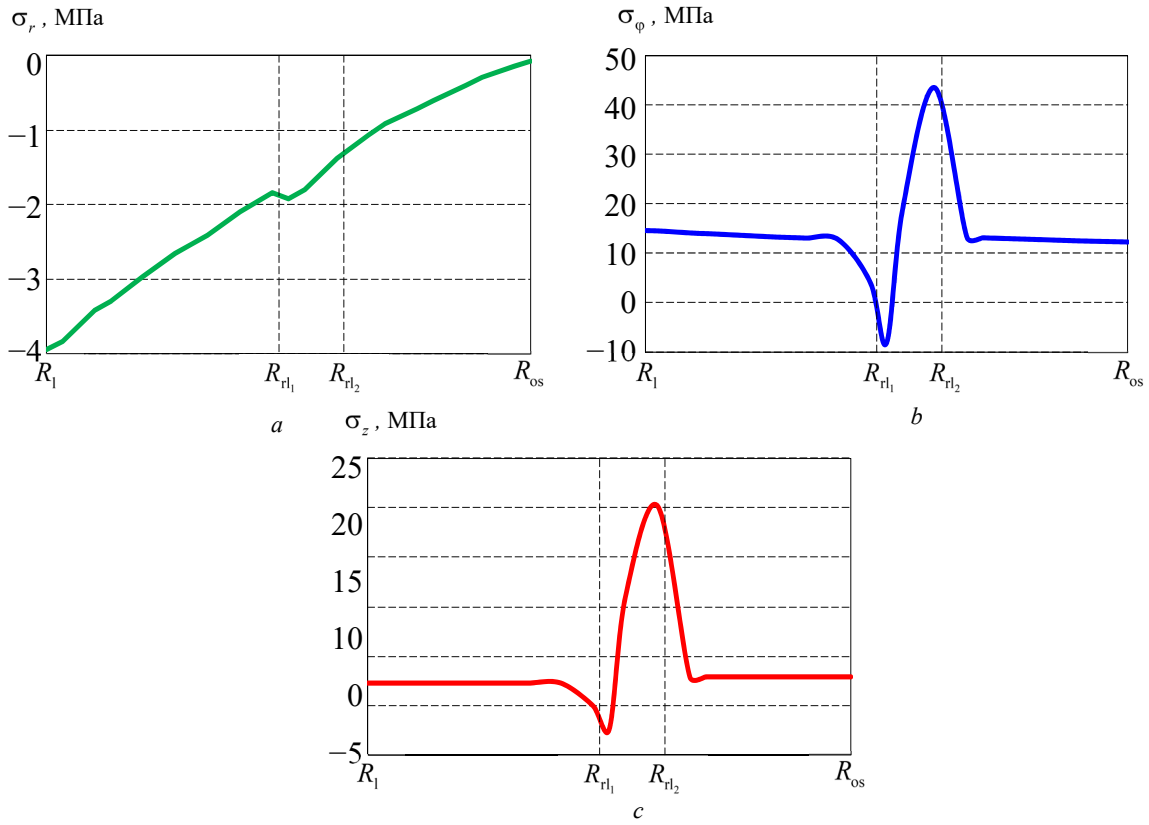


Рис. 9. Распределения компонент тензора напряжений по толщине трубопровода с учетом остаточных технологических напряжений: *a* – радиальные; *b* – окружные; *c* – осевые

Fig. 9. Distribution of stress tensor components across the pipeline thickness, taking into account residual process stresses; *a* – radial; *b* – circumferential; *c* – axial

Заключение

В рамках исследования последовательно реализовано три этапа для прогнозирования напряженно-деформированного состояния ПАТ под действием внутреннего давления с учетом остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления. Для этого на первом этапе построены процедуры прогнозирования эффективных характеристик армированного слоя; на втором этапе решена задача о прогнозировании остаточных технологических напряжений; на третьем этапе решена задача об отыскании напряженно-деформированного состояния под действием внутреннего давления с учетом остаточных технологических напряжений.

