

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Сахабутдинова Ляйсан Рамилевна

**ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОЕ ПОВЕДЕНИЕ КРУПНОГАБАРИТНОГО
НАМОТОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Сметанников Олег Юрьевич

Пермь – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ.....	11
1.1. Технологический процесс изготовления оболочек из ПКМ методом непрерывной мокрой намотки.....	12
1.2. Особенности проектирования намоточных изделий	19
1.3. Прогнозирование эффективных механических характеристик ПКМ.....	21
1.4. Описание термовязкоупругого поведения ПКМ.....	23
1.5. Подходы к моделированию технологического процесса намотки и полимеризации	27
Выводы по главе	31
2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИИ	34
2.1. Описание экспериментов по идентификации термомеханических параметров вязкоупругости для материалов, входящих в состав изделия.....	34
2.2. Определяющие соотношения для описания термовязкоупругих свойств песчано-полимерной смеси и однонаправленного пластика	40
2.3. Обработка результатов механических испытаний на релаксацию цилиндрических образцов ППС	43
2.4. Обработка результатов испытаний образцов отвержденной смолы	47
2.5. Обработка результатов испытаний образцов пластика	50
Выводы по главе	52
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ОБОЛОЧКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПРАВКИ.....	53
3.1. Описание поведения представительного объема конструкции в процессе намотки оболочки	54
3.2. Прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик многослойного материала оболочки.....	61

3.2.1. Постановка задачи для однонаправленного композита	63
3.2.2. Построение функции релаксации и функции ТВС органоволокна.....	68
3.2.3. Прогнозирование эффективных вязкоупругих характеристик оболочки	74
3.3. Исследование влияния модели поведения оболочки на напряженно-деформированное состояние оправки	82
3.4. Исследование влияния модели поведения оболочки на НДС оправки в процессе намотки и термообработки оболочки.....	85
Выводы по главе	89
4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ.....	91
4.1. Автоматизация построения конечно-элементного аналога конструкции	92
4.2. Назначение эффективных термовязкоупругих свойств оболочки	96
4.3. Начальные и граничные условия для решения нестационарной задачи теплопроводности	100
4.4. Начальные и граничные условия для решения квазистатической краевой задачи	105
4.5. Валидация и верификация численной модели.....	107
Выводы по главе	110
5. АНАЛИЗ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ НАМОТОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	111
5.1. Анализ решения задачи нестационарной теплопроводности	111
5.2. Анализ напряженно-деформированного поведения конструкции в процессе изготовления.....	114
5.3. Анализ влияния входных параметров на напряженно-деформированное состояние конструкции	132
Выводы по главе	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ А	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ В	154

ВВЕДЕНИЕ

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 комплексной методики проведения исследования термовязкоупругого поведения крупногабаритных композиционных оболочек в процессе изготовления является **актуальной** проблемой механики деформируемого твердого тела. Практическая реализация такой задачи возможна

только с использованием численных методов, реализованных в современных пакетах 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. Исследованиям 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. 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, Y. Bai, J. Liu, Y. Cui. 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. Трусов); объединенном семинаре кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» и «Экспериментальная механика и конструктивное материаловедение» (рук. 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 публикациях, из них 2 в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, 2 в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК, получено 2 свидетельства о регистрации программ 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.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В данной главе сделан обзор основных научных проблем и направлений исследований, связанных с проектированием и производством оболочек методом непрерывной мокрой намотки. Данным методом изготавливают различные полые тела вращения, которые находят применение для хранения и транспортировки химикатов, сжиженных или находящихся под давлением газов в различных отраслях [8–13]. Из-за многообразия конструкций и материалов для их изготовления остаются актуальными проблемы прогнозирования прочности, связанные с проектированием и производством. На качество готового изделия, помимо схем армирования, также оказывают влияние технологические процессы изготовления. В связи с этим был поставлен вопрос о разработке методики решения краевой задачи механики для прогнозирования поведения изделия, получаемого методом мокрой намотки, с учетом структуры формируемого материала и таких технологических факторов, как режим намотки и термообработки.

Объектом данного исследования выбрано поведение крупногабаритного намоточного изделия. На рисунке 1.1 представлена геометрическая и тестовая модель рассматриваемой конструкции.

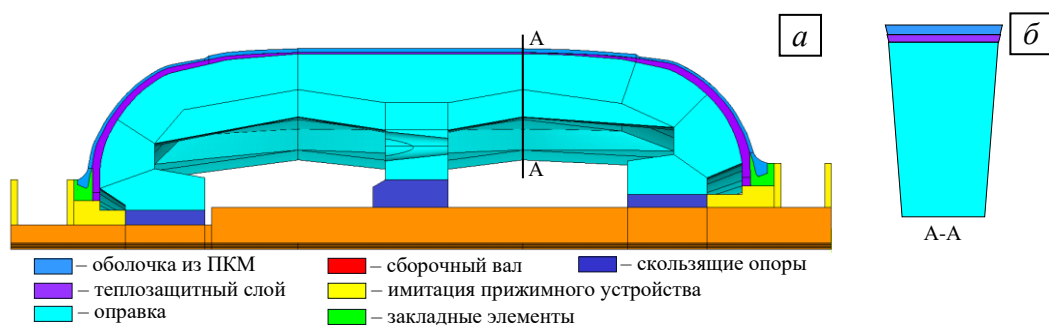


Рисунок 1.1 – Геометрическая модель объекта исследования:

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

Рассматриваемая конструкция состоит из оболочки типа «кокон» с технологической оснасткой, в состав которой входят следующие элементы: сборочный вал, формообразующая оправка и имитация прижимающего устройства, обеспечивающего фиксацию оправки.

Крупногабаритные композиционные оболочки на сегодняшний день относятся к малосерийным изделиям. Полный технологический процесс изготовления может занимать до 20 дней, требует существенных затрат сырья, энергетических и трудовых ресурсов, что становится причиной высокой стоимости готовой оболочки. К готовой оболочке предъявляются повышенные требования по прочности, кроме этого, необходимо, чтобы готовое изделие не имело скрытых и геометрических дефектов на внутренней поверхности. Из возможных причин появления дефектов в процессе изготовления может быть нарушение контакта на границе «формообразующая оправка – оболочка».

1.1. Технологический процесс изготовления оболочек из ПКМ методом непрерывной мокрой намотки

Метод непрерывной мокрой намотки предназначен для изготовления полых тел вращения из ровинга. Волокна ровинга бывают стеклянные, органические, углеродные, при этом в составе одной оболочки может использоваться несколько типов волокон. В монографии В.В. Воробей, В.Б. Маркина [14] дан обширный обзор технологического обеспечения процесса намотки силовых оболочек, приведены систематизированные описания способов и схем намотки, сделан обзор намоточных станков, технологических оправок и параметров процессов намотки и отверждения полимерного композиционного материала. В учебном пособии М.А. Комкова, В.А. Тарасова [15] изложены сведения о композитных конструкциях и технологических основах методов намотки композиционных конструкций, приведены характеристики однонаправленных ПКМ. В труде В.В. Васильева [16] приведены конструкционные свойства компонентов композиционных материалов, а также одни из первых прикладных методов расчета прочности элементов типовых конструкций.

При мокрой намотке армирующий наполнитель в виде лент или ровинга пропитывается полимерным связующим, затем подается на оправку, определяющую внутреннюю поверхность изделия, и укладывается на её

поверхность согласно схеме армирования с заданным натяжением. Общая схема намоточного станка представлена на рисунке 1.2.

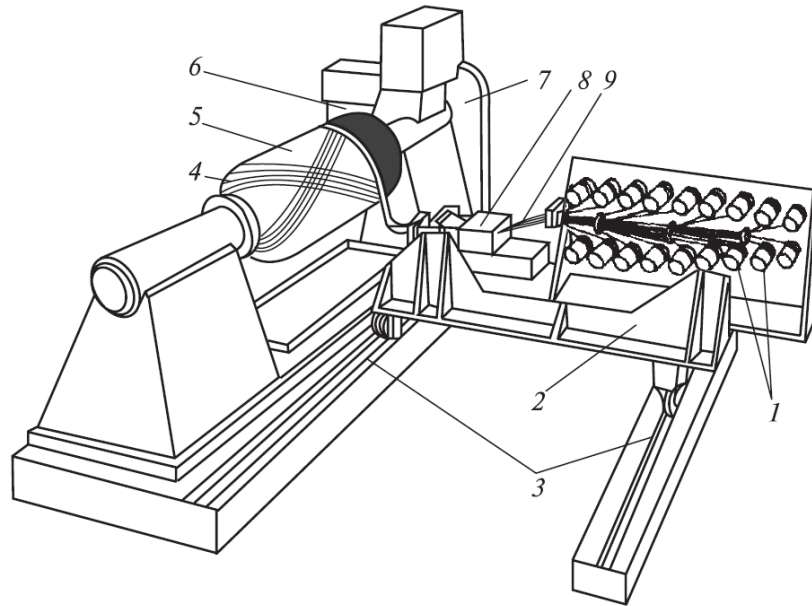


Рисунок 1.2 – Схема мокрой намотки: [14]

- 1 – шпули с нитями; 2 – шпулярник;
 3 – направляющие для перемещения намоточно-пропиточного тракта;
 4 – спиральные слои; 5 – оправка; 6 – окружные слои;
 7 – привод вращения; 8 – ванночка со связующим;
 9 – сформированная пряжа

При намотке для обеспечения требуемой плотности укладки и «прямолинейности» ленты подаются с заданным начальным натяжением. После формирования заданной схемы армирования производится отверждение связующего и последующее удаление формообразующей оправки. Структура и механические свойства материала получаемой оболочки обуславливаются схемой намотки.

Технологические схемы намотки. В литературе различают семь основных схем армирования при намотке [14, 17]:

- 1) прямая (окружная);
- 2) спирально-винтовая (тангенциальная, кольцевая);
- 3) спирально-перекрестная (спирально-продольная, спирально-поперечная);
- 4) совмещенная спирально-кольцевая;
- 5) планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная);
- 6) тетранамотка;

7) зональная намотка.

Прямая намотка осуществляется укладыванием армирующей ткани на цилиндрическую поверхность. Данный способ применяется для изготовления цилиндров длиной равной или меньшей, чем ширина наматываемой ткани. Для изготовления протяженных изделий цилиндрической формы применяют в основном метод спирально-винтовой намотки, при которой ленты армирующего материала укладываются на образующую поверхность по винтовой траектории.

Для производства оболочек с произвольной образующей используется спирально-перекрестная схема намотки. При данной схеме намотки ровинг укладывается на оправку с заданным интервалом, ширина которого кратна ширине ленты. За один проход раскладывающего устройства вдоль оправки формируется один спирально-перекрестный слой, который перекрывает часть образующей поверхности. На следующем проходе армирующий материал укладывается со смещением на ширину ленты, таким образом постепенно закрывается вся поверхность оправки.

Для изготовления различных баллонов, сосудов, корпусов и других оболочек применяется планарная или полюсная намотка (рисунок 1.3).

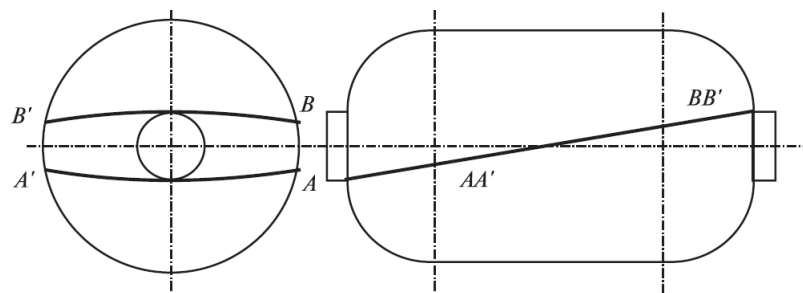


Рисунок 1.3 – Траектория укладки армирующего материала при однослойной полюсной намотке

При полюсной намотке ровинг укладывается на оправку вдоль продольной оси изделия под определенным углом. Угол армирования зависит от диаметров полюсных отверстий, потому что при смене направления движения раскладывающего устройства армирующая лента должна пройти по касательной траектории к полюсному отверстию. После одного прохода оправка смещается на расстояние, соответствующее ширине ленты. В результате намотки по такой схеме

каждый слой представляет собой плетение из армирующих лент, ориентированных в противоположные стороны относительно продольной оси изделия на определенный угол.

Для получения изделий, имеющих форму тел вращения возможно комбинировать различные схемы намотки, что существенно расширяет выбор оптимальных конструктивно-технологических решений для создания конструкций из волокнистых полимерных композитов.

Технологические оправки. При производстве некоторых композиционных оболочек с помощью метода непрерывной намотки используются специальные технологические оснастки – формообразующие оправки. Оправки служат для формирования точной геометрии внутренней поверхности, выдерживают высокие сжимающие нагрузки со стороны наматываемой оболочки, фиксируются на сборочном валу и позволяют устанавливать дополнительные закладные элементы в формируемую оболочку. В отличие от широко распространенных на производстве ПВХ или металлических лайнеров, из готовой оболочки удаляется формообразующая оправка, таким образом снижаются вес и итоговая толщина стенок.

В зависимости от конструкции и типа удаления из готовой оболочки формообразующие оправки бывают цельные, разборные и разрушаемые. **Цельные оправки** используются при производстве оболочек и конструкций, имеющих форму цилиндров, конусов или полусфер с диаметрами до 500 мм. Такие формы позволяют быстро извлечь оправку из готового изделия, не прибегая к дополнительным манипуляциям. Для производства цельных оправок используют различные стали или алюминиевые сплавы. При производстве изделий, имеющих полужакрытый профиль, из которых невозможно извлечь цельную оправку, прибегают к использованию **разборных оправок**. Разборная оправка состоит из отдельных элементов, которые установлены и закреплены на сборочном валу. Разборные оправки могут быть использованы многократно, но при этом они сложны в изготовлении, требуют дополнительных затрат времени на сборку и удаление из готового изделия.

