

На правах рукописи

Сахабутдинова Ляйсан Рамилевна

**Термовязкоупругое поведение крупногабаритного намоточного изделия
в процессе изготовления**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2024

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Сметанников Олег Юрьевич,**
доктор технических наук

**Официальные
оппоненты:**

Вахрушев Александр Васильевич,
д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела моделирования и синтеза технологических структур ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск

Сапожников Сергей Борисович,
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технической механики ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь

Защита состоится «18» марта 2024 года в 15-00 на заседании диссертационного совета 99.0.067.02 (Д 999.211.02), созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», по адресу: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский д.29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «22» января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение при производстве различных конструкций, работающих под действием сложных термосиловых и агрессивных внешних условий. Улучшенные физико-механические и эксплуатационные характеристики ПКМ способствовали активному их внедрению при производстве различных емкостей для хранения и транспортировки химически активных, взрывоопасных веществ. Одним из распространенных примеров использования ПКМ является изготовление силовых оболочек методом непрерывной мокрой намотки. Намотка силовых оболочек осуществляется на специальную технологическую оснастку – формообразующую оправку. Оправки изготавливают из различных материалов, они могут быть извлекаемыми или оставаться в готовой оболочке, как при производстве магистральных трубопроводов. При производстве оболочек закрытого профиля преимущественно используются разрушаемые оправки, например из песчано-полимерных смесей (ППС). Процесс изготовления крупногабаритных оболочек занимает длительное время и весьма дорогостоящий, поэтому важно предотвратить появление различных дефектов. Одним из этапов проектирования является прогнозирование напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки в процессе ее изготовления.

Наблюдается рост исследований, посвященных описанию реологического поведения различных композиционных материалов, влиянию технологических параметров изготовления на механические характеристики оболочек и совместному деформированию формируемого материала с оправкой. Таким образом, задача разработки комплексных методик для проведения исследования термовязкоупругого поведения крупногабаритных композиционных оболочек в процессе изготовления является **актуальной** проблемой механики деформируемого твердого тела. Практическая реализация такой задачи возможна с использованием современных пакетов инженерного анализа.

Степень разработанности темы. Для моделирования технологического процесса необходимо решать ряд сопряженных задач – от прогнозирования механических свойств изделий из ПКМ до моделирования совместного деформирования элементов конструкций. Исследованием прогнозирования механических характеристик слоистых композиционных материалов посвящены работы А.А. Ильюшина, Б.Е. Победри, Э.З. Плуме, В.В. Васильева, Н.А. Труфанова, О.Ю. Сметанникова, А.П. Янковского, А.Н. Аношкина, В.М. Пестренина, И.В. Пестрениной. Исследованиями отдельных этапов производства и эксплуатации изделий из слоистых композитов посвящены труды Н.Х. Арутюняна, А.В. Манжирова, Д.А. Паршина, А.В. Вахрушева, S.H. Kordkheili, Y. Bai, J. Liu, Y. Cui. Исследованию реологии компонентов ПКМ, отысканию остаточных напряжений в композиционных материалах с учетом реологии посвящены работы С.В. Русакова, Е.В. Мурашкина, В.П. Голуба, Я.В. Павлюка, П.В. Фернати. Исследованию тепломассопереноса в процессе изготовления посвящены работы А.И. Акимова, С.Б. Сапожникова. Разработке систем управления и оптимизации процесса изготовления посвящены исследования И.Ф. Образцова, Р.С. Зиновьева, Ю.Ю. Хариновой, J. Fu, J. Yun, Y. Jung, D. Lee. Вопросам исследования совместного деформирования формообразующей оправки и оболочки посвящены немногочисленные работы А.А. Суходоевой, D. Kugler,

T.J. Moon, S. Li, L. Zhan, T. Chang, в большинстве которых рассматриваются неразрушаемые оправки из металлов или полимерные лайнеры. Следует отметить, что в литературе слабо отражены результаты исследований, посвященных изучению поведения крупногабаритных полимерных оболочек в процессе изготовления, учитывающих их взаимодействие с технологической оснасткой, поэтому остается актуальной проблема разработки комплексного подхода к прогнозированию эволюции НДС системы «оправка – полимерная оболочка» в процессе изготовления с учетом термовязкоупругого поведения элементов конструкции.

Цель работы: разработка комплексной расчетно-экспериментальной методики описания поведения и исследование на ее основе напряженно-деформированного состояния системы «оправка – композиционная оболочка» в процессе изготовления оболочки с учетом термовязкоупругого поведения материалов.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) провести идентификацию термомеханических параметров для описания вязкоупругого поведения материалов формообразующей оправки и полимерной композиционной оболочки;

2) сформулировать техническую и математическую постановки краевой задачи механики деформируемого твердого тела, разработать численный аналог для отыскания напряженно-деформированного состояния крупногабаритных композиционных оболочек в процессе изготовления методом непрерывной мокрой намотки с учетом особенностей технологического процесса;

3) провести анализ полученных температурных полей и напряженно-деформированного состояния объекта исследования для валидации и верификации предложенной методики решения поставленной задачи;

4) провести комплексные численные исследования для оценки влияния основных технологических параметров процесса намотки и термообработки на поля остаточных напряжений и деформаций в системе «оправка – оболочка».

Научная новизна:

1. Реализована численная методика адаптации экспериментальных данных о релаксации песчано-полимерной смеси при сжатии при нормальной и повышенных температурах для описания их поведения в среде ANSYS Mechanical.

2. Впервые предложена и реализована средствами ANSYS Mechanical APDL термовязкоупругая модель полимерного композиционного материала, сочетающая анизотропное упругое поведение среды с одним независимым вязкоупругим оператором.

3. Создана трехмерная численная модель системы «оправка – оболочка» и реализован алгоритм решения краевой задачи механики совместного деформирования на протяжении технологического процесса изготовления с учетом внешнего термосилового воздействия.

4. Получено решение краевой задачи в заданном диапазоне температурно-силовых воздействий с учетом термовязкоупругого поведения системы «оправка – оболочка», позволившее установить, что изменение начальных технологических параметров в пределах $\pm 10\%$ не оказывает существенного влияния на эволюцию НДС намоточной конструкции в процессе изготовления.