Данное исследование носит поисковый характер, направленный на выявление проблемных зон конструкции ПАТ, формирование и отработку методологии проведения моделирования поведения под действием различных нагрузок. В рамках представленной работы рассмотрены упругие характеристики материалов и стационарные формулировки задач. При этом в рамках принятых гипотез и ограничений получены следующие результаты:

1. Построены зависимости эффективных механических характеристик от объемной доли волокна в армированном слое.

2. Определены величины и распределения остаточных технологических напряжений в ПАТ, установлено, что на внешней границе сопряжения армированного слоя с защитной оболочкой реализуется резкий градиент напряжений в окружном и осевом направлениях.

3. Определены поля деформаций и напряжений, реализующихся в ПАТ под действием постоянного внутреннего давления без учета остаточных технологических напряжений.

4. Построены распределения компонент тензора напряжений по толщине ПАТ под действием рабочего внутреннего давления с учетом остаточных технологических напряжений.

5. Установлено, что напряжения в окружном направлении превышаются пределы прочности для полиэтилена, что может стать причиной нарушения целостности и герметичности ПАТ.

Зависимости эффективных характеристик композиционной структуры ПАТ, в том числе с возможностью формирования данных для разного содержания волокна в армированном слое, а также остаточные технологические напряжения определены впервые. Анализ реакции ПАТ на внутреннее давление от транспортируемой среды, в том числе с учетом остаточных технологических напряжений выполнен впервые.

Однако рассматриваемые материалы в действительности имеют выраженное нелинейное поведение [48; 49], а именно в них реализуются механизмы релаксации напряжений, в том числе как при изготовлении, так и при дальнейшем хранении. Поэтому при дальнейшем исследовании предложено провести следующие мероприятия для уточнения математических моделей поведения ПАТ:

1. Провести экспериментальные исследования термореологических свойств ПЭ 100 и композита на основе стекловолокна и ПЭ 100.

2. Провести экспериментальные исследования прочностных характеристик композиционного материала на основе стекловолокна и ПЭ 100, в том числе в условиях сдвига.

3. Уточнить разработанные модели и алгоритмы, с учетом термореологических свойств материалов.

4. Уточнение разработанных моделей и алгоритмов, с учетом межслоевого взаимодействия на границе слоев из ПЭ и композиционного материала.

Рассмотренная постановка задачи позволяет проводить только качественную приближенную оценку напряженно-деформированного состояния ПАТ в процессе изготовления и эксплуатации. Для поиска и формулирования отбракованных характеристик, рекомендаций по монтажу и эксплуатации необходимо реализовать переход к более сложным моделям описания поведения материалов, учитывающих температурные и временные зависимости механических характеристик материалов ПЭ 100 и композиционного материала на его основе.

Библиографический список

1. Гребенюк, Г.Н. Магистральные нефтепроводы и их воздействие на окружающую среду / Г.Н. Гребенюк, Е.А. Чернявский, Г.К. Ходжаева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1-5. – С. 1260–1263.

2. Gabbar, H.A. Framework of pipeline integrity management / H.A. Gabbar, H.A. Kishawy // International Journal of Process Systems Engineering. – 2011. – Vol. 1, no. 3/4. – P. 215–236. DOI: 10.1504/IJPSE.2011.041560

3. Kishawy, H.A. Review of pipeline integrity management practices / H.A. Kishawy, H.A. Gabbar // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2010. – Vol. 87(7) – P. 373–380. DOI: 87. 373-380. 10.1016/j.ijpvp.2010.04.003

4. О применении труб из полимерных материалов для промысловых трубопроводов / Д.А. Гулин [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2020 – Т. 18, № 6. – С. 107–115. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-107-115

5. Подход к выбору типов полимерно-композитных труб для промысловых трубопроводов / А.А. Гарифуллин [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 6. – С. 86–100.

6. Колбасин, А.В. Состояние и перспективы развития трубной промышленности России / А.В. Колбасин, Е.П. Гармашова // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т. 13, № 7. – С. 2189–2204. DOI 10.18334/epp.13.7.117873

7. ГОСТ Р 59834-2021. Промысловые трубопроводы. Трубы гибкие полимерные армированные и соединительные детали к ним. Общие технические условия. – М., 2021. – 32 с.