При производстве изделий замкнутого профиля или с малым полюсным отверстием применяются **разрушаемые оправки**. Для изготовления таких оправок используют различные материалы, которые под действием катализатора могут изменить агрегатное состояние или распасться на мелкодисперсную смесь. Примерами таких материалов могут быть гипс, легкоплавкие металлы, песчаные или парафиновосковые смеси. Разрушаемые оправки изготавливают методами литья или пресс-формования в зависимости от используемого материала. После завершения процесса полимеризации связующего оправки удаляются из готового изделия. В зависимости от использованного материала удаление может быть осуществлено различными способами: механическим разрушением, вымыванием, выплавлением или растворением. К основным недостаткам разрушаемых оправок относятся неравномерная термоусадка материала в процессе отверждения связующего и снижение прочности при высоких температурах.

При производстве крупногабаритных изделий большую популярность приобрели разрушаемые оправки из песчано-полимерных смесей [18–20]. Элементы оправок изготавливают пресс-формованием из смеси кварцевого песка и водного раствора поливинилового спирта. Песчаные оправки обладают достаточной жесткостью, низкой термоусадкой, твердой и гладкой поверхностью. Песчано-полимерную оправку удаляют из готового изделия выпариванием – под воздействием водяного пара в ППС запускается процесс разложения поливинилового спирта, вследствие чего секции оправки распадаются на небольшие фрагменты, которые удаляются водным потоком из внутренней полости намотанного изделия. После вымывания кварцевый песок может быть использован повторно. Подробное описание процессов изготовления и эксплуатации оправок из ППС при производстве крупногабаритных изделий отражены в работах [21–25].

Технологические параметры процесса намотки. Основными параметрами технологического процесса мокрой намотки являются объемное содержание компонентов и усилия натяжения ровинга. Считается, что физико-механические свойства материала оболочки определяются схемой намотки, однако установлено, что технологический процесс изготовления оболочки также оказывает влияние на

формирование структуры материала и его характеристики [26–30]. К основным параметрам, определяющим механические свойства полимерных композиционных материалов, относят характеристики компонентов и их объемное содержание. В результате экспериментальных исследований [31–32] установлено, что для обеспечения максимальной прочности однонаправленных пластиков из стекловолокна оптимальное объемное содержание волокна должно составлять 0,70–0,72, для органо- и углеволокна – 0,60–0,65. На итоговое объемное содержание армирующего материала в готовом изделии оказывают влияние такие факторы, как вязкость полимерного связующего, длительность нахождения нитей в пропиточной ванне, плотность паковки нитей в формируемой пряжи, а также степень смачиваемости нитей конкретным связующим. Известно, что для обеспечения лучшей пропитки нитей подходят связующие с низкой вязкостью, которые формируют более тонкий полимерный слой на каждом волокне, за счет чего повышается объемное содержание армирующего наполнителя в ПКМ. Изменение технологического параметра объемного содержания волокон может привести к снижению прочности материала.

При «мокрой» намотке толстостенных композиционных оболочек существует проблема неравномерности распределения связующего по толщине материала [33–35]. Возникающие от технологического натяжения ленты, сжимающие силы в материале, увеличиваются с каждым намотанным слоем, что приводит к вытеснению связующего из нижних слоев в верхние. Данное явление приводит к тому, что распределение армирующего наполнителя в композиционном материале неравномерно по толщине при заданном параметре объемного содержания. При дальнейшей полимеризации связующего сформированное распределение фиксируется и в процессе эксплуатации ведет к неравномерному распределению напряжений и деформаций, что становится одной из причин возникновения и роста расслоений.

При разработке технологических процессов изготовления композиционных оболочек методом непрерывной мокрой намотки необходимо определить оптимальную величину технологического натяжения ленты, чтобы обеспечить

необходимый уровень нормального давления на формообразующую оправку. Уплотнение материала в процессе формования изделия позволит обеспечить высокие механические характеристики материала за счет увеличения объемного содержания волокон и их совместной работы. Кроме этого, натяжение ровинга в процессе намотки позволяет обеспечить равномерность содержания связующего в материале и прямолинейность армирующих волокон. Важно отметить, что для сохранения целостности оправки в процессе изготовления оболочки напряжения в материале оправки, формирующиеся в том числе за счет натяжения армирующих лент, не должны превышать пределы прочности при сжатии.

Процесс отверждения полимерного композиционного материала.

Отверждение – это химический процесс перехода вещества из жидкого агрегатного состояния в твердое под действием внешнего катализатора. Отверждение является важным технологическим этапом при формовании изделий из реактопластов, получении клеевых соединений и полимерных покрытий. Отверждение полимеров протекает под воздействием специальных отвердителей и\или тепла, ультрафиолетового света, высокоэнергетического излучения. В зависимости от типа полимера отверждение может протекать при обычных и повышенных температурах по одному из механизмов – поликонденсация (например, отверждение фенолоформальдегидных смол) или полимеризация (например, отверждение полиэфирных смол).

При производстве крупногабаритных намоточных изделий широко применяются эпоксидные смолы, отверждение которых происходит по механизму полимеризации при повышенных температурах. В зависимости от вида отвердителя и толщины намотанной оболочки подбирается режим процесса отверждения. Типовой процесс отверждения связующего на основе эпоксидных смол происходит по ступенчатому режиму нагревания-охлаждения, пример режима представлен на рисунке 1.4. Режим полимеризации должен учитывать температуры гелеобразования T_g и стеклования T_c связующего.

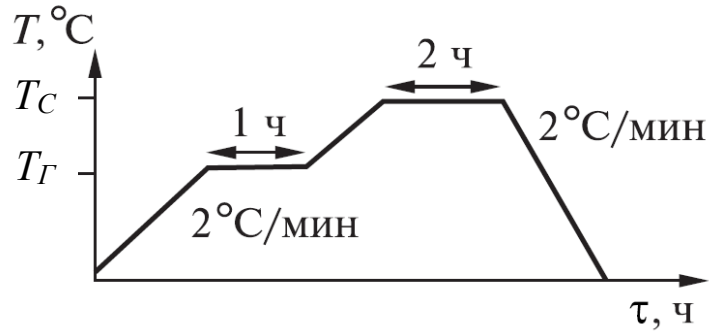


Рисунок 1.4 – Типовой процесс термообработки ПКМ на основе эпоксидного связующего

Для обеспечения равномерного прогрева изделия средняя скорость нагрева и охлаждения составляет порядка $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и предусматриваются этапы выдержки при температурах T_G и T_C , длительность которых зависит от толщины оболочки.

При производстве толстостенных композиционных изделий встречаются такие дефекты как расслоения и межслоевые растрескивания. Основной причиной их возникновения принято считать рост сжимающих напряжений в материале из-за термоусадки связующего в процессе отверждения. Кроме этого, низкая теплопроводность композиционных материалов на основе полимерных связующих приводит к неравномерности прогрева толщины оболочки, из-за чего процесс полимеризации связующего в нижних слоях оболочки начинается с запаздыванием [36–43]. Для предотвращения неравномерного прогрева предлагаются различные способы: увеличение времени выдержки при более низкой температуре, увеличение максимальной температуры режима до значений выше точки стеклования, многоступенчатый процесс нагрева оболочки, организация процесса изготовления с чередованием послойной намотки и отверждения [44–48].

1.2. Особенности проектирования намоточных изделий

При проектировании намоточных изделий используются две основные модели представления волокнистого ПКМ, формируемого в процессе изготовления оболочек. Первая модель предполагает представление материала в виде гомогенизированной сплошной среды с распределенными анизотропными свойствами. Данная гипотеза обосновывается тем, что размеры силовой композитной оболочки на несколько порядков больше, чем размеры компонентов

материала. При использовании этого подхода для слоистого ПКМ определяются осредненные упругие постоянные, зависящие от упругих констант волокон и связующего, их объемного содержания в материале, схем армирования и углов намотки [16, 49]. Затем, при проектировании намоточных оболочек, материал стенки рассматривается как однородный с осредненными характеристиками. Модель была предложена и рассмотрена в работах Н.А. Алфутова, В.В. Васильева, С.Г. Лехницкого для расчета несущей способности анизотропных пластин в рамках теории пластин и оболочек [50–52], авторами также были сделаны первые обобщения полученных соотношений на случай многослойных оболочек. В своих трудах авторы уделяют особое внимание проблеме определения эффективных характеристик, так как корректность определения свойств обеспечивает точность решения задачи по отысканию напряженно-деформированного состояния конструкции при различных условиях нагружения.

Вторая модель представляет наматываемую оболочку в виде системы гибких нитей, которые воспринимают нагрузку от внутреннего давления. В данной постановке не учитываются свойства связующего: считается, что оно лишь обеспечивает монолитность структуры материала и является абсолютно податливым. При этом поведение нитей описывается линейной диаграммой напряженно-деформированного состояния при растяжении, а в качестве критерия оптимальности (обеспечение минимума массы оболочки) принимается критерий равнопрочности, предполагающий, что все нити на поверхности оболочки находятся в максимально допустимом растянутом состоянии [53–56]. Расчет оболочек в такой постановке принято называть *методом сетчатого анализа*. Метод позволяет в сжатые сроки получить предварительные результаты на этапе эскизного проектирования новых конструкций и изделий. Данный подход широко применяется на производстве и описан в учебных пособиях разных авторов [14, 31, 57–59]. Данная модель позволяет определить геодезические траектории укладки ровинга для исключения проскальзывания по поверхности оправки в процессе намотки [60–63]. Кроме того, использование данной модели нашло широкое применение в работах, посвященных автоматизации и оптимизации процессов

намотки [64], и позволило расширить формы намоточных изделий. Главным недостатком нитяной модели является отсутствие возможности построения решений при расчете на прочность конструкций под действием различных нагрузок, отличных от внутреннего давления.

В настоящее время на предприятиях при проектировании крупногабаритных намоточных изделий применяются обе модели представления оболочки. Метод сетчатого анализа удобно использовать для определения схем намотки, усилий натяжения ровинга, вычисления профиля готового изделия. Для проведения анализа напряженно-деформированного состояния конструкции под действием эксплуатационных нагрузок используется гомогенизированная модель, которая позволяет сформулировать и отыскать решение краевой задачи механики деформируемого твердого тела. На основе полученных оценок прочности конструкции проводится корректировка параметров процесса намотки изделия, его формы и других показателей.

1.3. Прогнозирование эффективных механических характеристик ПКМ

Задача корректного описания термомеханического поведения слоистых композиционных материалов лежит в основе решения краевых задач по отысканию НДС изделий и конструкций из ПКМ при различных начальных и граничных условиях. В исследовании [32] экспериментально изучено влияние схемы намотки на механические свойства изделий из композитов. По результатам экспериментов определены зависимости значений модуля упругости от типа намотки, углов укладки спиральных слоев, а также приведено сравнение полученных механических характеристик для различных типов армирующих волокон. Однако, экспериментальные методы идентификации механических характеристик композитных материалов не позволяют получить полный набор данных из-за ограниченности физическими возможностями образцов и испытательных машин, кроме того, конечная структура материала формируется в готовом изделии. На практике для получения полного набора характеристик композиционного

материала приходится прибегать к аналитическим, полуаналитическим и численным методам.

Один из первых методов определения упругих характеристик для однонаправленного материала продемонстрирован в работе [51], полученные соотношения формулируют «правило смесей»: вклад компонента прямо пропорционален его объемной доле. Для определения механических характеристик в случае плоского напряженного состояния многослойный композит представляют в виде набора разноориентированных слоев однонаправленного материала, при этом установлено, что при подсчете общей жесткости пакета порядок чередования слоев не имеет значения [16, 65–66]. Кроме того, для получения нижней и верхней границ эффективных значений модуля упругости композита широко применяется «вилка» Фойгта–Рейсса [66, 67]. Для отдельных случаев можно воспользоваться вилоккой Хашина–Штрикмана, которая позволяет уточнить значение эффективного модуля упругости материала.

Несмотря на развитый математический аппарат прогнозирования эффективных характеристик композиционных материалов, остаются актуальными задачи построения полной матрицы упругих констант для композиционного материала, который в общем случае обладает анизотропией механических свойств [68–73].

При отыскании НДС намоточных изделий с помощью систем инженерного анализа методом конечных элементов приходится представлять оболочку как трехмерное тело, которое в первом приближении описывается как трансверсально-изотропный материал. Однако при исследовании толстостенных изделий данная гипотеза неприменима и необходимо учитывать полный набор материальных констант [74,75]. При решении практических задач отдельные слои композита рассматривают как трансверсально-изотропный материал, поскольку армирующие волокна укладываются в одном направлении, а сам же слоистый композит на макроуровне принято считать ортотропным. Для отыскания всех компонент осредненной матрицы упругих констант ортотропного материала все чаще прибегают к конечно-элементному моделированию экспериментов на растяжение,

сжатие, чистый сдвиг представительного объема композиционного материала [76-78]. Данный подход зарекомендовал себя при решении практических и научно-исследовательских задач и лег в основу многоуровневого подхода отыскания эффективных характеристик слоистых композиционных материалов [68, 70].

1.4. Описание термовязкоупругого поведения ПКМ

Композиционные материалы на основе полимерных связующих эксплуатируются в температурном интервале между температурой стеклования и температурой хрупкости. Например, рекомендуемый диапазон эксплуатации композитов с эпоксидным связующим составляет 393–473 К. В литературе широко представлены исследования, посвященные изучению и описанию поведения композиционных материалов при различных температурах. В работах [71, 79–80] исследованы закономерности деформирования полимерных композитов при различных диапазонах температур. Авторами работы [81] получены новые данные о закономерностях вязкоупругого поведения высоконаполненного низко модульного полимерного композита на основе серии испытаний при различных температурах. Авторы предложили феноменологическую многофакторную математическую модель для описания вязкоупругого поведения полимерного композитного материала при сложных видах нагружения.