5. Установлен локальный изгиб на донных участках композиционной оболочки на этапе охлаждения, который может стать причиной отслоения оболочки от формообразующей оправки, а также способствовать процессу появления и роста расслоений в оболочке.

Теоретическая и практическая значимость состоит в развитии методологии решения прикладных задач технологической механики производства крупногабаритных оболочек из полимерных композиционных материалов, имеющих выраженную анизотропию термовязкоупругих характеристик. Расчетно-экспериментальная методика, позволяющая оценить изменение нормального давления на внешней поверхности оправки в процессе изготовления, получена впервые и имеет большую практическую значимость для предприятий при прогнозировании зон возможного разрушения формообразующей оправки и возникновения дефектов готовой оболочки.

Получен акт научно-технической комиссии об использовании результатов научной работы на предприятии ПАО НПО «Искра» (г. Пермь).

Методология и методы исследования. Для проведения исследований использовался аппарат механики деформированного твердого тела. Численное моделирование осуществлено методом конечных элементов, реализованным в среде ANSYS Mechanical средствами параметрического языка программирования APDL. Стандартные механические испытания образцов материала оправки, связующего и кольцевых образцов однонаправленного ПКМ проводились в Центре экспериментальной механики ПНИПУ на сертифицированной универсальной электромеханической системе Instron 5882.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численная процедура идентификации термомеханических параметров для описания поведения песчано-полимерной смеси, отличающаяся учетом реологии при нормальной и повышенных температурах.

2. Модель термовязкоупругого поведения композиционного материала в процессе намотки и термообработки, отличающаяся анизотропией упругого поведения среды с одним независимым вязкоупругим оператором, реализованная в среде ANSYS Mechanical APDL.

3. Трехмерная конечно-элементная модель системы «оправка – оболочка» с технологической оснасткой, отличающаяся учетом распределенных начальных усилий в оболочке и фрикционного контакта со смазкой на границе сопряжения оправки со сборочным валом.

4. Расчетная методика определения термовязкоупругого поведения системы «оправка – оболочка», отличающаяся последовательной реализацией задачи нестационарной теплопроводности и квазистатической краевой задачи механики деформируемого твердого тела.

5. Новые результаты о пространственно-временном распределении интенсивностей напряжений и нормального давления на внешней поверхности оправки, установленные в результате комплексного исследования на основе вычислительных экспериментов, в том числе при отклонениях от проектных параметров технологического процесса.

Достоверность результатов обеспечивается качественным и количественным соответствием полученных решений экспериментальным данным о релаксации материалов оправки и однонаправленного ПКМ, сходимостью полученных расчетных температурных полей с известными данными термометрии системы «оправка – оболочка». Удовлетворительным результатом сравнения общей длины конструкции на ключевых этапах процесса изготовления с полученным численным решением.

Личный вклад автора. Формулировка краевых задач, систем граничных и начальных условий, проведение вычислительных экспериментов и визуализация результатов, разработка алгоритмов для программ ЭВМ выполнены диссертантом лично или при его непосредственном участии. В работах [1, 2, 4] автор принимал личное участие в формулировании систем граничных и начальных условий, проведении серии вычислительных экспериментов, диссертанту принадлежат обработка и представление результатов, анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем О.Ю. Сметанниковым. Работа [3] выполнена автором лично и без соавторов. Постановка задачи, численное моделирование и обработка результатов в работе [5] выполнены лично диссертантом. Две программы для ЭВМ подготовлены с соавторами, личный вклад диссертанта: разработка структуры программы, подготовка модулей построения геометрии, построения конечно-элементной сетки, программирование модулей решения задачи квазистатической термомеханики и учета натяжения оболочки в процессе намотки [6]; разработка модулей автоматизированного построения геометрии конструкции по заданным параметрам, согласно конструкторской документации, и автоматической генерации регулярной конечно-элементной сетки по заданным параметрам, решение задачи нестационарной теплопроводности в процессе термообработки, решение квазистатической задачи с учетом температурных деформаций, анализ напряженно-деформированного состояния конструкции, модуль обработки данных [7].

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XXVII–XXXII Всероссийской школе-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2018–2023 гг.), XIII, XV, XVI Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (г. Новосибирск, 2019, 2021, 2022 гг.), XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (г. Алушта, 2020 г.), XXI Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2019 г.), XII, XIII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, 2019 г., г. Санкт-Петербург, 2023 г.), XX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2019 г.), на 9-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (г. Москва, 2019 г.).

Результаты работы, в частности, получены в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований 16-48-590809, 16-01-00474 и 20-48-596009, договора № 2015/291 от 01.09.2015 г. с ПАО НПО «Искра».

Диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедр ПНИПУ «Вычислительная математика, механика и биомеханика» (рук. д.т.н., профессор В.Ю. Столбов), «Математическое моделирование систем и процессов» (рук. д.ф.-м.н., проф. П.В. Трусков); объединенном семинаре кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» и «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» (рук. академик РАН, д.ф.-м.н., проф. В.Э. Вильдеман), Института механики сплошных сред УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН (рук. академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеев), кафедры ПГНИУ «Вычислительная и экспериментальная механика» (рук. к.т.н., доц. В.Н. Терпугов).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 научных работах, в том числе 5 в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий и приравненных к ним, из них 2 – в изданиях, индексированных в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 154 страницы с 82 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 148 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** проанализировано современное состояние научной области исследования и обоснована актуальность рассматриваемой проблемы. Сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая значимость, краткое содержание работы и основные результаты.

В **первой главе** описан технологический процесс изготовления оболочек методом непрерывной мокрой намотки с последующей термообработкой, сделан обзор научных трудов и публикаций, посвященных подходам к проектированию и моделированию изделий из ПКМ. Рассмотрены модели поведения анизотропных слоистых композиционных материалов, описаны подходы к моделированию вязкоупругих свойств материалов, приемы решения задач об определении остаточных напряжений. Приведены примеры подходов к исследованию отдельных этапов изготовления. Сделан вывод об актуальности создания комплексной теоретико-экспериментальной методики по расчету НДС системы «оправка – оболочка», которая имеет большую практическую значимость для предприятий – производителей крупногабаритных намоточных изделий.