8. ГОСТ Р 59910-2021. Трубы полимерные, армированные металлическим каркасом, и соединительные детали к ним. Общие технические условия. – М., 2022. – 36 с.

9. ГОСТ Р 70623-2023. Трубопроводы промысловые. трубопроводы из гибких полимерных армированных труб. Правила проектирования, монтажа и эксплуатации. – М., 2024. – 52 с.

10. ГОСТ Р 70624-2023. Трубопроводы промысловые из труб полимерных, армированных металлическим каркасом. Правила проектирования, монтажа и эксплуатации. – М., 2024. – 48 с.

11. Полимерные решения для промысловых трубопроводов: электрон. журн. «СИБУР Клиентам». – URL: https://magazine.sibur.ru/publication/trends/polimernye-resheniya-dlya-promyslovykh-truboprovodov/ (дата публикации: 12.12.2024).

12. Плис, С.А. Анализ деятельности предприятий ТЭК в регионе и возможности оптимизации бизнес-процессов нефтегазовых компаний / С.А. Плис, Х.Г. Чаплаев, Л.М. Идигова // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2024. – № 3(231). – С. 15–19.

13. Кладиев, С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин / С.Н. Кладиев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 8. – С. 220–231. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349

14. Крючатов, А.Д. Возможности промыслово-геофизического метода для открытия новых залежей, прироста запасов и обоснования эксплуатационного бурения / А.Д. Крючатов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 76–84. DOI: 10.17072/psu.geol.23.1.76

15. Совершенствование методов расчета долговечности элементов оборудования и трубопроводов / Р.А. Харисов [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 3(97). – С. 90–95.

16. Толмачев, А.А. Разработка математической модели напряженно-деформированного состояния многослойной полипропиленовой армированной трубы / А.А. Толмачев, А.А. Толмачев // Научный журнал Российского газового общества. – 2024. – № 1(43). – С. 36–42.

17. Yakupov, N.M. Calculation of Two-Layer Cylindrical Shells Based on the Spline Variant of the Finite Element Method / N.M. Yakupov, H.G. Kiyamov, I.Z. Mukhamedova // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2023. – Vol. 44. – P. 1813–1819. DOI: 10.1134/S1995080223050566

18. Mechanical Properties Study of Reinforced Thermoplastic Pipes Under A Tensile Load / Yy. Wang, M. Lou, B. Tong, S. Wang // China Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 34. – P. 806–816. DOI: 10.1007/s13344-020-0073-x

19. Влияние конструктивных дефектов на надежность полимерных труб армированных металлическими лентами / В.Р. Галлямов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 117–124. DOI 10.17122/ngdelo-2023-1-117-126. – EDN ECNFAG

20. Sebaey, T.A. Design of oil and gas composite pipes for energy production / T.A. Sebaey // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 162. – P. 146–155. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.016

21. Alkan, U. Effect of temperature and time on mechanical and electrical properties of HDPE/glass fibre composites / U. Alkan, Y. Özcanlı, V. Alekberov // Fibers and Polymers. –2013. – Vol. 14. – P. 115–120.

22. Experimental Study of the Effect of Temperature on the Circumferential Bending Performance of GFRP Pipes / S. Luan, J. Chen, Y. Lv, X. Zhang, L. Huang // Polymers. – 2023. – Vol. 15. – Art. 392. DOI: 10.3390/polym15020392

23. Sebeay, T.A. Numerical Investigation into GFRP Composite Pipes under Hydrostatic Internal Pressure / T.A. Sebeay, A. Ahmed // Polymers. – 2023. – Vol. 15(5). – Art. 1110. DOI: 10.3390/polym15051110

24. Хакимов, А.Г. Взаимодействие неустойчивостей трубопровода при статическом нагружении / А.Г. Хакимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 87–94. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.09

25. Rafiee, R. Evaluating long-term performance of glass fiber reinforced plastic pipes subjected to internal pressure / R. Rafiee, B. Mazhari // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 122. – P. 694–701. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.103

26. ГОСТ Р 55990–2014 Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования. – М., 2015. – 90 с.