При проектных разработках новых изделий из ПКМ поведение композита зачастую принимается как линейно-упругое, а получаемый материал рассматривается как неоднородное линейно-упругое тело, свойства арматуры и связующего считаются упругими и постоянными. Но при производстве крупногабаритных изделий, производство которых достаточно длительное, а процесс полимеризации связующего протекает при высоких температурах на протяжении нескольких десятков часов, формируемая оболочка и оправки из ППС проявляют выраженные вязкоупругие свойства. Поэтому при исследовании поведения конструкций в процессе производства важно рассматривать материалы с точки зрения теории термовязкоупругости. Исследователи в основном рассматривают ПКМ в рамках линейной теории вязкоупругости, это можно

объяснить сложностью проведения экспериментальных исследований и ограниченным числом реализованных моделей поведения в системах конечно-элементного анализа.

Линейная теория вязкоупругости дает приближенное описание поведению материала, для получения корректных результатов необходимо определить границы ее применимости. В работе [82] дается определение линейности для выявления условий, при которых линейная теория достаточно точно сходится с экспериментальными данными. Определение линейности поведения вязкоупругого материала приводится в следующем виде:

Пусть для некоторого вязкоупругого тела имеет место взаимосвязь между откликом системы R и внешним воздействием на тело I вида $R = R\{I\}$. Причем значение отклика зависит от истории изменения величины I , а не только от ее значения в данный момент, т.е. R является функционалом от I . Функционал является линейным тогда и только тогда, когда удовлетворяет двум условиям:

условию однородности (или пропорциональности)

$$R\{cI\} = cR\{I\}, \quad c = \text{const};$$

условию суперпозиции

$$R\{I_a + I_b\} = R\{I_a\} + R\{I_b\}.$$

Материалы и конструкции, для которых выполняются эти условия, называются линейными вязкоупругими.

Установлено, что выполнение второго условия линейности влечет автоматическое выполнение и первого условия, но не для всех материалов выполнение первого условия обеспечивает выполнение второго.

Линейный функционал отклика можно представить в виде интеграла от исходного входного данного и отклика, зависящего от истории одного предварительно выбранного воздействия. Часто отклик вязкоупругого тела зависит от времени, прошедшего после ввода входных данных, в этом случае материал называют нестареющими или инвариантными относительно сдвига по времени.

Физические соотношения для линейного неоднородного вязкоупругого тела в общем случае записывают в виде [83]

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) = \int_0^t C_{ijkl}(\mathbf{X}, t, \tau) \varepsilon_{kl}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{X}, t) = \int_0^t J_{ijkl}(\mathbf{X}, t, \tau) \sigma_{kl}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $C_{ijkl}(\mathbf{X}, t, \tau)$ – тензор ядер релаксации; $J_{ijkl}(\mathbf{X}, t, \tau)$ – тензор ядер ползучести. В случае если материал является нестареющим, ядра ползучести и релаксации являются ядрами разностного типа [83], тогда соотношения (1–2) могут быть записаны в виде свертки Стилтъяеса:

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) = \int_0^t R_{ijkl}(\mathbf{X}, t - \tau) d\varepsilon_{kl}(\tau), \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{X}, t) = \int_0^t \Pi_{ijkl}(\mathbf{X}, t - \tau) d\sigma_{kl}(\tau), \quad (4)$$

где $R_{ijkl}(\mathbf{X}, t)$ – функция релаксации; $\Pi_{ijkl}(\mathbf{X}, t)$ – функция ползучести. Связь между функциями и ядрами ползучести/релаксации представлена в работе [84]. В книге представлены физические соотношения линейной теории наследственной вязкоупругости для различных по свойствам материалов. Например, для изотропного материала тензор ядер релаксации может быть выражен через ядра сдвиговой и объемной релаксации. Для простого нестареющего композита девиаторные части тензоров напряжений и деформаций имеют интегральную зависимость, а шаровые части этих тензоров связаны по упругому закону.

Согласно принципу соответствия многие задачи вязкоупругости с помощью преобразования Лапласа (или Фурье) для определяющих соотношений и граничных условий по истинному времени возможно свести к математически эквивалентными задачам для упругих тел. Такая аналогия дает возможность использовать методы теории упругости для получения решений задач линейной вязкоупругости. В работах [83, 85–87] рассмотрены решения различных задач

вязкоупругости с использованием преобразований Лапласа. Для решения практических краевых задач линейной вязкоупругости удобно воспользоваться методом переменных параметров упругости (или квазиупругим методом). Согласно этому методу, вязкоупругое решение получается из решения аналогичной упругой задачи путем замены всех упругих характеристик материала соответствующими функциями релаксации и ползучести [73, 82, 88–90].

При исследовании задач вязкоупругости для композиционных материалов встает вопрос об определении эффективных характеристик так в работах [91, 92] продемонстрировано применение энергетического метода, в котором предполагается равенство энергий деформирования, запасаемых в гетерогенной и эквивалентной ей средах. С использованием такого подхода также описано определение эффективных по времени вязкоупругих характеристик. Одним из методов построения приближенных решений краевых задач с использованием функций типа осредненных по времени вязкоупругих параметров материала является метод квазиконстантных операторов, описанный в работе [88].

На сегодня предложено много прикладных методик прогнозирования вязкоупругих характеристик для анизотропных материалов. В работе [72] изложен подход расчета эффективных вязкоупругих характеристик композиционных материалов при установившихся циклических колебаниях на основе метода асимптотического осреднения периодических структур. Авторами статьи [73] рассмотрен вопрос прогнозирования эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленно армированных полимерных композитов методом конечных элементов. Приведены общая постановка краевой задачи термовязкоупругости для рассмотренной ячейки периодичности, граничные условия вычислительных экспериментов по отысканию компонент тензора жесткости композита. Получены эффективные функции релаксации и параметры температурно-временного сдвига однонаправленного органопластика. Установлено, что поведение органопластика является термореологически простым, при условии такого же поведения волокон и связующего. А.П. Янковский [93] предложил численно-аналитическую методику моделирования линейно-

вязкоупругого поведения пространственно-армированных сред с учетом теплового воздействия. Автор показал, что исходя, из свойств вырожденности разностных экспоненциальных ядер релаксации, можно организовать алгоритм моделирования так, чтобы не возникало необходимости пересчета предыстории деформирования представительного элемента композиции при проходе по временным точкам. Приведены результаты конкретных расчетов ползучести для нескольких типов полимерных материалов.

Для решения прикладных задач вязкоупругости предлагаются, как правило, итерационные процедуры. В статье [90] авторы предложили итерационную процедуру решения краевых задач линейной вязкоупругости в случае, когда интегральный оператор, обратный оператору релаксации, неизвестен или расчет соответствующего ядра связан с вычислительными трудностями. Преимущества подхода состоят в том, что, во-первых, при применении предложенной процедуры возможен параллельный расчет пространственных и временных компонент напряженно-деформированного состояния, во-вторых, нет необходимости в интегрировании всей истории изменения напряжений и перемещений во времени. В исследовании [94] построена итерационная процедура, которая сводит решение краевой квазистатической задачи нелинейной вязкоупругости к последовательности решений в рамках линейной теории упругости. Приведены решения модельных задач для случая однонаправленного волокнистого композита.

1.5. Подходы к моделированию технологического процесса намотки и полимеризации

Как отмечалось выше, технологический процесс изготовления оболочек из ПКМ методом намотки состоит из двух этапов – намотки армирующего волокна на оправку и полимеризации связующего. При изучении научных работ, посвященных определению НДС оболочки в процессе изготовления, главной целью авторы ставят определение остаточных напряжений и деформаций.

В процессе изготовления намоточных оболочек выделяют следующие группы остаточных напряжений [95]:

- остаточные напряжения от натяжения лент при намотке;
- остаточные напряжения, возникающие при нагреве конструкции из-за неравномерного температурного расширения оправки и уложенных слоев;
- остаточные напряжения, образующиеся в процессе полимеризации связующего;
- термоупругие напряжения, возникающие из-за различия физико-механических характеристик на стадии прогревания и после полимеризации.

Для определения остаточных напряжений от намотки разработано много методик, подходы, заложенные в них, опираются на различные представления о структуре и поведении композиционного материала [26, 32, 55, 63, 66, 81, 85]. Например, авторами работ [96–98] выведены общие выражения для решения двух основных задач: нахождение остаточных напряжений в готовом изделии по заданным параметрам силовой намотки и технологического процесса; нахождение параметров натяжения ровинга для получения требуемого распределения остаточных напряжений в готовом изделии. В.И. Антонов [53] рассмотрел задачу об определении начальных напряжений, возникающих в цилиндре, образованном намоткой с натягом некоторой ленты на упругий сердечник. Аналитическое решение поставленной задачи получено с допущением, что сформированный материал представляет собой анизотропный неоднородный цилиндр. Авторским коллективом [99, 100] предложена методика конечно-элементного анализа композиционного баллона, предлагающая прогнозирование напряженно-деформированного состояния композиционного баллона с помощью системы ограничений, определяемых на смежных этапах жизненного цикла.

Для исследователей представляют интерес не только проблемы отыскания остаточных напряжений, но и вопросы управления процессом намотки, помимо оптимизации технологических процессов, предлагаются и технические решения для совершенствования процесса намотки. Для разработки и совершенствования алгоритмов управления создаются имитационные модели процесса намотки [56], разрабатываются методы управления натяжением [101] или радиальным

приращением [55] для снижения остаточных напряжений в процессе намотки и возникающих на их фоне проблем.

Вопросы определения температурных деформаций и напряжений в процессе термообработки изучаются с начала 70-х гг. прошлого века [102–106]. Установлено, что остаточные напряжения при намотке ровинга с малой величиной натяжения обусловлены температурными деформациями, возникающими на этапе термообработки, в том числе из-за эффекта термоусадки полимерного связующего. [39, 107–110]. Например, авторы работы [46] предложили математическую модель процесса термообработки, позволяющую рассчитать оптимальные режимы отверждения намотанных трубчатых элементов с учетом различных технологических схем для формирования заданных геометрических и механических характеристик углепластиковых трубчатых элементов. Для регулирования величины остаточных напряжений в композиционном материале возможно формирование неоднородного температурного поля на этапе охлаждения [45]. Актуальной задачей технологической механики является поиск методов снижения температурных деформаций в процессе отверждения намотанных конструкций для получения однородной монолитной структуры материала. В исследовании [34] экспериментально обоснован многоступенчатый температурно-временной режим отверждения толстостенных органических полимеров, который позволил обеспечить монолитность структуры и однородность распределения основных компонентов в объеме материала. Диссертационная работа [111] посвящена экспериментальным и численным исследованиям процессов трещинообразования в толстостенных цилиндрических намоточных оболочках из стеклопластика в процессе их термообработки стандартным и оптимальным режимами. Вычислительные эксперименты учитывали нестационарную теплопроводность, температурные зависимости механических свойств и вязкоупругость поведения ПКМ. Автором установлено, что при охлаждении цилиндра в оптимальном режиме максимальные радиальные напряжения на начальном участке оказываются в несколько раз меньше, чем при охлаждении в стандартном режиме. Экспериментально было показано, что в конце

процесса охлаждения при оптимальном режиме цилиндр получается монолитным, без кольцевых трещин.

При определении температурных деформаций в многослойных конструкциях из ПКМ естественным образом встает вопрос о решении задачи нестационарной теплопроводности в изделии. Из последних работ можно выделить работы [111–114], посвященные проблемам моделирования переноса тепла в многослойных цилиндрических оболочках, в которых тепловые коэффициенты каждого слоя подчиняются различным закономерностям. В работе [115] представлено решение задачи теплопроводности для многослойного цилиндра при симметричных граничных условиях третьего рода. Для совершенствования математических моделей этапа отверждения необходимо знать значения коэффициентов теплопроводности композитов. В общем случае такие коэффициенты являются функциями от температуры. Исследованию теплопроводности композитов посвящено немало работ. Как правило, расчетные формулы и значения коэффициентов в работах получены в результате обработки экспериментальных данных для конкретных материалов. В случае отсутствия экспериментальных данных используют априорные распределения температуры и теплового потока в предположении о гетерогенности структуры материалов. Но в последние годы появляются работы, посвященные прогнозированию коэффициентов теплопроводности для композитов, например, в работе [116] предложена математическая модель переноса тепловой энергии в волокнистом композите, на основе которой найдены эффективные значения коэффициентов теплопроводности. Авторами также проведена оценка погрешности полученных результатов с применением двойственной вариационной формулировки задачи стационарной теплопроводности.

Самой наукоемкой и сложной с точки зрения реализации является проблема учета и моделирования фазового перехода в полимерном связующем [117–120]. В работе [119] приведена постановка краевой задачи термомеханики кристаллизующейся среды. Описаны алгоритмы для численной реализации теплокинетической задачи и задачи определения НДС затвердевающей системы

для осесимметричного случая. В работе [117] предложена модель и численная реализация полимеризации эпоксидного связующего при формовании толстостенной композитной конструкции. Результаты численных экспериментов демонстрируют пространственно-временные закономерности распространения фронта полимеризации в теле формуемой конструкции.

Несмотря на широкую освещенность различных исследований НДС в наматываемом материале, работ, посвященных совместному деформированию формообразующей оправки и наматываемого изделия не так много. В исследованиях [121-124] разработана математическая модель системы «оправка – оболочка» для различных пространственных конфигураций оправок для полного процесса изготовления намоточного изделия с учетом вязкоупругости. Как основной исследуемый параметр выделяют контактное давление на поверхности оправки. В 1971 г. было предложено устройство для определения давления на оправку [125], но его сложно применять на реальных конструкциях с малыми полюсными отверстиями. Группой ученых разработан математический аппарат теории растущих тел, который применен для задач теплопроводности, контактного взаимодействия, упругого деформирования, освещены вопросы применимости с учетом ползучести и вязкоупругости материалов [127–135]. Но предложенные уравнения и их решения не подходят для конструкций сложных геометрических конфигураций, поэтому вопросы, связанные с определением давления на поверхности оправки в процессе намотки и термообработки, остаются актуальными по сей день [136–140].