Вторая глава посвящена прогнозированию термовязкоупругих характеристик материалов оболочки и оправки, входящих в исследуемую конструкцию (рисунки 1, а). Приведены результаты испытаний образцов связующего и ППС на релаксацию в области сжатия при нормальных и повышенных температурах, испытаний при растяжении кольцевых образцов рассматриваемого ПКМ на релаксацию при нормальных и повышенных температурах.

Реализована методика адаптации экспериментальных данных для описания поведения вязкоупругих материалов оправки и эпоксидного связующего в вычислительном комплексе ANSYS Mechanical APDL. Исходными данными для выбора определяющих соотношений, которые позволили описать поведение материалов, были результаты механических испытаний на релаксацию напряжений

образцов при нормальной и повышенных температурах. Исходя из полученных зависимостей введена гипотеза о линейновязкоупругом и термореологически простом поведении рассматриваемых материалов.

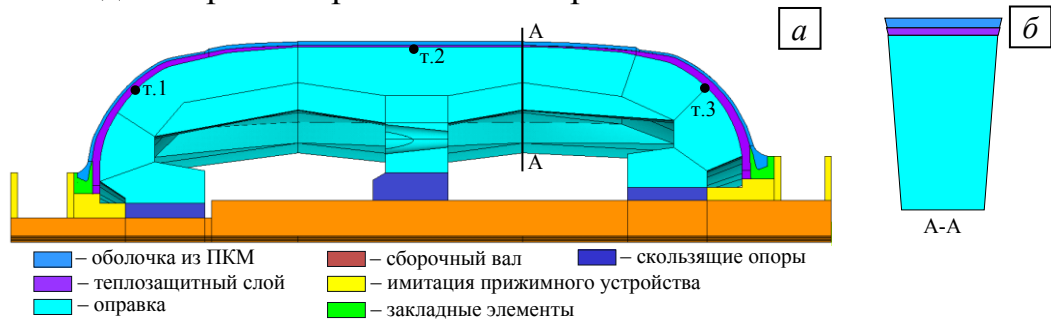


Рисунок 1 – Расчетная схема конструкции:

a – схема реальной конструкции; *б* – тестовая модель

Поскольку доля твердых материалов оправки и армирующего волокна существенно выше, чем жидкого связующего, в процессе изготовления достигаются температуры, лежащие выше точек стеклования компонентов полимерных смесей, в качестве определяющих соотношений выбрана вязкоупругая модель максвелловского типа с реализацией рядами Прони, использующими в качестве релаксационного ядра сумму экспонент. В общем случае связь напряжений и деформаций имеет вид

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{de_{ij}(\mathbf{X}, \tau)}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} K\theta(\mathbf{X}), \quad (1)$$

где e_{ij} – компоненты девiatorа тензора деформаций; θ – объемная деформация; K – модуль объемного сжатия; $G(t)$ – функции релаксации модуля сдвига:

$$G(t) = G_0 \left[\alpha_0^G + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right], \quad (2)$$

где α_i^G – относительные модули сдвига для времен сдвиговой релаксации τ_i^G , n_G – количество времен сдвиговой релаксации. Обозначив $G_0 = G|_{t=0}$, $G_\infty = G|_{t=\infty}$, можно записать

$$\alpha_0^G = \frac{G_\infty}{G_0}, \quad \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}. \quad (3)$$

Предполагается, что модуль объемного сжатия постоянен, а материал испытывает только сдвиговую релаксацию. Из результатов испытаний на одноосное растяжение-сжатие можно определить параметры модели. Модуль упругого сжатия можно представить в форме аналогичной (2):

$$E(t) = E_0 \left[c_0 + \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t}{\beta_i}\right) \right], \quad (*)$$

где c_i – относительные модули для времен релаксации β_i ; N_e – количество времен релаксации.

Обозначим $E_0 = E|_{t=0}$, $E_\infty = E|_{t=\infty}$, тогда по аналогии с (3) получено

$$c_0 = \frac{E_\infty}{E_0}, \quad \sum_{i=1}^{N_e} c_i = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0}. \quad (4)$$

Приняв количество времен релаксации растяжения-сжатия (β_i) $N_e = n_G = n$, в предположении равенства времен релаксации сдвига (τ_i^G) и растяжения-сжатия, из (3) и (4) можно получить соотношение вида

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^G = \sum_{i=1}^n c_i \left[\frac{G_0 - G_\infty}{G_0} \cdot \frac{E_0}{E_0 - E_\infty} \right]. \quad (**)$$

Обозначив $B = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0} \cdot \frac{E_0}{E_0 - E_\infty}$, получим:

$$\alpha_i^G = c_i \cdot B. \quad (5)$$

Известно, что

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu_0)}, \quad G_\infty = \frac{E_\infty}{2(1+\nu_\infty)}, \quad (6) - (7)$$

где ν_0, ν_∞ – значения коэффициента Пуассона в момент времени t , равное 0 и ∞ соответственно. ν_∞ можно определить через модуль объемного сжатия K^* :

$$\nu_\infty = 0,5 \left(1 - \frac{E_\infty}{3K^*} \right), \quad \text{где } K^* = K_\infty = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)} = \text{const}. \quad (8) - (9)$$

Подставив (9) в (7), получим выражение для длительного модуля сдвига

$$G_\infty = \frac{E_\infty}{2 \left(1 + 0,5 \left(1 - \frac{E_\infty}{3K^*} \right) \right)} = E_\infty \frac{3}{9 - \frac{E_\infty}{K^*}}. \quad (10)$$

Таким образом, используя соотношения (5), (8), (6) и (10) можно вычислить значения α_i^G , K^* , G_0 , G_∞ , предварительно отыскав c_i , E_0 , E_∞ , ν_0 из эксперимента¹ с использованием соотношения

$$\sigma(t) = \int_0^t \left[E_\infty + E_0 \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp \left(-\frac{t-\tau}{\beta_i'} \right) \right] d\varepsilon(\tau), \quad (11)$$

где $\beta_i' = \frac{\beta_i}{A(T)}$ – приведенное время релаксации; $A(T)$ – функция температурно-временного сдвига (ТВС).