27. Evaluating the Residual Stress and Its Effect on the Quasi-Static Stress in Polyethylene Pipes / N. Tan, L. Lin, T. Deng, Y. Dong // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – Art. 1458. DOI: 10.3390/polym14071458

28. The effect of residual stress on polymer pipe lifetime / P. Hutař, M. Ševčík, A. Frank, L. Náhlík, J. Kučera, G. Pinter // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – Vol. 108. – P. 98–108. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2013.04.014

29. Krishnaswamy, R.K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes / R.K. Krishnaswamy // Polymer. – 2005. – Vol. 46(25). – P. 11664–11672. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.09.084

30. Creep rapture of plastic pipes: Effect of eccentricity, residual stress, and circumferential orientation / S. Deveci, A. Khaleel, B. Eryigit, F. AlHameli // Polymer Testing. – 2024. – Vol. 133(2). – Art. 108408. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108408

31. Chaoui, K. Effect of residual stress on crack propagation in MDPE pipes / K. Chaoui, A. Chudnovsky, A. Moet // Journal of Materials Science. – 1987. – Vol. 22. – P. 3873–3879 DOI: 10.1007/BF01133334

32. Guevara-Morales, A. Experimental investigation of the effect of residual stresses on rapid crack propagation in polyethylene (PE100) pipes / A. Guevara-Morales, P. Leevers // Polymer Engineering & Science. – 2013. – Vol. 53. – P. 1217–1222. DOI: 10.1002/pen.23381

33. Residual stress in polyethylene pipes / J. Poduška, P. Hutař, J. Kučera, A. Frank, J. Sadílek, G. Pinter, L. Náhlík // Polymer Testing. – 2014. – Vol. 40. – P. 88–98. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2014.08.006

34. Choi, S. Residual stresses in plastic pipes and fittings – I. Methods for experimental analysis / S. Choi, L.J. Broutman // Polymer (Korea). – 1996. – Vol. 21. – P. 71–82.

35. A refined one-slit-ring method to quantify residual hoop stress in chlorinated polyvinyl chloride pipe-application to specimens after immersion in primer / B. Chen, P.Y.B. Jar, P. Mertiny, R. Prybysh // Polymer Engineering and Science. – 2019. – Vol. 59. – P. E296-E309.

36. Williams, J.G. The determination of residual stresses in plastic pipe and their role in fracture / J.G. Williams, J.M. Hodgkinson, A. Gray // Polymer Engineering and Science. – 1981. – Vol. 21(13). – P. 822–828. DOI: 10.1002/pen.760211304

37. Rafiee, R. On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review / R. Rafiee // Composite Structures. – 2016. – Vol. 143. – P. 151–164. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.02.037

38. Effect of Process Parameters on Thermal and Mechanical Properties of Filament Wound Polymer-Based Composite Pipes / S. Srebrenkoska, F. Kochoski, V. Srebrenkoska, S. Risteska, R. Kotynia // P olymers (Basel). – 2023. – Vol. 15(13). – Art. 2829. DOI: 10.3390/polym15132829. PMID: 37447476; PMCID: PMC10346241.

39. Effects of Tape Tension on Residual Stress in Thermoplastic Composite Filament Winding / Haibo Lu, Martin Schlottermuller, Norbert Himmel, Ralf Schledjewski // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2005. – Vol. 18. – P. 469–487. 10.1177/0892705705054409.

40. Ghasemi, A.R. Determination of the influence of thermomechanical factors on the residual stresses of cylindrical composite tubes: Experimental and computational analyses / A.R. Ghasemi, B. Asghari, A. Tabatabaeian // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2020. – Vol. 183. – Art. 104098. 10.1016/j.ijpvp.2020.104098.