Выводы по главе

Теорией проектирования намоточных изделий ученые и конструкторы занимаются с 80-х гг. прошлого века. Методы и подходы к проектированию изделий, подбору технологических параметров проверены временем и широко применяются на производстве. Однако при производстве новых малосерийных изделий, в которых реализуются разные схемы намотки, внедряются новые материалы для производства оболочек и оправок, возникает множество проблем,

таких как отклонения геометрии, несовершенства структуры и, как следствие, снижение эксплуатационных характеристик готового изделия. Во многом это можно объяснить тем, что предложенные расчетные методы применимы для цилиндрических оболочек или оболочек канонической формы. Также отмечено, что во многих предложенных методиках расчета не учитывается поведение оправки либо рассматривается в упругой постановке. При проектировании крупногабаритных изделий, получаемых намоткой на разрушаемые оправки из ППС, такие допущения неприменимы. Для определения полей остаточных напряжений и деформаций в оболочке необходимо проводить исследование эволюции НДС на протяжении всего технологического процесса с учетом совместного деформирования системы «оправка – оболочка». Независимые решения, полученные для отдельных этапов технологического процесса, не позволяют с достаточной точностью прогнозировать появление дефектов и управлять параметрами процессов намотки и полимеризации. Решить задачу отыскания НДС крупногабаритного намоточного изделия в условиях сложного термосилового нагружения можно с помощью метода конечных элементов, реализованного в сертифицированных пакетах инженерного анализа, с учетом физико-механических характеристик материалов конструкции, технологических параметров процесса изготовления, конструктивных особенностей оснасток. Корректная постановка краевой задачи и практически ориентированная методика ее решения откроют широкие возможности для оптимизации намоточных изделий, оправок, оснасток и параметров технологических процессов – схем намотки, усилий и скорости натяжений лент, режимов термообработки.

На основании проведенного анализа научной и технической литературы сформулирована цель исследования: разработать комплексную расчетно-экспериментальную методику описания поведения и исследования на ее основе напряженно-деформированного состояния системы «оправка – композиционная оболочка» в процессе изготовления оболочки с учетом термовязкоупругого поведения материалов.

Для достижения поставленной 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».

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИИ

В главе представлены результаты исследования и идентификации термовязкоупругих характеристик материалов оболочки и оправки, входящих в исследуемую конструкцию. Приведены результаты механических испытаний образцов песчано-полимерной смеси, из которой изготавливается формообразующая оправка, однонаправленного пластика и отвержденного связующего, которые были предоставлены ПАО НПО «Искра». Выбраны и модифицированы определяющие соотношения для описания поведения материалов, с адаптацией к применению в коммерческом пакете инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL.

2.1. Описание экспериментов по идентификации термомеханических параметров вязкоупругости для материалов, входящих в состав изделия

Экспериментальная часть исследования реализована сотрудниками Центра экспериментальной механики ПНИПУ и включала в себя исследование термомеханического поведения цилиндрических образцов песчано-полимерной смеси, отверждённого эпоксидного связующего, кольцевых образцов органопластика.

Образцы песчано-полимерной смеси

Исследования прочности и релаксации в области сжатия при нормальной и повышенных температурах (70, 110, 150 °C) образцов ППС проведены на универсальной электромеханической системе Instron 5882. Для определения прочности и модуля упругости материала в ходе экспериментального исследования было испытано 3 серии по 20 образцов. Серии отличались процентным содержанием кварцевой пыли в составе песчаной смеси. При каждой температуре было испытано по 5 образцов, скорость передвижения траверсы была 1 мм/мин и постоянна. На рисунке 2.1 представлены фотографии образцов в камере испытательной машины (а) и в момент разрушения (б).

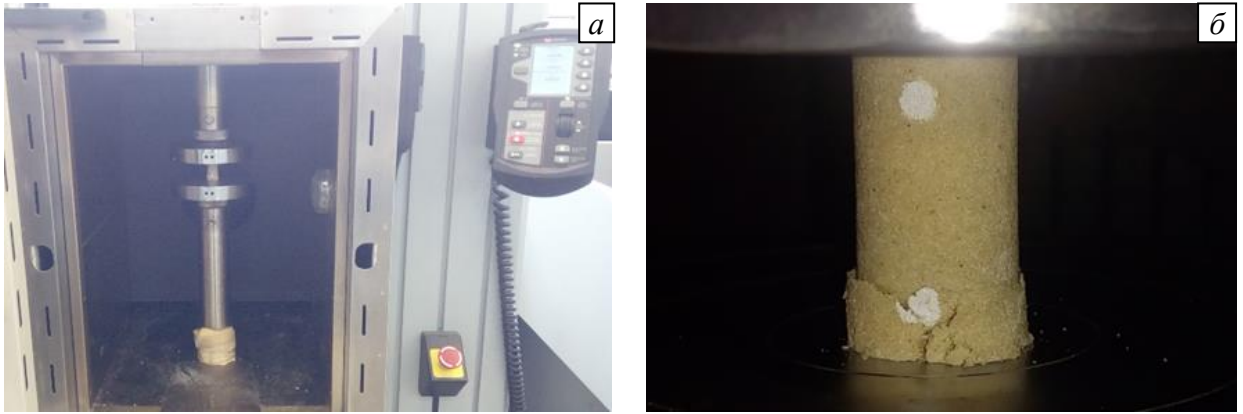


Рисунок 2.1 – Образец в оснастке испытательной системы во время испытаний

По результатам испытаний получены температурные зависимости пределов прочности и модулей упругости для всех серий образцов материала. Результаты представлены на рисунке 2.2.

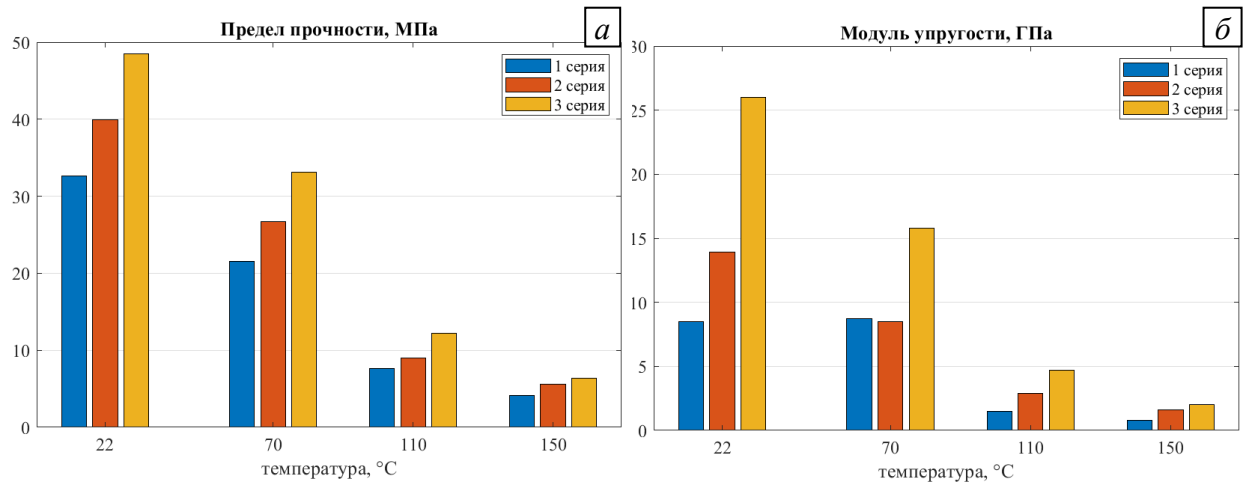


Рисунок 2.2 – Зависимости предела прочности (а) и модуля упругости (б) от температуры для образцов ППС при испытаниях на сжатие

На основе полученных результатов установлено: увеличение температуры ведет к монотонному снижению механических свойств материала. Для образцов из 1-й серии изменение механических свойств составляет 33–34 %, для 2-й серии образцов 78–80 %, для 3-й серии образцов 88 %. Установлено, что увеличение доли кварца в составе смеси ведет к повышению прочностных и жёсткостных характеристик песчано-полимерных образцов. При нормальной температуре увеличение содержания кварца на 1,5 % повысило значение предела прочности на 22,7 %, модуля упругости на 70 %. Увеличение содержания кварца на 5 % относительно начального состава повысило предел прочности материала на 48,7 %, а значение модуля упругости возросло на 217 %. Для дальнейшего исследования

выбраны данные, полученные для 1-й серии образцов. Значение мгновенного модуля при нормальной температуре $E = 8,5$ ГПа. При повышении температуры до 70 °С модуль упругости снизился на 33 %, до 110 °С – на 76 %, до 150 °С – на 84 %.

Исследование релаксации цилиндрических образцов ППС (рисунок 2.3) в области сжатия проводилось в условиях нормальной и повышенных температур. Испытанию было подвержено по 5 образцов при нормальной и повышенных температурах (70 , 110 , 150 °С). Время проведения испытаний при комнатной температуре составило 8 часов, при повышенных температурах – 4 часа. Образцы для испытаний при повышенных температурах подвергались предварительному линейному нагреву со скоростью 10 °С в минуту и последующему термостатированию в течение двух часов для прогрева всех элементов нагружающей цепи и температурной камеры. При проведении испытаний образцы нагружались с постоянной скоростью передвижения траверсы 10 мм/мин до значений напряжений, составляющих 30 % от статического предела прочности при сжатии для заданной температуры [141].

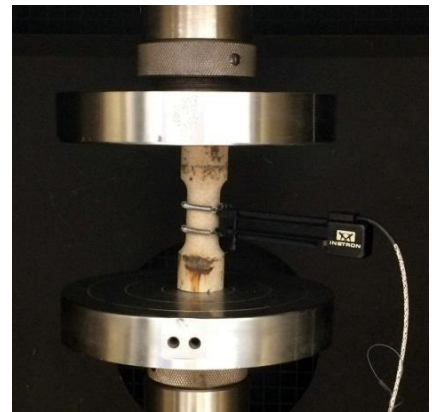


Рисунок 2.3 – Образец перед испытанием на релаксацию в области сжатия

Результаты испытания образцов в виде зависимости напряжений от времени представлены на рисунке 2.4. Установлено, что материал проявляет вязкоупругий характер поведения, на которое существенное влияние оказывает температура. При нормальной температуре скорость падения напряжений составляет $\sim 0,95$ МПа/ч. При температуре 110 °С падение напряжений замедляется, а при 150 °С останавливается, что свидетельствует о переходе свойств материала к длительным значениям.

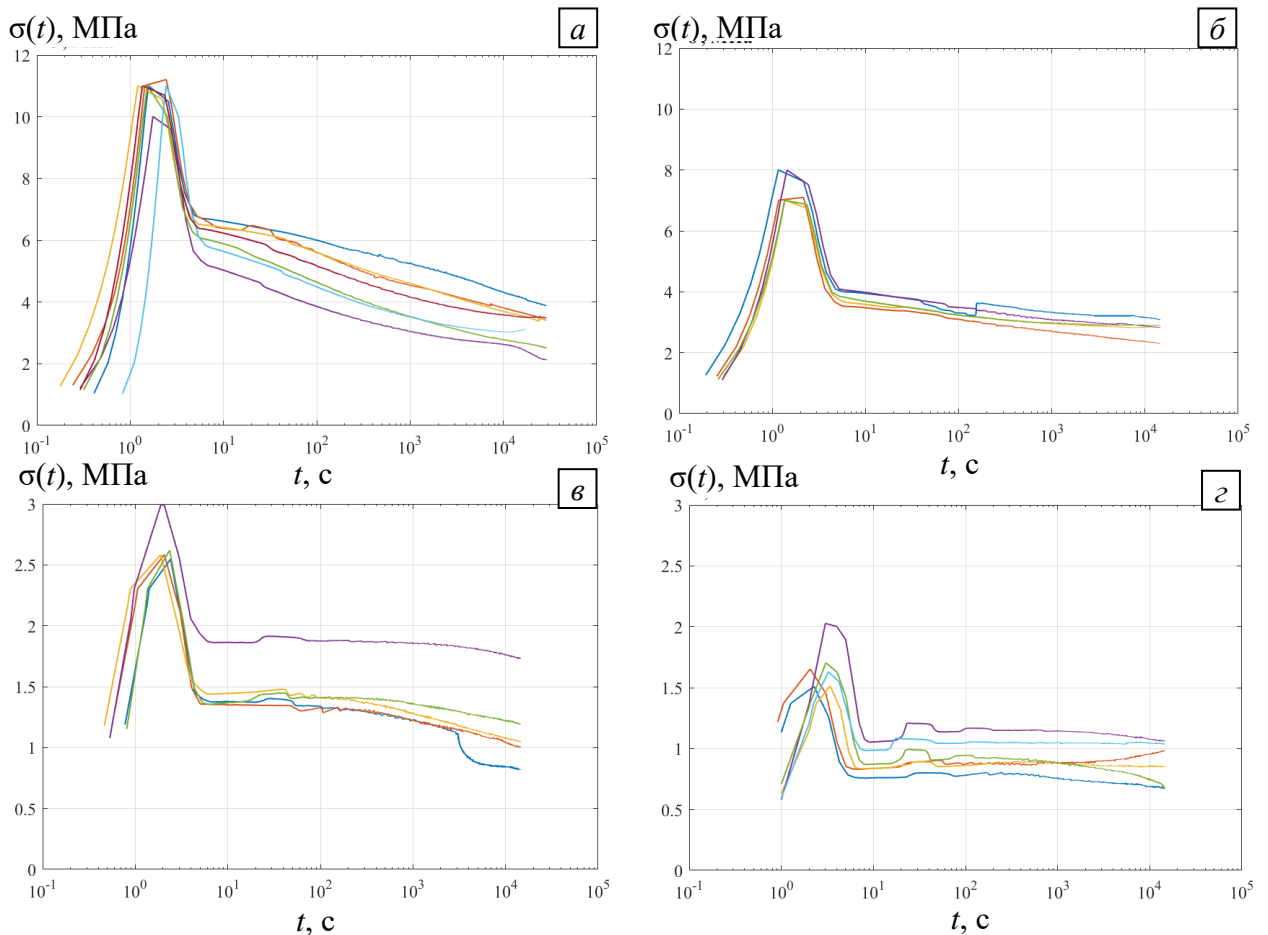


Рисунок 2.4 – Кривые релаксации напряжений образцов ППС при температурах:
a – 22 °С; *б* – 70 °С; *в* – 110 °С; *г* – 150 °С

Полученные результаты подтверждают необходимость учета реологического характера поведения песчаной композиции при решении задачи о совместном деформировании композитной оболочки и оправки в процессе изготовления.