Поскольку технологический процесс намотки сопряжен с температурным воздействием на уровне 160 °С, который находится выше значения температур стеклования для оправки (20–35 °С) и оболочки (100 °С), функция ТВС выбрана по формуле Williams–Landel–Ferry (WLF):

¹ Адамов А.А., Матвеевко В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург, 2003.

$$\lg(A(T)) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}, \quad (12)$$

где T – текущая температура; T_r – постоянная базовая температура; C_1, C_2 – эмпирические постоянные материала.

Предложенное описание механического поведения материалов можно адаптировать в среде ANSYS Mechanical с помощью встроенной модели Prony. При этом коэффициенты аппроксимации c_i, β_i обобщенной функции релаксации определяются по формуле (*). Зависимость скорости релаксации от температуры можно описать с помощью функционала модели Shift с параметрами WLF (12), которые определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений [2]:

$$\begin{bmatrix} T_1 - T_b; & -\left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i1}}{\beta_i}\right) \right\rangle \\ T_2 - T_b; & -\left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i2}}{\beta_i}\right) \right\rangle \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (T_1 - T_b) \cdot \left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i1}}{\beta_i}\right) \right\rangle \\ (T_2 - T_b) \cdot \left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i2}}{\beta_i}\right) \right\rangle \end{Bmatrix}, \quad (13)$$

где T_1, T_2, T_b – температуры кривых релаксации. c_i, β_i определяются в результате минимизации среднеквадратичной невязки

$$\sum_j \left(E_0 \left[\frac{E_\infty}{E_0} + \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t_j}{\beta_i}\right) \right] - E_\sigma(t_j) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (14)$$

Предложенная методика адаптации экспериментальных данных для использования в среде ANSYS Mechanical реализуется за четыре шага:

- 1) фактические экспериментальные кривые релаксации напряжений преобразовываются к функциям релаксации модуля Юнга материала при каждой температуре и усредняются;
- 2) относительно базовой температуры 22 °С вычисляются коэффициенты ТВС (13), и данные переводятся в приведенное время;
- 3) строится обобщенная кривая релаксации для модуля Юнга материала;
- 4) для обобщенной кривой релаксации вычисляются коэффициенты аппроксимации (*).

После обработки экспериментальных данных методами нелинейного программирования для рассмотренных материалов получены значения материальных констант модели (11)–(12), удовлетворяющие условию минимума невязки между экспериментальными и расчетными данными.

Приведены результаты экспериментального исследования релаксации материалов оправки (ППС), образцов однонаправленного органопластика, образцов отвержденной эпоксидной смолы. Предложена методика обработки полученных экспериментальных данных, построены процедуры по адаптации в ANSYS Mechanical вязкоупругих свойств рассмотренных материалов. Получены

обобщенные функции релаксации и вычислены параметры аппроксимаций для песчано-полимерной смеси, эпоксидной смолы и однонаправленного пластика.

Третья глава посвящена исследованию влияния моделей поведения слоистой оболочки на НДС конструкции. Рассмотрены основные варианты описания анизотропного термовязкоупругого поведения материала оболочки. В разделе 3.1 рассмотрена тестовая задача в виде сегмента цилиндрического участка (рисунок 1, б) для определения возможных путей упрощения конечно-элементной модели всей системы «оправка – оболочка». Сформулирована и решена задача определения НДС конструкции в процессе намотки. В ANSYS Mechanical процесс наращивания толщины оболочки можно симитировать с помощью технологии «EKILL-EALIVE», или так называемого «оживления» конечных элементов. Для учета натяжения армирующих лент можно воспользоваться методом «INISTATE», который задает в конечных элементах начальное напряжение. Проведена оценка влияния послойного и одномоментного «оживления» слоев оболочки на распределение радиальных напряжений по толщине оболочки и зависимость радиальных напряжений на поверхности оправки от времени [2]. Серия численных экспериментов направлена на качественную и количественную оценку возможности рационализации вычислительных процедур для моделирования процесса намотки. Также был рассмотрен вариант представления оболочки в виде однородной среды с эффективными характеристиками. При решении задачи значения начальных усилий были скорректированы на 10 % в сторону увеличения. Сравнение полученных результатов с эталонными зависимостями представлено на рисунке 2.

Полученная для однородного представления оболочки линейная зависимость радиальных напряжений по толщине является корректной, при этом максимальное и минимальное значения полностью совпадают с эталонным представлением для оболочки. Для дальнейшего исследования термовязкоупругого поведения крупногабаритного намоточного изделия в процессе изготовления с целью сокращения количества узловых неизвестных при моделировании конструкции материал оболочки решено рассматривать как однородный с анизотропными термомеханическими свойствами.