41. Process-induced residual stress analysis of reinforced layer of reinforced thermoplastic pipes / C. Zhang, Y. Wang, M. Lou, W. Liang, D. Yang, X. Qi // Polymer Composities. – 2025. – P. 1–19. DOI: 10.1002/pc.29908

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683405 Российская Федерация. Автоматизация прогнозирования эффективных вязкоупругих свойств слоистого композита: № 2022683467: заявл. 05.12.2022: опубл. 05.12.2022 / Г.В. Ильиных, Л.Р. Сахабутдинова, О.Ю. Сметанников; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

43. Simulation study of fatigue lifetime in PE100 pipes / A. Medjadji, M. Mazari, T. Kebir, A. Belaziz // Journal Européen des Systèmes Automatisés. – 2019. – Vol. 52, no. 6. – P. 649–654. DOI: 10.18280/jesa.520613

44. Вавилова, М.И. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков / М.И. Вавилова, Н.С. Кавун // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 3(32). – С. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37

45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690336 Российская Федерация. Модуль для прогнозирования технологических напряжений в процессе изготовления методом протрузии армированных цилиндрических конструкций из полимерных композиционных материалов: № 2024690230: заявл. 13.12.2024: опубл. 13.12.2024 / А.П. Богданова, А.А. Каменских, Ю.С. Кузнецова [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

46. Колтунов, М.А. Упругость и прочность цилиндрических тел / М.А. Колтунов. – М.: Высшая школа, 1975. – 526 с.

47. Федотова, А.В. Моделирование в лабораторных условиях механизмов разрушения труб из гибких и жестких полимерно-армированных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли / А.В. Федотова, К.А. Перов, М.В. Богатов // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2024. – № 6. – С. 47–61. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.047-061

48. Nonlinear Mechanical Behavior of Glass Fiber/ Epoxy Resin Composite Under Medium and Low Strain Rates Loading / Z. Liu, J. Zhong, R. Ren, Z. Tang, C. Zhao, X. Liu, Y. Gao, J. Ren // Applied Composite Materials. – 2024. – Vol. 31. – P. 1369–1392. DOI: 10.1007/s10443-024-10233-0

49. Zhang, Y. Comparison of Mechanical Properties Between PE80 and PE100 Pipe Materials / Y. Zhang, P.-Y. Jar // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25. – P. 4326–4332. 10.1007/s11665-016-2274-2

References

1. Grebenyuk G.N., Chernyavskij E.A., Khodzhaeva G.K. Magistral'nye nefteprovody i ikh vozdejstvie na okruzhayushchuyu sredu [Main oil pipelines and their impact on the environment]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2011, V. 13, No 1-5, pp. 1260-1263.

2. Gabbar H.A., Kishawy H.A. Framework of pipeline integrity management. *International Journal of Process Systems Engineering*, 2011, V. 1, No. 3/4, pp. 215-236. DOI: 10.1504/IJPSE.2011.041560.

3. Kishawy H.A., Gabbar H.A. Review of pipeline integrity management practices. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, V. 87(7), pp. 373-380. DOI: 87. 373-380. 10.1016/j.ijpvp.2010.04.003.

4. Gulin D.A., Karpova K.E., Glazkov A.S., Nasibullin T.R. O primenenii trub iz polimernykh materialov dlya promyslovykh truboprovodov [On the use of pipes made of polymer materials for field pipelines]. *Petroleum engineering*, 2020, V. 18, No 6, pp. 107-115. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-107-115.

5. Garifullin A.A., Burkutbaev A.B., Romanchuk A.S., Vinogradov P.V., Kirillov D.A., Nebogin D.A. Podkhod k vyboru tipov polimerno-kompozitnykh trub dlya promyslovykh truboprovodov [An approach to choosing types of polymer composite pipes for field pipelines]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov*, 2023, No 6, pp. 86–100.

6. Kolbasin A.V., Garmashova E.P. Sostojanie i perspektivy razvitija trubnoj promyshlennosti Rossii [The state and prospects of development of the pipe industry in Russia]. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*, 2023, V. 13, No 7, pp. 2189-2204. DOI 10.18334/epp.13.7.117873

7. GOST R 59834-2021 Promyslovye truboprovody. Truby gibkie polimernye armirovannye i soedinitel'nye detali k nim. Obshchie tekhnicheskie usloviya. M., 2021. 32 p.