Кольцевые (однонаправленные) образцы органопластика

Исследование релаксации напряжений при растяжении однонаправленных образцов органопластика проводилось на универсальной электромеханической системе Instron 5882 в условиях нормальной и повышенных (70, 110, 170 °С) температур. При нормальной температуре измерение деформации осуществлялось при помощи навесного экстензометра Instron 2620-601, при повышенных температурах использовался бесконтактный видеоэкстензометр AVE Instron.

На рисунке 2.5, *a* представлена фотография образца в камере испытательной машины. Для проведения испытаний была использована специальная оснастка –

стальные полудиски диаметром 150 мм, на которые одевался кольцевой образец (рисунок 2.5, б).

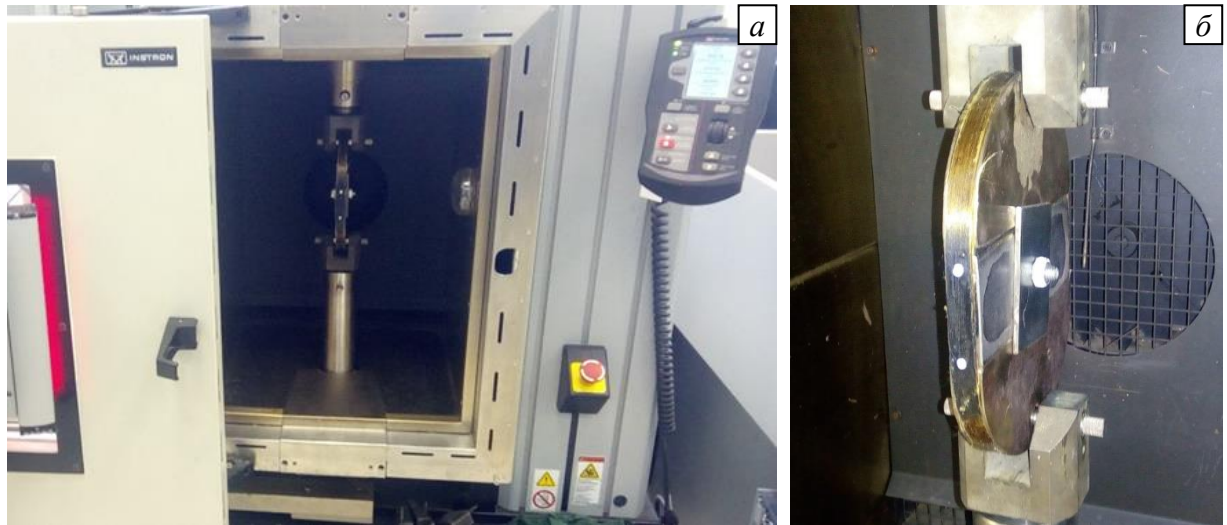


Рисунок 2.5 – Испытания кольцевых образцов однонаправленного пластика:
 а – в камере испытательной машины; б – специальная оснастка для кольцевых образцов

Испытания при комнатной температуре длились 8 часов, при повышенных температурах – 4 часа. Перед испытаниями при повышенных температурах образцы были линейно нагреты со скоростью 10 °С/мин и выдержаны при этой температуре в течение четырех часов для полного прогрева всех элементов нагружающей цепи и температурной камеры.

Результаты испытания образцов в виде зависимости напряжений от времени представлены на рисунке 2.6. Установлено, что температура оказывает существенное влияние на поведение материала. При нормальных температурах на рассмотренном временном интервале снижение напряжений составило порядка 3 % (рисунок 2.6, а). При увеличении температуры до 170 °С падение напряжений составило 25 % (рисунок 2.6, з). Из анализа кривых релаксации напряжений в однонаправленном образце пластика можно сделать вывод, что при отыскании НДС композиционных оболочек при нормальных температурах учет вязкоупругого поведения материала необязателен, поскольку снижение напряжений, а как следствие, механических характеристик не существенно. При исследовании задач, сопряженных с температурным воздействием, необходимо учитывать реологические процессы, протекающие в материале.

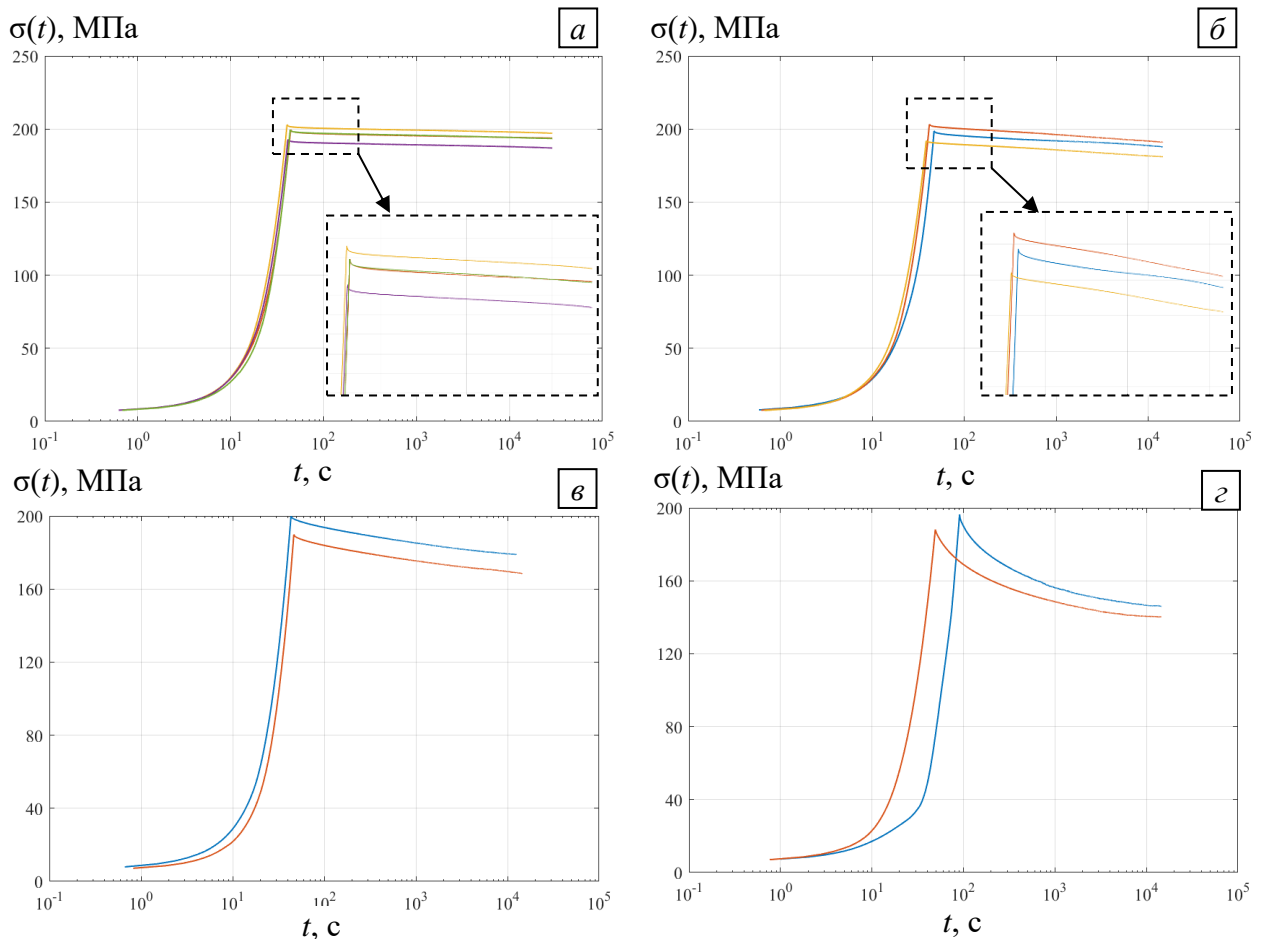


Рисунок 2.6 – Кривые релаксации напряжений образцов пластика при температурах:
 a – 22 °С; b – 70 °С; v – 110 °С; z – 170 °С

Образцы отвержденной эпоксидной смолы.

Механические испытания образцов отвержденной эпоксидной смолы проводились на электромеханической машине Instron 5882, оборудованной камерой для испытаний при повышенных температурах, с использованием видеоэкстензометра. Исследование проведено для цилиндрических образцов с утолщенными частями для захватов на статическое растяжение при температурах: 22, 70, 110, 150 °С. Испытано 4 образца, по одному на температуру. Образцы нагружались до разрушения. Результаты испытаний приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты испытаний образцов из отвержденной смолы

№ п/п	Диаметр, мм	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Температура, °С
1	5,20	78,5	3,6	22
2	5,23	55,4	2,6	70
3	5,22	44,6	2,0	110
4	5,26	13,0	0,6	150°С

2.2. Определяющие соотношения для описания термовязкоупругих свойств песчано-полимерной смеси и однонаправленного пластика

Исходными данными для выбора определяющих соотношений, которые позволят описать поведение материалов, выступали экспериментальные данные о релаксации напряжений ППС и однонаправленных образцов пластика. Согласно работам [52, 83] приняты гипотезы о линейновязкоупругом и термореологически простом поведении материалов. Из анализа результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований, сделано предположение, что существенное влияние на НДС системы «оправка – оболочка» будет оказывать термовязкоупругость материала оправки. Согласно исследованиям [142–143] нелинейное поведение оболочки в первую очередь обусловлено реологическими процессами, протекающими в волокне, а не в связующем, так как его прочностные характеристики ниже на 2 порядка. Поскольку доля отвержденных материалов оправки и армирующего волокна существенно больше, чем связующего, и в процессе изготовления будут достигаться температуры, лежащие выше точки стеклования, то в качестве определяющих соотношений можно выбрать вязкоупругую модель максвелловского типа с реализацией рядами Prony [144–145], использующими в качестве релаксационного ядра сумму экспонент. В общем случае связь напряжений и деформаций имеет вид

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) = \int_0^t 2G(t - \tau) \frac{de_{ij}(\mathbf{X}, \tau)}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} K \theta(\mathbf{X}), \quad (5)$$

где e_{ij} – девиатор тензора деформаций; θ – объемная деформация; K – модуль объемного сжатия; $G(t)$ модуль сдвига:

$$G(t) = G_0 \left[\alpha_0^G + \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right], \quad (6)$$

α_i^G – относительные модули сдвига для времен сдвиговой релаксации τ_i^G ; n_G – количество времен сдвиговой релаксации; из условий $G_0 = G|_{t=0}$, $G_\infty = G|_{t=\infty}$ следует

$$\alpha_0^G = \frac{G_\infty}{G_0}, \quad \sum_{i=1}^{n_G} \alpha_i^G = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}. \quad (7)$$

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 (6):

$$E(t) = E_0 \left[c_0 + \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t}{\beta_i}\right) \right], \quad (8)$$

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

По аналогии с (7) из $E_0 = E|_{t=0}$, $E_\infty = E|_{t=\infty}$ следует

$$c_0 = \frac{E_\infty}{E_0}, \quad \sum_{i=1}^{N_e} c_i = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0}. \quad (9)$$

Предположив, что времена релаксации для сдвига (τ_i^G) и растяжения-сжатия (β_i) совпадают и их количество равно $N_e = n_G = n$, из (7) и (9) можно получить соотношение вида

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

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

$$\alpha_i^G = c_i \cdot B. \quad (10)$$

Известно, что

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu_0)}, \quad G_\infty = \frac{E_\infty}{2(1+\nu_\infty)}, \quad (11)-(12)$$

ν_0 , ν_∞ – значения коэффициента Пуассона в момент времени $t=0$ и $t=\infty$ соответственно. Из условия постоянства модуля объемного сжатия K^* можно отыскать ν_∞ :

$$K^* = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)} = \text{const}, \quad (13)$$

$$K_\infty = K^* = \frac{E_\infty}{3(1-2\nu_\infty)} \Rightarrow \nu_\infty = 0,5 \left(1 - \frac{E_\infty}{3K^*} \right). \quad (14)$$

Подставив (14) в (12), получим

$$G_\infty = \frac{E_\infty}{2 \left(1 + 0,5 \left(1 - \frac{E_\infty}{3K^*} \right) \right)} = E_\infty \frac{3}{9 - \frac{E_\infty}{K^*}}. \quad (15)$$

Таким образом, по соотношениям (10), (11), (13) и (15) можно вычислить α_i^G , G_0 , K^* , G_∞ , предварительно отыскав c_i , E_0 , E_∞ , ν_0 из эксперимента на растяжение-сжатие. Для этого удобно воспользоваться определяющими соотношениями в виде

$$\sigma(t) = \int_0^t \left[E_\infty + E_0 \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp \left(-\frac{t-\tau}{\beta'_i} \right) \right] d\varepsilon(\tau), \quad (16)$$

где $\beta'_i = \frac{\beta_i}{A(T)}$ – приведенное время; $A(T)$ – функция сдвига. Поскольку

материалы предполагаются терморелогически простыми, можно воспользоваться функцией сдвига по формуле Вильямса–Ландела–Ферри:

$$\lg(A(T)) = \frac{C_1(T-T_r)}{C_2 + (T-T_r)}, \quad (17)$$

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

Предложенное описание механического поведения материалов можно адаптировать в среде ANSYS Mechanical APDL с помощью рядов Prony. При этом коэффициенты аппроксимации c_i, β_i обобщенной функции релаксации определяются по соотношению (8). Зависимость скорости релаксации от температуры можно описать с помощью функционала модели Shift с параметрами WLF (17), которые определяются из системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{bmatrix} T_1 - T_r; & -\left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i1}}{\beta_i}\right) \right\rangle \\ T_2 - T_r; & -\left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i2}}{\beta_i}\right) \right\rangle \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (T_1 - T_r) \cdot \left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i1}}{\beta_i}\right) \right\rangle \\ (T_1 - T_r) \cdot \left\langle \lg\left(\frac{\bar{\beta}_{i2}}{\beta_i}\right) \right\rangle \end{Bmatrix}, \quad (18)$$

где T_1 , T_2 , T_b – температуры кривых релаксации. c_i, β_i определяются минимизацией среднеквадратичной невязки:

$$\sum_j \left(E_0 \left[\frac{E_\infty}{E_0} + \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp\left(-\frac{t_j}{\beta_i}\right) \right] - E_b(t_j) \right)^2 = \min. \quad (19)$$

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

1) фактические экспериментальные кривые релаксации напряжений преобразовываются к функциям релаксации материала при каждой температуре и усредняются;

2) относительно базовой температуры 22 °С вычисляются коэффициенты температурно-временного сдвига (17) и данные переводятся в приведенное время;

3) строится обобщенная кривая релаксации материала;

4) для обобщенной кривой релаксации вычисляются коэффициенты аппроксимации (8).