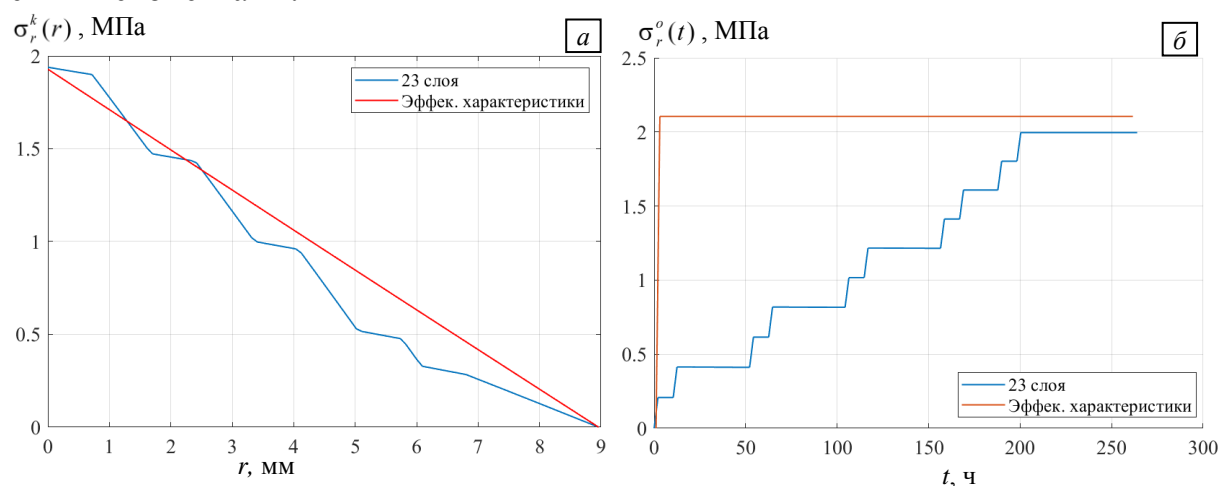


Рисунок 2 – Распределение радиальных напряжений в оболочке (а) и на поверхности оправки (б) для послойного представления (синяя линия) и с распределенными эффективными характеристиками (красная линия)

В разделе 3.2 описан подход к прогнозированию эффективных вязкоупругих характеристик многослойной композиционной оболочки. Описаны основные положения алгоритма вычисления эффективных характеристик многослойных оболочек с помощью метода переменных параметров упругости. В основу алгоритма заложены принципы многоуровневого подхода. Приведены постановка общей задачи термоупругости, граничные условия для определения характеристик материалов, полученные кривые релаксации трех модулей Юнга ортотропного материала оболочки.

В разделе 3.3 проведен анализ влияния учета релаксации одного модуля Юнга на эволюцию НДС конструкции под действием усилий, возникающих от натяжения лент, при постоянной температуре 80 °С. На выделенном сегменте конструкции реализовано пять вариантов описания вязкоупругого поведения оболочки. Решение задачи для послойного представления оболочки и в виде гомогенизированной среды с эффективными вязкоупругими характеристиками (модель 1), осуществлено с помощью квазиупругого итерационного метода. Три варианта анизотропного упругого поведения материала оболочки с одним независимым вязкоупругим оператором рассмотрены для трех ортогональных направлений (модели 2–4). Для анализа построены зависимости от времени компонент тензора напряжений в трех ортогональных направлениях, полученные данные представлены на рисунке 3.

Относительные отклонения среднеарифметических значений компонент тензора напряжений получены для модели 2 при соответствующих направлениях, где за эталонное решение приняты результаты, полученные для модели 1. Установлено, что минимальное отклонение наблюдается в окружном направлении. На интервале времени до 10^7 с максимальное значение Δ достигает 3,7; 8,7 и 6,5 % для трех ортогональных направлений соответственно.

Важно получение корректного описания релаксации напряжений в радиальном направлении, так как в процессе производства оболочка действует на оправку, что приводит к ее сжатию. Модель с аппроксимацией продольного ядра (модель 2) обеспечивает отклонение от эталонного решения на уровне 4 % после перехода к длительному модулю. На временном интервале, соответствующем релаксационному переходу, максимальное расхождение достигает 12,5 %. Предложенное описание поведения материала оболочки в виде сочетания ортотропного набора упругих характеристик и аппроксимации ядра релаксации в окружном направлении может быть использовано при решении задачи об отыскании НДС формообразующей оправки при изготовлении оболочки.

В разделе 3.4 представлены результаты серии вычислительных экспериментов, направленных на анализ влияния релаксации материала оболочки на изменение нормального давления на внешней поверхности оправки. Рассмотрено три варианта реализации задачи для прогнозирования изменения НДС оболочки на этапах намотки и термообработки: оправка и оболочка упругие; оболочка упругая, оправка термовязкоупругая; оправка и оболочка термовязкоупругие.