8. GOST R 59910-2021 Truby polimernye, armirovannye metallicheskim karkasom, i soedinitel'nye detali k nim. Obshchie tekhnicheskie usloviya. M., 2022. 36 p.

9. GOST R 70623-2023 Truboprovody promyslovye. truboprovody iz gibkikh polimernykh armirovannykh trub. Pravila proektirovaniya, montazha i ehkspluatacii. M., 2024. 52 p.

10. GOST R 70624-2023 Truboprovody promyslovye iz trub polimernykh, armirovannykh metallicheskim karkasom. Pravila proektirovaniya, montazha i ehkspluatacii. M., 2024. 48 p.

11. Polymer solutions for field pipelines: electronic journal «SIBUR Clients2. URL: https://magazine.sibur.ru/publication/trends/polimernye-resheniya-dlya-promyslovykh-truboprovodov/. Date of publication: 12.12.2024.

12. Plis S.A., Chaplaev Kh.G., Idigova L.M. Analiz dejatel'nosti predprijatij TJeK v regione i vozmozhnosti optimizacii biznes-processov neftegazovyh kompanij [Analysis of the FEC enterprises activities in the region and possibilities for optimizing business processes of oil and gas companies]. *Problems of economics and management of oil and gas complex*, 2024, No 3(231), pp. 15-19.

13. Kladiev S.N. Obzor i kriticheskij analiz sovremennogo sostojanija i putej razvitija tehnologicheskogo processa dobychi nefti jelektroprivodnym sposobom v preryvistyh rezhimah jekspluatacii malo- i srednedebitnyh skvazhin [Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, V. 334, No 8, pp. 220-231. – DOI 10.18799/24131830/2023/8/4349

14. Kryuchatov A.D. Vozmozhnosti promyslovo-geofizicheskogo metoda dlja otkrytija novyh zalezhej, prirosta zapasov i obosnovanija jekspluatacionnogo burenija [New feasibility of the borehole geophysical method for discovery of new deposits, extension additions, and justification of production drilling]. *Bulletin of Perm University. Geology*, 2024, V. 23, No 1, pp. 76-84. – DOI 10.17072/psu.geol.23.1.76

15. Kharisov R.A., Zaynullin R.S., Latypov A.M., Mukhametzyanov A.N. Sovershenstvovanie metodov rascheta dolgovechnosti jelementov oborudovanija i truboprovodov [Improvement of equipment component/pipeline longevity calculation methods]. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2014, No 3(97), pp. 90-95.

16. Tolmachev A.A., Tolmachev A.A. Razrabotka matematicheskoj modeli naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija mnogoslojnoj polipropilenovoj armirovannoj truby [Development of a mathematical model of the stress-strain state of a multilayer polypropylene reinforced pipe]. *Scientific journal of the Russian gas society*, 2024, No 1(43), pp. 36-42.

17. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Mukhamedova, I.Z. Calculation of Two-Layer Cylindrical Shells Based on the Spline Variant of the Finite Element Method. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2023. V. 44, pp. 1813-1819. https://doi.org/10.1134/S1995080223050566

18. Wang Yy., Lou M., Tong B., Wang S. Mechanical Properties Study of Reinforced Thermoplastic Pipes Under A Tensile Load. *China Ocean Engineering*, 2020, V. 34, pp. 806-816. https://doi.org/10.1007/s13344-020-0073-x.

19. Gallyamov V.R., Romanchuk A.S., Chervov A.A., Andriyashkin L.N., Vinogradov P.V. Vliyanie konstruktivnykh defektov na nadezhnost' polimernykh trub armirovannykh metallicheskimi lentami [The influence of structural defects on the reliability of polymer pipes reinforced with metal tapes]. *Petroleum engineering*, 2023, V. 21, No 1, pp. 117-124. – DOI 10.17122/ngdelo-2023-1-117-126. – EDN ECNFAG.