После обработки экспериментальных данных методами нелинейного программирования для материала оправки были получены значения материальных констант модели (16)–(17), удовлетворяющие условию минимума невязки между экспериментальными и расчетными данными.

2.3. Обработка результатов механических испытаний на релаксацию цилиндрических образцов ППС

Для обработки данных, полученных при проведении механических испытаний, фактические кривые необходимо преобразовать к функции релаксации материала при каждой температуре:

$$\begin{aligned}
 R(t_i) &= \frac{E_0}{\max(\sigma_i)} \sigma(t_i), \\
 E_i &= \frac{\sigma(t_i)}{\varepsilon}, \\
 \langle E \rangle &= \frac{\sum_i E(t_i)}{i}, \\
 R^*(t_i) &= \frac{R(t_i)}{E_\infty} \langle E \rangle,
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

где $R(t_i)$, $\sigma(t_i)$, E_i , $R^*(t_i)$ – значения функции релаксации, напряжений, модуля упругости, обобщенной функции релаксации в момент времени t_i ; E_0, E_∞ – мгновенный и длительный модули упругости материала; ε – постоянная величина деформации; i – количество точек по времени.

Результаты обработки для материала песчано-полимерной смеси в виде кривых релаксации $R(t)$ при различных температурах представлены на рисунке 2.7.

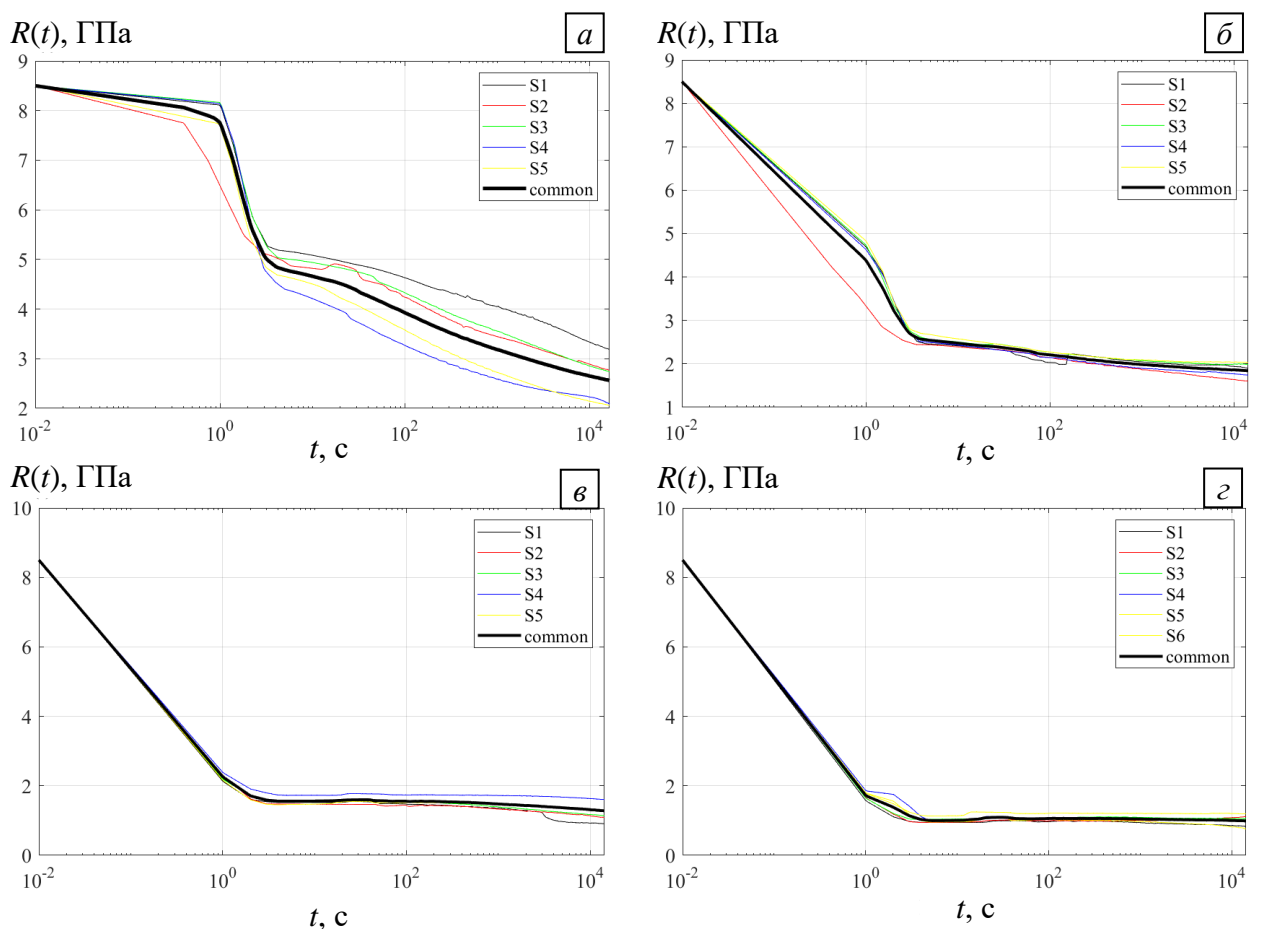


Рисунок 2.7 – Функции релаксации песчано-полимерной смеси при температурах:
 а – 22 °C; б – 70 °C; в – 110 °C; з – 150 °C

Далее для полученных кривых относительно базовой температуры 22 °С вычисляются коэффициенты температурно-временного сдвига и пересчитываются данные в приведенное время t' . Полученные средние функции релаксаций, построенные в единой временной шкале, представлены на рисунке 2.8, *а*. Затем строится обобщенная кривая релаксации материала по следующему принципу:

$$R_c(t) = \begin{cases} R_{T_1}(t_i), t_{T_1} \leq t_{T_2} \\ R_{T_2}(t_i), t_{T_2} \leq t_{T_3} \\ R_{T_3}(t_i), t_{T_3} \leq t_{T_4} \\ R_{T_4}(t_i) \end{cases}, \quad (21)$$

где, $t_{T_{1-4}}$ – моменты времени, при которых величина функции релаксации при текущей температуре равна величине при следующей: $R_{T_n}(t_i) = R_{T_{n+1}}(t_i)$. Полученная обобщенная кривая релаксации представлена на рисунке 2.8, *б*, построены функции релаксации при рассмотренных температурах, полученные с помощью горизонтального температурно-временного сдвига.

Для полученной обобщенной функции релаксации определены коэффициенты температурно-временного сдвига (17). Для этого была выбрана базовая температура $T_r = 295$ К, построена система (18) и получены следующие значения для констант: $C_1 = 65,8$, $C_2 = 876$ К. На рисунке 2.9, *а* представлены функции релаксации материала при температурах 22, 70, 110, 150 °С, полученные с помощью функции сдвига («об.») и действительные («эк.»).

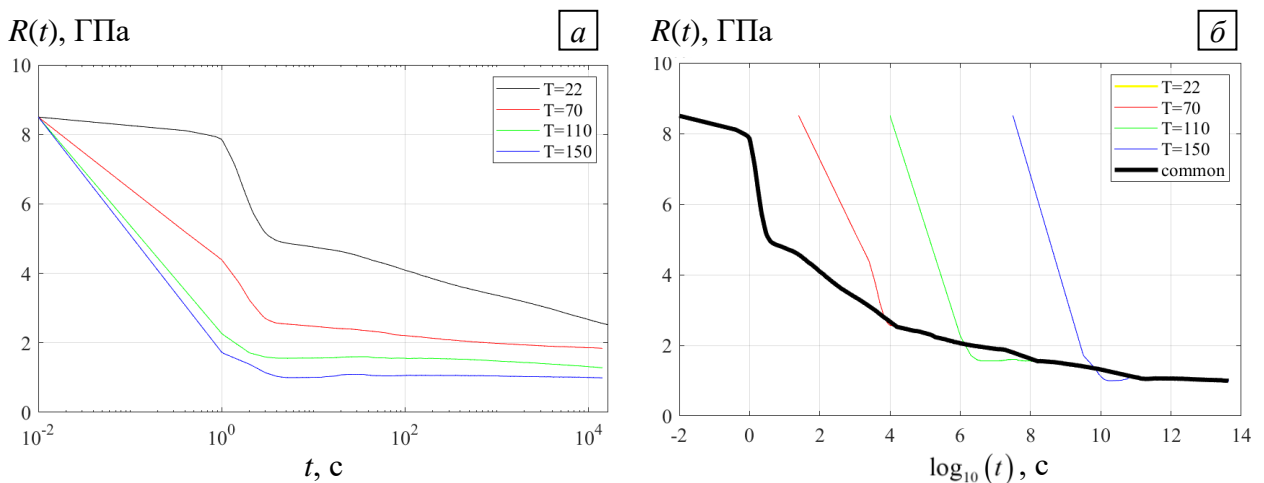


Рисунок 2.8 – Функции релаксации и обобщенная кривая песчано-полимерной смеси:
а – единая временная шкала; *б* – приведенное время

При температуре 22 °С функции идентичны, при температуре 70 °С функции идентичны с момента времени $\sim 10^{0.7}$ с, при 110 °С $\sim 10^{2.2}$ с, 150 °С $\sim 10^{1.5}$ с.

Для определения достаточного количества материальных констант для аппроксимации (16) при решении системы (19) были использованы методы нелинейного программирования. Получено, что для удовлетворения условия минимума невязки между экспериментальными и расчетными данными достаточно $N_e = 20$ констант разложения. Результат аппроксимации обобщенной функции релаксации представлен на рисунке 2.9, б.

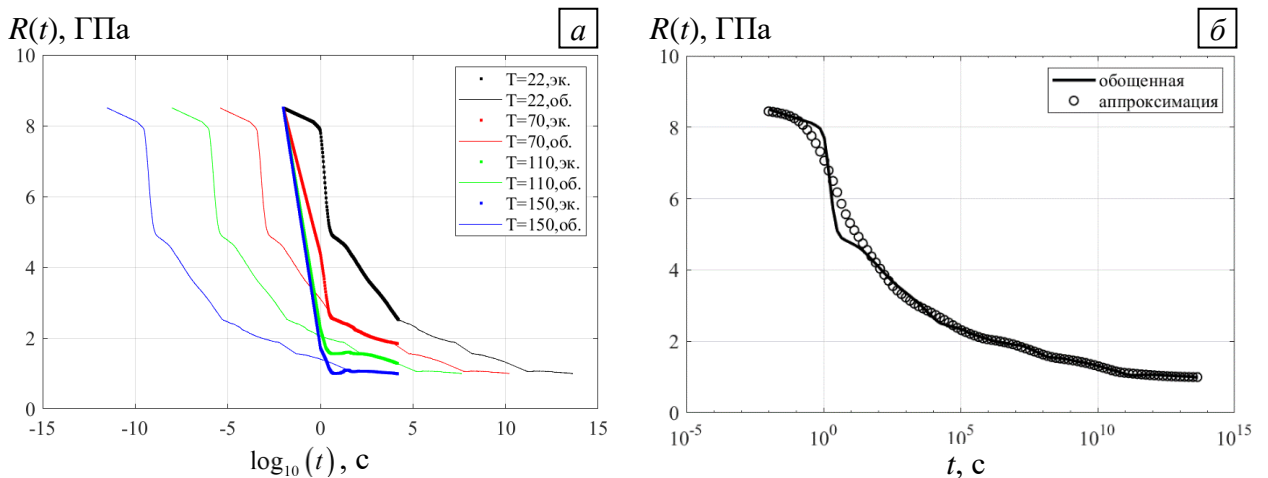
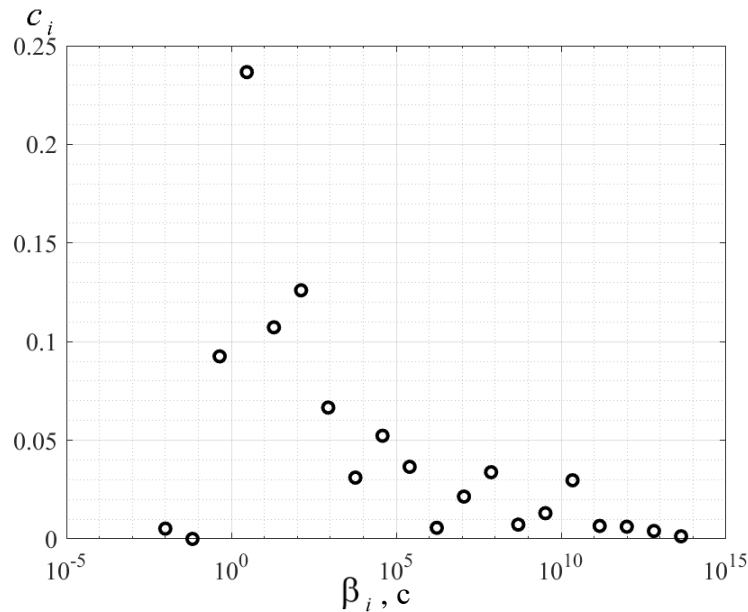


Рисунок 2.9 – Обобщенная функция релаксации песчано-полимерной смеси:
а – при различных температурах; б – аппроксимация

Значения и распределение полученных коэффициентов разложения функции релаксации песчано-полимерной смеси представлены в таблице 2.2. Для материала получены значения мгновенного модуля упругости $E_0 = 8,5$ ГПа и длительного $E_\infty = 0,992$ ГПа.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов аппроксимации функции $R(t)$ для ППС

i	β_i	c_i	i	β_i	c_i
1	1.0000E-02	5.2051E-03	11	1.6967E+06	5.6394E-03
2	6.6521E-02	1.7096E-06	12	1.1287E+07	2.1466E-02
3	4.4251E-01	9.2538E-02	13	7.5081E+07	3.3812E-02
4	2.9436E+00	2.3663E-01	14	4.9945E+08	7.2477E-03
5	1.9581E+01	1.0725E-01	15	3.3224E+09	1.3033E-02
6	1.3026E+02	1.2601E-01	16	2.2101E+10	2.9735E-02
7	8.6650E+02	6.6580E-02	17	1.4702E+11	6.5812E-03
8	5.7640E+03	3.1081E-02	18	9.7800E+11	6.1872E-03
9	3.8343E+04	5.2300E-02	19	6.5058E+12	4.0132E-03
10	2.5506E+05	3.6561E-02	20	4.3277E+13	1.3420E-03

Распределение коэффициентов аппроксимации $R(t)$ 

В результате обработки экспериментальных данных на релаксацию в области сжатия образцов песчано-полимерной смеси получены коэффициенты разложения функции релаксации в виде аппроксимации (8) и константы для модели температурно-временного сдвига по формуле (17). Таким образом, построена модель для описания термовязкоупругого поведения материала, которую можно использовать для дальнейшего анализа поведения конструкции.