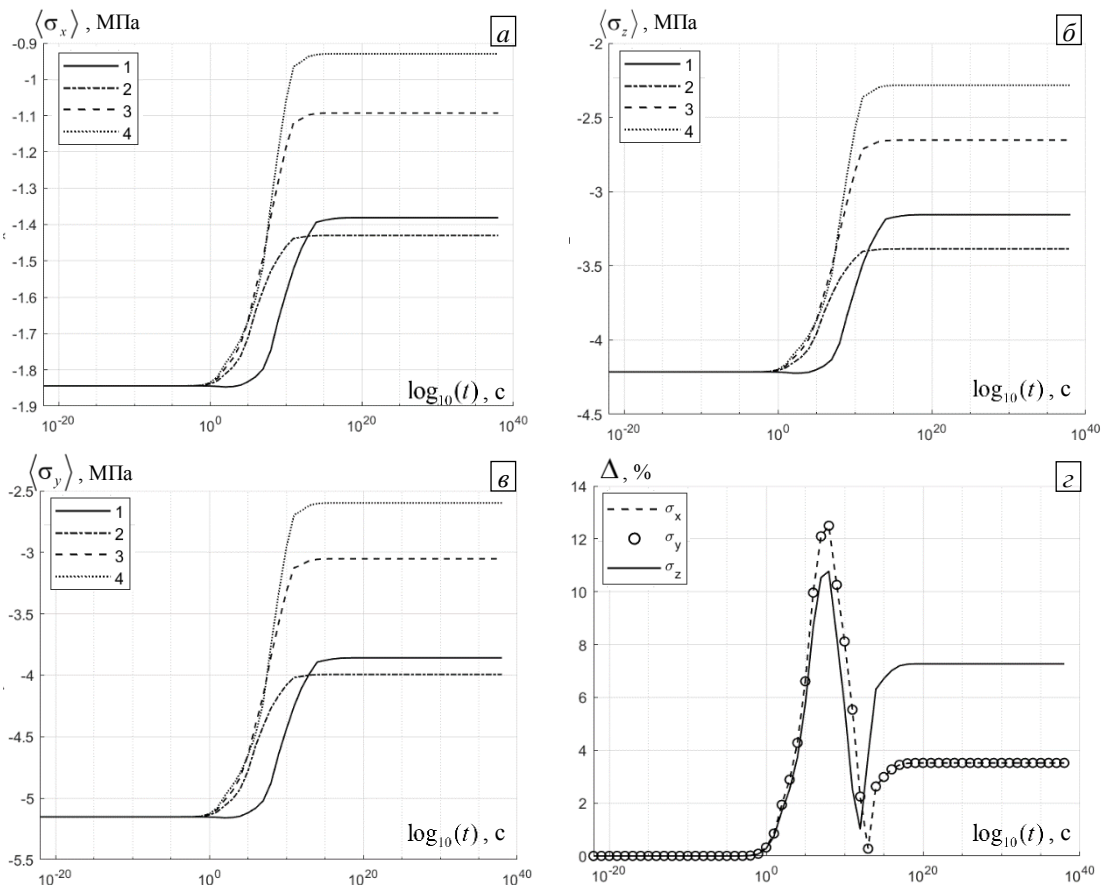


Рисунок 3 – Зависимости среднеарифметических значений компонент тензора напряжений на внешней поверхности оправки при температуре 80 °С:
 а – в радиальном направлении; б – в осевом направлении; в – в окружном направлении; г – относительное отклонение;

1 – эффективные характеристики без аппроксимации; 2 – аппроксимация $E_x(t)$;

3 – аппроксимация $E_y(t)$; 4 – аппроксимация $E_z(t)$

Для оценки эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции построены зависимости значений нормальных напряжений на поверхности оправки от времени. Для наглядности и интерпретации полученных результатов оценка проведена для двух временных интервалов – этапа намотки оболочки (рисунок 4, а) и процесса термообработки (рисунок 4, б).

Модели поведения материала оболочки не оказывают существенного влияния на давление на этапе намотки. Установлено, что на уровень давления наибольшее влияние оказывает учет вязкоупругости материала оправки, наблюдается снижение параметра. Данный факт подтверждается реологией материала при нормальной температуре (22 °С). По данным экспериментов при 22 °С наблюдается снижение напряжений в образцах до 70 % к моменту времени 10^5 с: с 8,5 до 2,5 ГПа. Расхождение численного решения на этапе термообработки по давлению на поверхности оправки не более 5 % для упругой и вязкоупругой моделей оболочки. При упругом поведении материала оболочки значения давления выше.

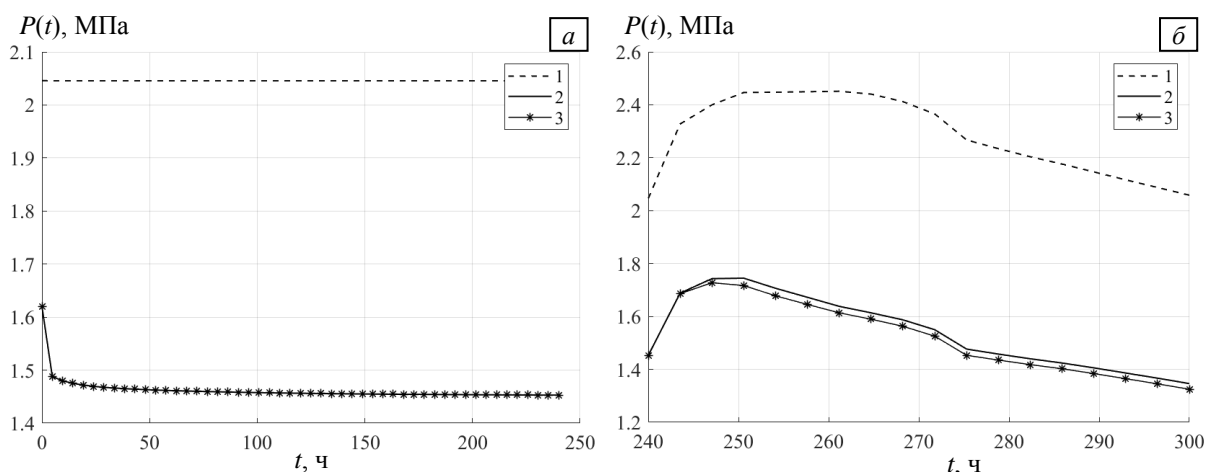


Рисунок 4 – Изменение нормального давления на внешней поверхности оправки:
a – в процессе намотки; *б* – в процессе термообработки;
 1 – оболочка и формообразующая оправка без учета реологии;
 2 – формообразующая оправка с учетом реологии, оболочка без учета реологии;
 3 – формообразующая оправка и оболочка с учетом реологии.

На основе полученных данных сделан вывод о целесообразности и важности учета термовязкоупругого поведения в композиционном материале многослойной оболочки при прогнозировании эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции в целом и оценке прочности формообразующей оправки в процессе изготовления изделий.

В **четвертой главе** предложены основные принципы разработанного конечно-элементного аналога для исследуемой конструкции. Описаны алгоритмы параметризации и автоматизации построения дискретного аналога. На рисунке 5 представлен разработанный трехмерный вид исследуемой системы, в рамках исследования рассматривается 1/8 часть конструкции.

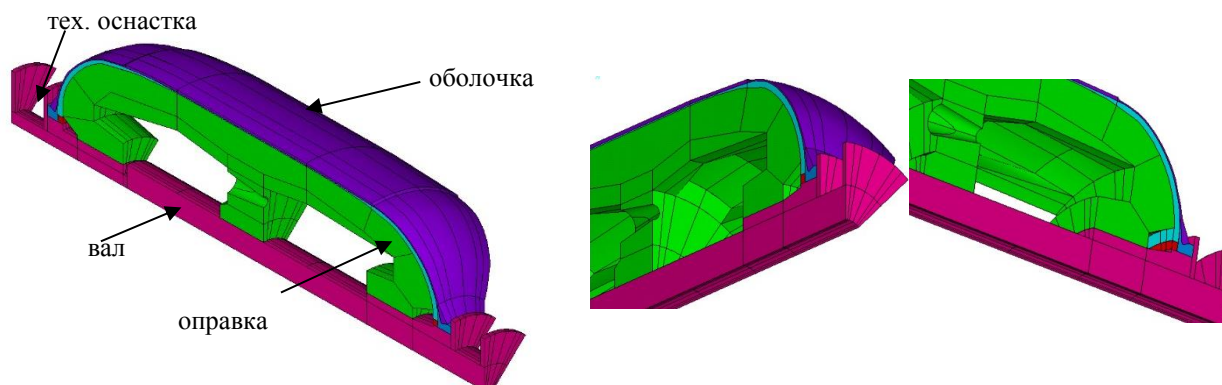


Рисунок 5 – Пример геометрической модели конструкции

Уточнены начальные и граничные условия задач нестационарной теплопроводности и краевой квазистатической задачи механики для учета особенностей нагружения и работы конструкции в процессе изготовления.