20. Sebaey T.A. Design of oil and gas composite pipes for energy production. *Energy Procedia*, 2019, V.162, pp. 146–155. DOI:10.1016/j.egypro.2019.04.016

21. Alkan U., Özcanlı Y., Alekberov V. Effect of temperature and time on mechanical and electrical properties of HDPE/glass fibre composites. *Fibers and Polymers,* 2013, V.14, pp.115–120.

22. Luan S., Chen J., Lv Y., Zhang X., Huang L. Experimental Study of the Effect of Temperature on the Circumferential Bending Performance of GFRP Pipes. *Polymers*, 2023, V. 15, Art. 392. https://doi.org/10.3390/polym15020392

23. Sebeay T.A., Ahmed A. Numerical Investigation into GFRP Composite Pipes under Hydrostatic Internal Pressure. *Polymers*, 2023, V. 15(5), Art. 1110. https://doi.org/10.3390/polym15051110

24. Khakimov A.G. Instability interactions of a pipe at static loading. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, No 3, pp. 87-94. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.09

25. Rafiee R., Mazhari B. Evaluating long-term performance of glass fiber reinforced plastic pipes subjected to internal pressure. *Construction and Building Materials,* 2016, V. 122, pp. 694–701. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.103

26. GOST R 55990 – 2014 Mestorozhdeniya neftyanye i gazoneftyanye. Promyslovye truboprovody. Normy proektirovaniya. M., 2015. 90 p.

27. Tan N., Lin L., Deng T., Dong Y. Evaluating the Residual Stress and Its Effect on the Quasi-Static Stress

in Polyethylene Pipes. *Polymers*, 2022, V. 14, Art. 1458. https://doi.org/10.3390/polym14071458

28. Hutař P., Ševčík M., Frank A., Náhlík L., Kučera J., Pinter G. The effect of residual stress on polymer pipe lifetime. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, Vol. 108, pp. 98-108. doi:10.1016/j.engfracmech.2013.04.014

29. Krishnaswamy R.K. Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes. *Polymer*, 2005, V. 46(25), pp. 11664-11672. DOI:10.1016/j.polymer.2005.09.084

30. Deveci S., Khaleel A., Eryigit B., AlHameli F. Creep rapture of plastic pipes: Effect of eccentricity, residual stress, and circumferential orientation. *Polymer Testing*, 2024, V. 133(2), Art. 108408. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108408

31. Chaoui, K., Chudnovsky, A. & Moet, A. Effect of residual stress on crack propagation in MDPE pipes. *Journal of Materials Science*, 1987, V. 22, pp. 3873–3879 https://doi.org/10.1007/BF01133334

32. Guevara-Morales A, Leevers P. Experimental investigation of the effect of residual stresses on rapid crack propagation in polyethylene (PE100) pipes. *Polymer Engineering and Science*, 2013, V.53, pp. 1217-1222. https://doi.org/10.1002/pen.23381

33. Poduška J., Hutař P., Kučera J., Frank A., Sadílek J., Pinter G., Náhlík L. Residual stress in polyethylene pipes. *Polymer Testing*, 2014, V. 40, pp. 88–98. doi: 10.1016/j.polymertesting.2014.08.006

34. Choi S., Broutman L.J. Residual stresses in plastic pipes and fittings - I. Methods for experimental analysis. *Polymer (Korea)*, 1996, V. 21, pp. 71-82.

35. Chen B., Jar P.Y.B., Mertiny P., Prybysh R. A refined one-slit-ring method to quantify residual hoop stress in chlorinated polyvinyl chloride pipe-application to specimens after immersion in primer. *Polymer Engineering and Science*, 2019, V. 59, pp. E296-E309.

36. Williams J. G., Hodgkinson J. M., Gray A. The determination of residual stresses in plastic pipe and their role in fracture. *Polymer Engineering and Science*, 1981, V. 21(13), pp. 822–828. doi:10.1002/pen.760211304.

37. Rafiee R. On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review. *Composite Structures*, 2016, V. 143, pp. 151-164. doi:10.1016/j.compstruct.2016.02.037.