2.4. Обработка результатов испытаний образцов отвержденной смолы

Аналогично методике, описанной в разделе 2.3, проведена обработка результатов испытаний образцов отвержденной эпоксидной смолы на продольную релаксацию при растяжении при различных температурах. Полученные функции релаксации для образцов и осредненные кривые при рассмотренных температурах представлены на рисунке 2.10.

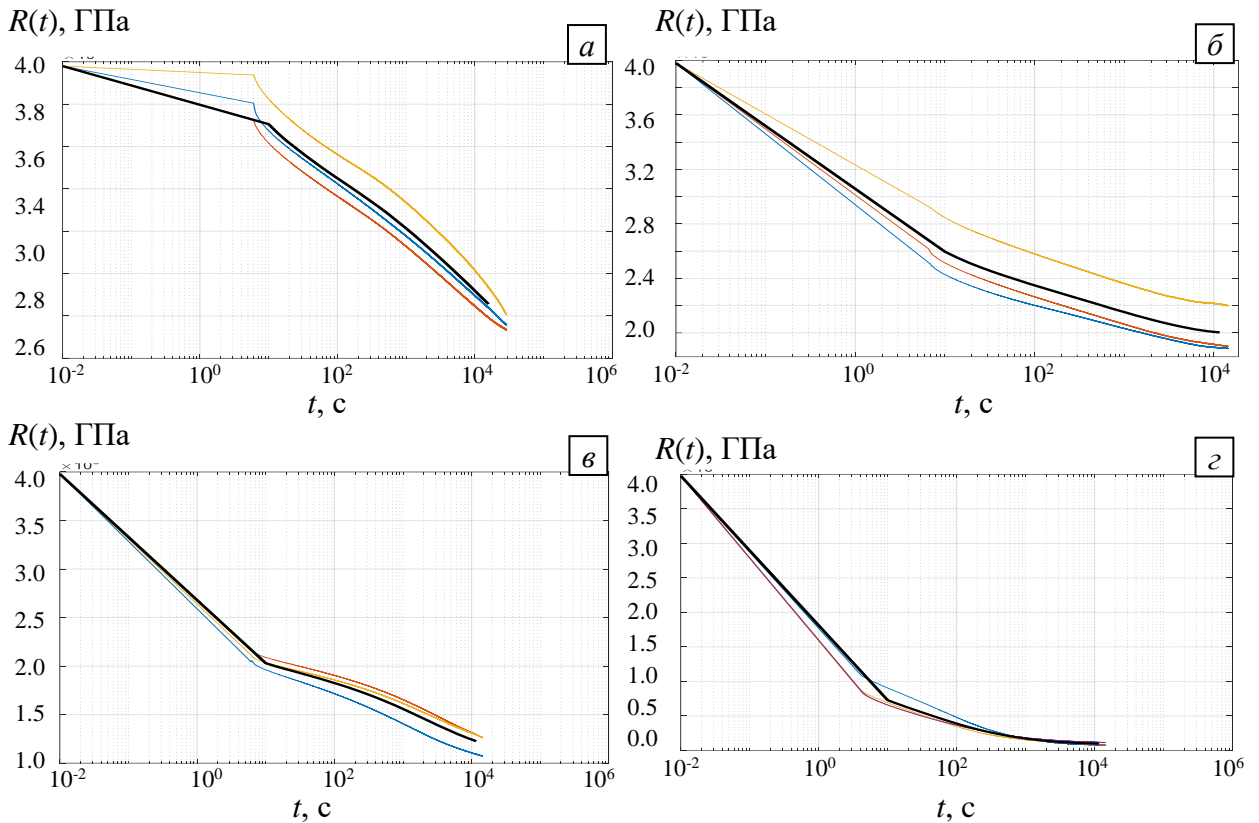


Рисунок 2.10 – Функции релаксации отвержденной смолы при температурах:
a – 22 °C; *б* – 70 °C; *в* – 110 °C; *г* – 150 °C

На рисунке 2.11, *a* представлены сведенные в общую диаграмму осредненные кривые функций релаксации при рассмотренных температурах. На рисунке 2.11, *б* приведены осредненные кривые функции релаксации, полученные посредством горизонтального температурно-временного сдвига.

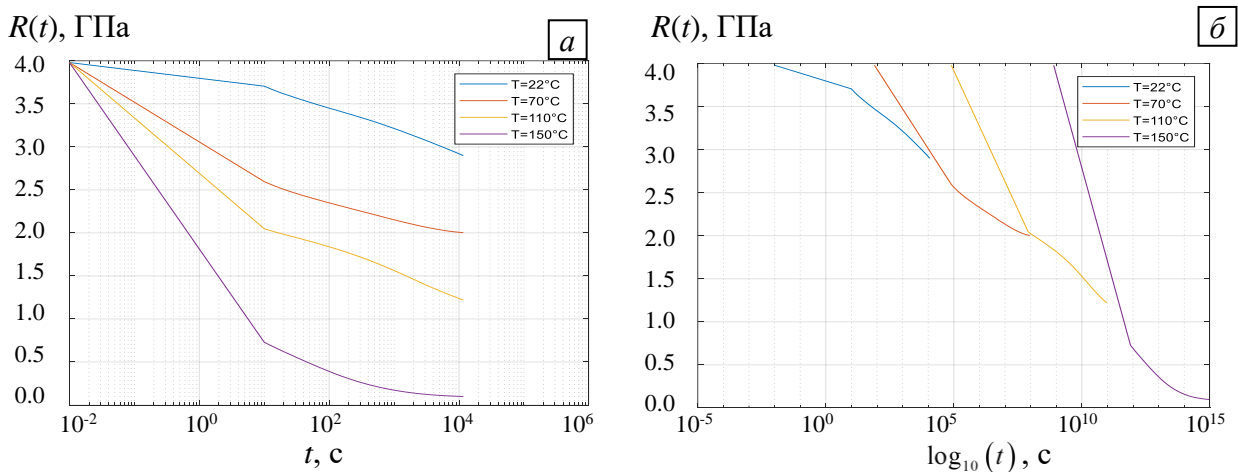


Рисунок 2.11 – Функции релаксации и обобщенная кривая песчано-полимерной смеси:
a – единая временная шкала; *б* – приведенное время

Полученная обобщенная кривая функции релаксации для материала представлена на рисунке 2.12, *a*. При решении системы (19) методами нелинейного

программирования получено, что для удовлетворения условия минимума невязки между экспериментальными и расчетными данными достаточно $N_e = 14$ констант разложения. Результат аппроксимации обобщенной функции релаксации представлен на рисунке 2.12, б, максимальная относительная невязка меньше 1 %.

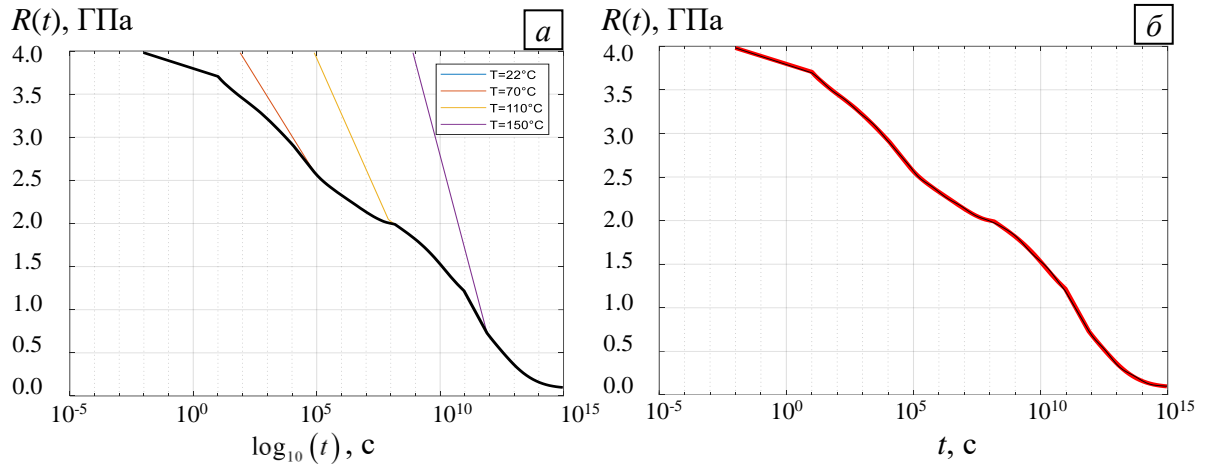


Рисунок 2.12 – Обобщенная функция релаксации эпоксидной смолы:
а – при различных температурах; б – аппроксимация

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие значения материальных констант модели (16)–(17) для $N_e = 14$: модули $E_0 = 3,98$ ГПа, $E_\infty = 0,09$ ГПа, коэффициенты модели температурно-временного сдвига $T_b = 295$ К, $C_1 = -45,7729$, $C_2 = -662$ 62 К. Распределение весовых коэффициентов c_i по временам релаксации β_i представлено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения коэффициентов аппроксимации $R(t)$ для связующего

i	β_i	c_i	i	β_i	c_i
1	1.82903E+00	0.04682071	8	1.513561E+08	0.02498173
2	2.47362E+01	0.07001326	9	2.046968E+09	0.07939261
3	3.34537E+02	0.06268369	10	2.768357E+10	0.08080376
4	4.52434E+03	0.08099650	11	3.743978E+11	0.15132289
5	6.11881E+04	0.10874965	12	5.063425E+12	0.10021628
6	8.27518E+05	0.05859419	13	6.847870E+13	0.05127350
7	1.119151E+07	0.05480672	14	9.261187E+14	0.00702798

2.5. Обработка результатов испытаний образцов пластика

На рисунке 2.13 представлены полученные на основе экспериментальных данных функции релаксации для образцов однонаправленного пластика при нормальной и повышенных температурах. Осредненные зависимости при каждой температуре обозначены 'common'.

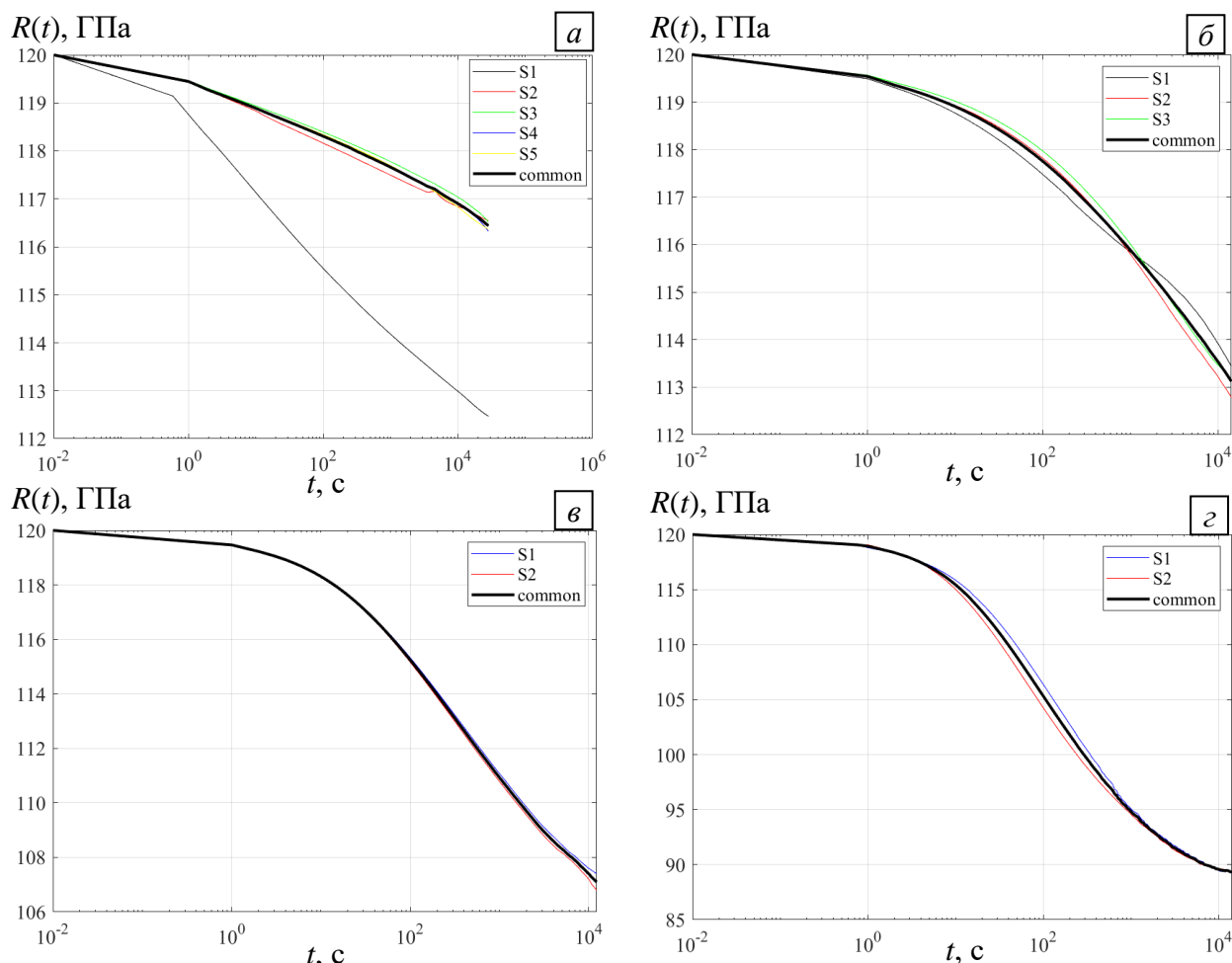


Рисунок 2.13 – Функции релаксации однонаправленного органопластика при температурах: а – 22 °С; б – 70 °С; в – 110 °С; г – 150 °С

На рисунке 2.14, а изображены сведенные в общую диаграмму осредненные кривые функций релаксации при рассмотренных температурах. Функции релаксаций, получаемые в результате температурно-временного сдвига, и обобщенная кривая релаксации материала представлены на рисунке 2.14, б.