Для нестационарной задачи теплопроводности предложено вычислять коэффициент конвективного теплообмена α_T по соотношениям для случая бокового обтекания трубы при естественной конвекции. Результаты сравнения полученного численного решения для тестовой модели и термометрии реальной конструкции представлены на рисунке 6, *a* в точке 2 (см. рисунок 1).

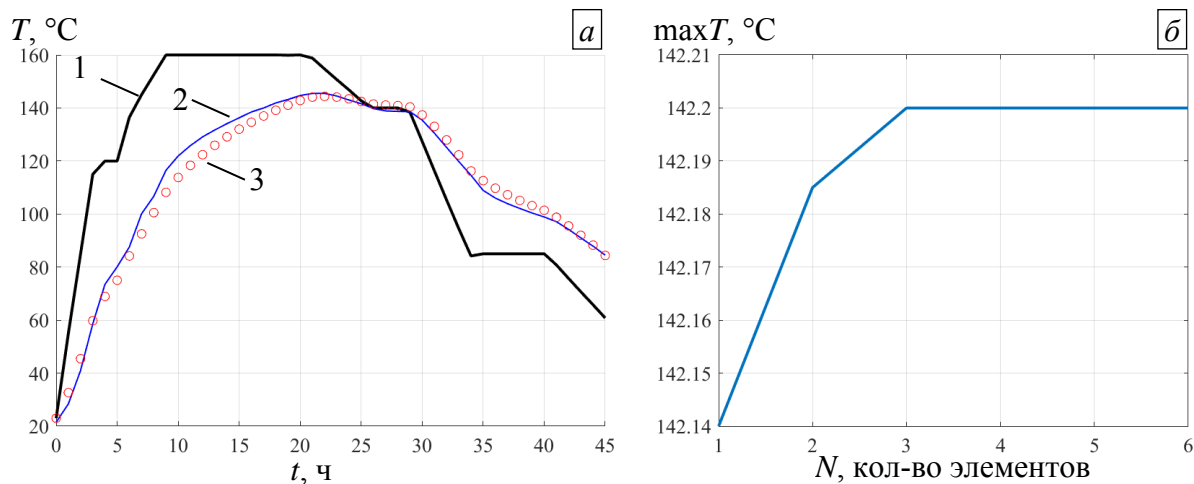


Рисунок 6 – Верификация тестовой задачи теплопроводности:

a – зависимость температур от времени; *б* – сходимость численного решения;

1 – режим термокамеры; 2 – термометрия конструкции; 3 – численное решение.

Выполнен анализ сходимости численного решения задачи от количества элементов по толщине оболочки и разделительного слоя по максимальному уровню температуры конструкции (рисунок 6, б). Максимальное отклонение составило 5,7 %, а сходимость решения достигается при разбиении толщины разделительного слоя и оболочки на 3 элемента.

Для отыскания НДС в процессе изготовления проведена серия вычислительных экспериментов со сгущением сетки и при использовании конечных элементов более высокого порядка. Оценка сходимости результатов проведена по изменениям длины оболочки на основных этапах производства. На основе полученных данных выбрана степень дискретизации, физические соотношения, системы начальных и граничных условий для дальнейшего исследования деформационного поведения изделия в процессе изготовления.

В пятой главе приведены результаты решения задачи прогнозирования НДС с учетом температурных деформаций конструкции на трех этапах изготовления. В разделе 5.1 приведены результаты решения задачи нестационарной теплопроводности для конструкции «оправка – оболочка» в технологической оснастке при реальном режиме термообработки. Представлены распределения температуры конструкции в ключевые моменты времени. Построены зависимости температуры на поверхностях оправки и оболочки от времени.

В разделе 5.2 приведен комплексный анализ эволюции НДС конструкции для трех этапов изготовления оболочки с учетом термовязкоупругого поведения формообразующей оправки и оболочки. Представлены распределения перемещений, первых главных напряжений и интенсивностей напряжений конструкции в основные моменты времени. Впервые получены эпюры распределения радиальных напряжений вдоль образующей линии поверхности оправки для ключевых моментов процесса изготовления. Пример распределения радиальных напряжений на поверхности оправки в момент времени, соответствующий окончанию термообработки, представлен на рисунке 7.

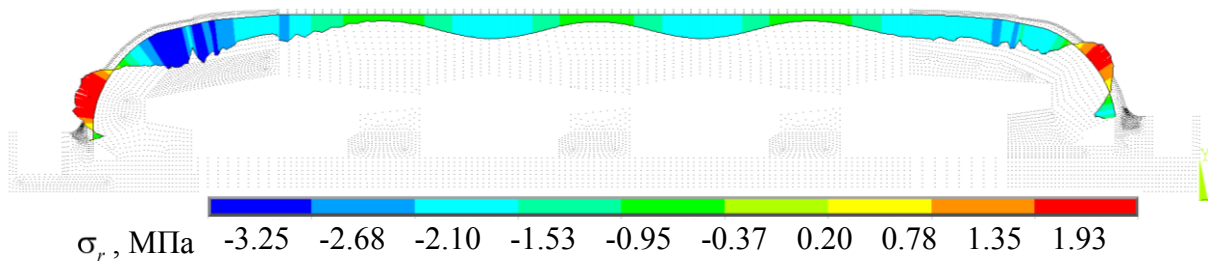


Рисунок 7 – Распределения радиальных напряжений по поверхности оправки

К окончанию процесса термообработки на донных участках формируются зоны с положительной величиной радиальных напряжений, что указывает на вероятность возникновения отслоений оболочки от оправки. В то же время в этой зоне отмечены локальные максимальные значения вертикальных перемещений оболочки. Для уточнения НДС в данных зонах рассмотрены поля остаточных напряжений оболочки после удаления формообразующей оправки. На основе комплексного анализа полученных результатов сделан вывод о высокой вероятности возникновения отслоения оболочки от формообразующей оправки, а также о вероятности формирования межслоевых расслоений по толщине оболочки.