38. Srebrenkoska S., Kochoski F., Srebrenkoska V., Risteska S., Kotynia R. Effect of Process Parameters on Thermal and Mechanical Properties of Filament Wound Polymer-Based Composite Pipes. *Polymers (Basel)*, 2023, V. 15(13), Art. 2829. doi: 10.3390/polym15132829. PMID: 37447476; PMCID: PMC10346241.

39. Lu H., Schlottermuller M., Himmel N., Schledjewski R. Effects of Tape Tension on Residual Stress in Thermoplastic Composite Filament Winding. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2005, V.18, pp. 469-487. 10.1177/0892705705054409.

40. Ghasemi A.R., Asghari B., Tabatabaeian A. Determination of the influence of thermo-mechanical factors on the residual stresses of cylindrical composite tubes: Experimental and computational analyses. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, V. 183, Art. 104098. 10.1016/j.ijpvp.2020.104098.

41. Zhang C, Wang Y, Lou M, Liang W, Yang D, Qi X. Process-induced residual stress analysis of reinforced layer of reinforced thermoplastic pipes. *Polymer Composities*, 2025, pp.1-19. doi:10.1002/pc.29908

42. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM № 2022683405 Rossijskaya Federaciya. Avtomatizaciya prognozirovaniya ehffektivnykh vyazkouprugikh svojstv sloistogo kompozita: № 2022683467: zayavl. 05.12.2022: opubl. 05.12.2022 / G.V. Il'inykh, L.R. Sakhabutdinova, O.YU. Smetannikov; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet».

43. Medjadji A., Mazari M., Kebir T., Belaziz A. Simulation study of fatigue lifetime in PE100 pipes. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2019, V. 52, No. 6, pp. 649-654. https://doi.org/10.18280/jesa.520613

44. Vavilova M.I., Kavun N.S. Svojstva i osobennosti armiruyushchikh steklyannykh napolnitelej, ispol'zuemykh dlya izgotovleniya konstrukcionnykh stekloplastikov [Properties and features of reinforcing glass fillers used for the manufacture of structural fiberglass]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, No 3(32), pp. 33-37. DOI: 10.18577/2071 -9140-2014-0-3-33-37

45. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM № 2024690336 Rossijskaya Federaciya. Modul' dlya prognozirovaniya tekhnologicheskikh napryazhenij v processe izgotovleniya metodom protruzii armirovannykh cilindricheskikh konstrukcij iz polimernykh kompozicionnykh materialov: № 2024690230: zayavl. 13.12.2024: opubl. 13.12.2024 / A.P. Bogdanova, A.A. Kamenskikh, YU.S. Kuznecova [i dr.]; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universiteT».

46. Koltunov M.A. Uprugost' i prochnost' cilindricheskikh tel [Elasticity and strength of cylindrical bodies], M.: Vysshaya shkola, 1975, 526 p.

47. Fedotova A.V., Perov K.A., Bogatov M.V. Modelirovanie v laboratornykh usloviyakh mekhanizmov razrusheniya trub iz gibkikh i zhestkikh polimerno-armirovannykh materialov, primenyaemykh v neftegazovoj otrasli [Laboratory simulation of the mechanisms of destruction of pipes made of flexible and rigid polymer-reinforced materials used in the oil and gas industry]. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2024, No 6, pp. 47-61. DOI 10.17804/2410-9908.2024.6.047-061.

48. Liu Z., Zhong J., Ren R., Tang Z., Zhao C., Liu X., Gao Y., Ren J. Nonlinear Mechanical Behavior of Glass Fiber/ Epoxy Resin Composite Under Medium and Low Strain Rates Loading. *Applied Composite Materials*, 2024, V. 31, pp. 1369-1392. DOI: 10.1007/s10443-024-10233-0

49. Zhang Y., Jar P.-Y. Comparison of Mechanical Properties Between PE80 and PE100 Pipe Materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, V. 25, pp. 4326-4332. 10.1007/s11665-016-2274-2

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The work had no sponsorship.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The authors' contributions are equal.