В разделе 5.3 представлены результаты серии вычислительных экспериментов, проведена оценка эволюции НДС при изменении параметров технологического процесса: начальные усилия в прижимающем устройстве, силы натяжения лент на этапе намотки, максимальная температура и длительность выдержки при термообработке. Для анализа влияния технологических параметров на НДС конструкции построены диаграммы зависимости давления на внешней поверхности оправки от времени, представленные на рисунке 8.

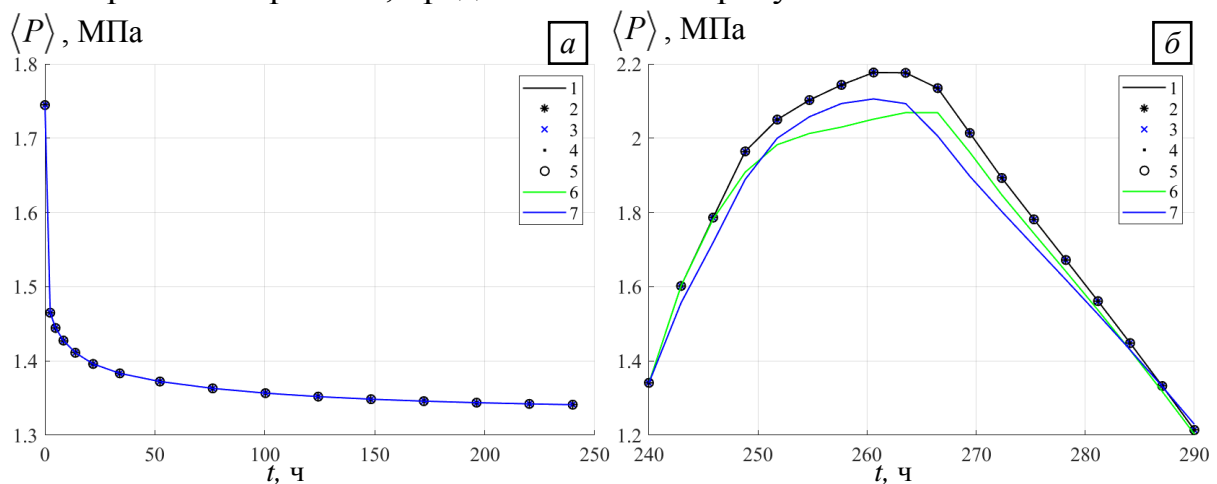


Рисунок 8 – Зависимости давления на поверхности центральной секции оправки от времени: а – этап намотки; б – этап термообработки

Закономерности влияния начальных параметров на контактное давление на поверхности оправки идентичны полученным изменениям напряжений. На основе полученных результатов и проведенного сравнительного анализа сделан вывод о корректности сформулированной краевой задачи и устойчивости численных процедур отыскания решения. Кроме этого, установлено, что изменение начальных термосиловых параметров в пределах, допустимых в рамках

погрешности на производстве в силу тех или иных причин, не может оказать существенного влияния на эволюцию НДС намоточной конструкции в процессе изготовления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведена идентификация термомеханических параметров для описания вязкоупругого поведения материалов формообразующей оправки и полимерной композиционной оболочки.

2. Сформулированы техническая и математическая постановки краевой задачи механики деформируемого твердого тела, разработан численный аналог для отыскания напряженно-деформированного состояния крупногабаритных композиционных оболочек в процессе изготовления методом непрерывной мокрой намотки с учетом особенностей технологического процесса.

3. Проведен анализ полученных температурных полей и напряженно-деформированного состояния объекта исследования, осуществлена валидация и верификация предложенной методики решения поставленной задачи.

4. Проведены комплексные численные исследования для оценки влияния основных технологических параметров процессов намотки и термообработки на поля остаточных напряжений и деформаций в системе «оправка – оболочка».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сахабутдинова, Л. Р. Численное моделирование процесса изготовления крупногабаритного композитного кокона с учетом термовязкоупругости / Л. Р. Сахабутдинова, О. Ю. Сметанников, Г. В. Ильиных // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – №76. – С. 165–181.

2. Smetannikov, O.Y. ANSYS simulation of the thermomechanical behavior of a large-sized composite mandrel with consideration of viscoelasticity / O.Y. Smetannikov, L. Sakhabutdinova, G. Ilyinykh // Aerospace. – 2022. – Vol. 9. – A. 117.

3. Сахабутдинова, Л. Р. Исследование нестационарной теплопроводности в процессе изготовления намоточной конструкции в Ansys Mechanical APDL / Л. Р. Сахабутдинова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 43–52.

4. Сахабутдинова, Л. Р. Разработка методики расчета НДС композиционной оболочки в процессе изготовления / Л. Р. Сахабутдинова, О. Ю. Сметанников, Г. В. Ильиных // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – №3. – С. 84–99.

5. Сахабутдинова, Л. Р. Математическая модель процесса изготовления композитного баллона высокого давления с учетом вязкоупругости /

Л. Р. Сахабутдинова, О. Ю. Сметанников // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 10. – С. 127–130.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

6. 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 ФГАОУВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683559 Российская Федерация. Моделирование технологического процесса производства композитной оболочки методом намотки: № 2022683588: заявл. 06.12.2022: опубл. 06.12.2022 / Г.В. Ильиных, **Л.Р. Сахабутдинова**, О.Ю. Сметанников; заявитель ФГАОУВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»