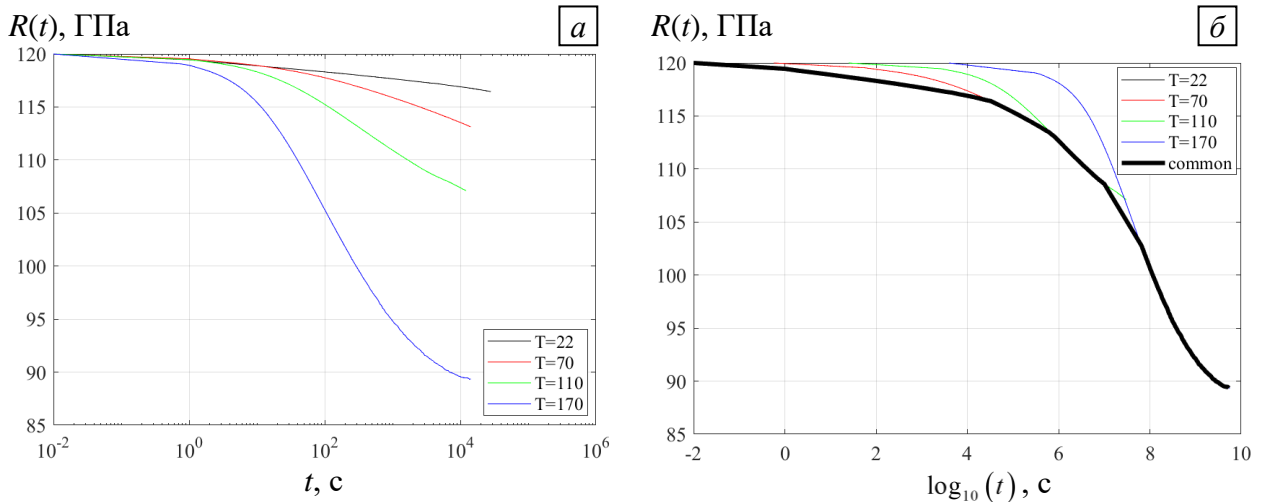


Рисунок 2.14 – Функции релаксации и обобщенная кривая органопластика:
a – единая временная шкала; *б* – обобщенное время

На рисунке 2.15, *a* показаны совмещения обобщенной кривой релаксации с помощью ТВС с исходными функциями. На рисунке 2.15, *б* показаны экспериментальная и расчетная обобщенная функции релаксации. Максимальная относительная невязка не превышает 1 %.

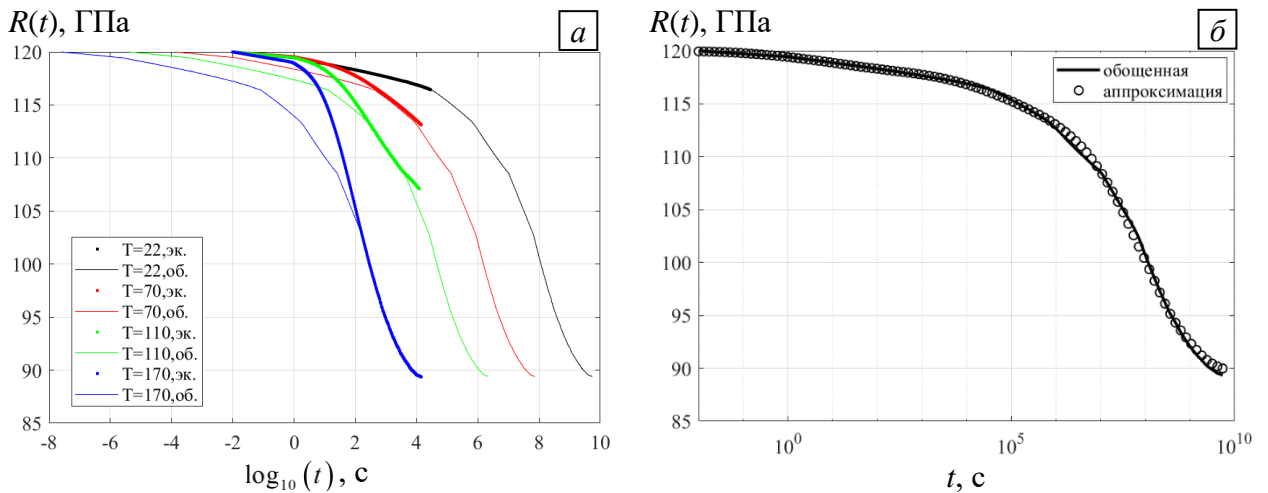
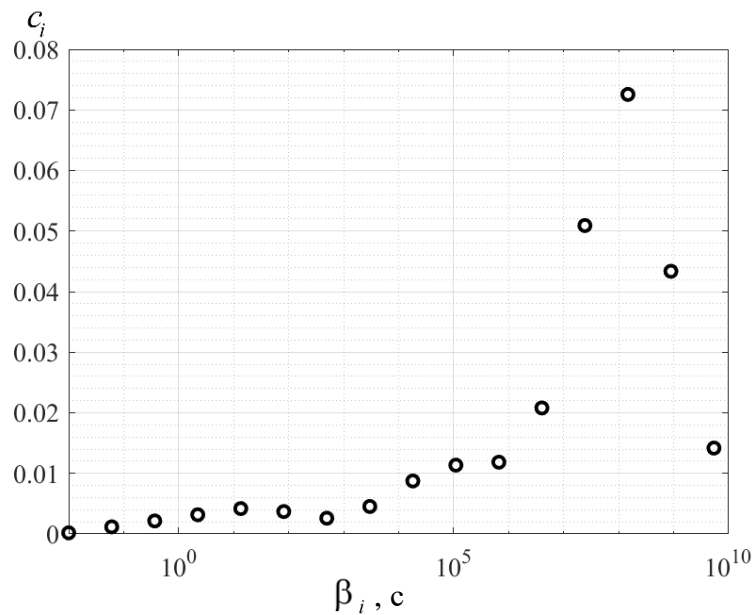


Рисунок 2.15 – Обобщенная функция релаксации органопластика:
a – при различных температурах; *б* – аппроксимация

В результате обработки полученных экспериментальных данных методами нелинейного программирования были вычислены следующие значения материальных констант модели (16)–(17) для $N_e = 16$, удовлетворяющие условию минимума невязки между экспериментальными и расчетными данными: модули $E_0 = 120$ ГПа, $E_\infty = 89,3$ ГПа, коэффициенты модели ТВС $T_b = 295$ К, $C_1 = 109,8$, $C_2 = 2755$ К. Распределение весовых коэффициентов c_i по временам релаксации β_i представлено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов аппроксимации функции $R(t)$

i	β_i	c_i	i	β_i	c_i
1	1.0000E-02	1.8309E-04	9	1.8068E+04	8.7435E-03
2	6.0550E-02	1.1674E-03	10	1.0940E+05	1.1358E-02
3	3.6663E-01	2.1518E-03	11	6.6243E+05	1.1847E-02
4	2.2199E+00	3.1666E-03	12	4.0110E+06	2.0799E-02
5	1.3442E+01	4.1866E-03	13	2.4287E+07	5.0911E-02
6	8.1390E+01	3.6953E-03	14	1.4706E+08	7.2551E-02
7	4.9282E+02	2.5996E-03	15	8.9043E+08	4.3361E-02
8	2.9840E+03	4.5349E-03	16	5.3915E+09	1.4171E-02

Распределение коэффициентов аппроксимации $R(t)$ 

Выводы по главе

В данной главе 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 вязкоупругих свойств рассмотренных материалов. Получены обобщенные функции релаксации и вычислены параметры аппроксимаций для песчано-полимерной смеси, эпоксидной смолы и однонаправленного органопластика.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ОБОЛОЧКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПРАВКИ

При исследовании механического поведения рассматриваемой в работе конструкции необходимо учитывать поведение слоистой полимерной оболочки. На данный момент в прикладной механике общепринятым подходом к описанию поведения композиционных материалов является переход к гомогенизированному представлению материала, механическое поведение которого описывается с помощью эффективных характеристик. Данный подход широко применяется при решении стационарных задач в рамках линейной теории упругости. При определении эффективных характеристик ортотропных слоистых композитов удобно воспользоваться многоуровневым подходом, реализованным с помощью конечно-элементного моделирования. В данной главе описано применение этих подходов к прогнозированию термовязкоупругого поведения слоистого композиционного материала.

Силовая оболочка, рассматриваемая в рамках данной работы, представляет собой многослойную намоточную конструкцию, схема которой представлена на рисунке 3.1.

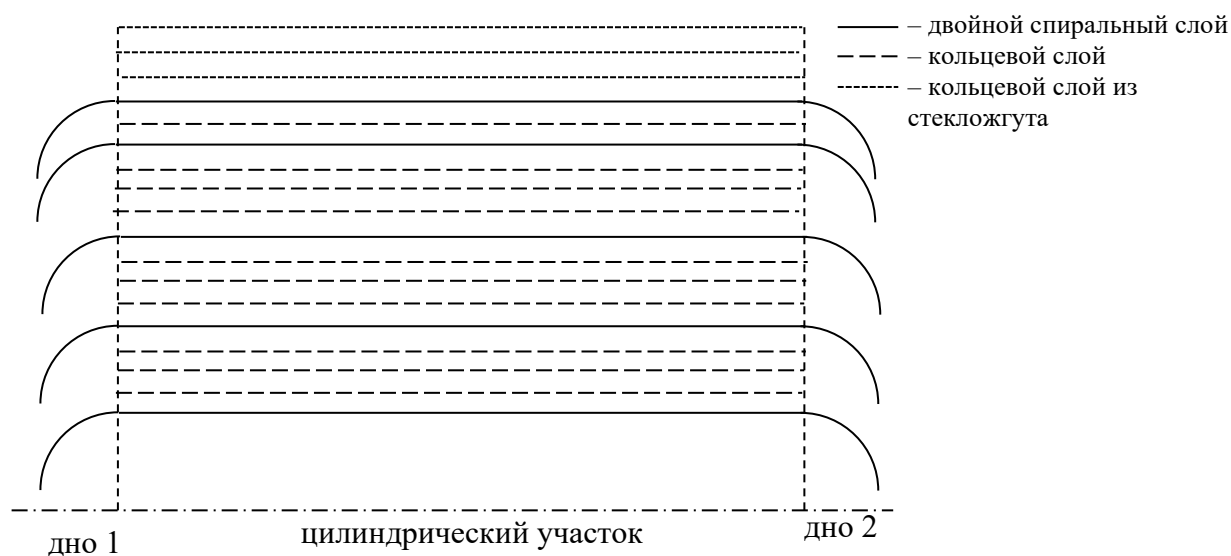


Рисунок 3.1 – Условная схема армирования оболочки

По длине оболочки формируется две зоны с разными схемами армирования. На цилиндрической части формируется пакет постоянной толщины из 18 слоев

материала – 13 кольцевых и 5 спиральных. На донных участках пакет состоит из 5 спиральных слоев, переменных по толщине, в силу действия принципов сохранения объема укладываемого материала.

3.1. Описание поведения представительного объема конструкции в процессе намотки оболочки

Первым этапом производства крупногабаритных намоточных оболочек является процесс укладки армирующих лент на формообразующую оправку. Данный этап происходит при постоянной температуре на протяжении нескольких суток. В процессе укладки армирующие ленты пропитываются связующей матрицей, затем укладываются по заданной траектории с предварительным натягом, или начальным усилием в ленте. В результате методом полюсной намотки спиральных слоев формируется перекрестная армированная структура материала, где каждый слой представляет собой переплетение лент, уложенных под углом $\pm \alpha$. Согласно широко применяемым принципам, получаемую структуру можно представить в виде двух спиральных слоев с противоположными углами армирования [16].

При отыскании напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе намотки удобно воспользоваться данным принципом и рассматривать формируемую оболочку как набор отдельных однонаправленных слоев с постоянным углом армирования. Для учета угла армирования в конечно-элементном аналоге в каждом слое вводится локальная система координат (ЛСК), в которой задаются характеристики однонаправленного пластика. Иллюстрация данного представления и расположение локальных систем координат однонаправленных монослоев относительно системы координат (СК) пакета показана на рисунке 3.2. Данный подход был отражен в работах [63, 94] по механике композиционных материалов и успешно применяется сегодня. Таким образом, в конечно-элементной реализации на цилиндрическом участке будут рассматриваться 23 слоя однонаправленного пластика, на донных участках 10 слоев с переменным углом армирования.

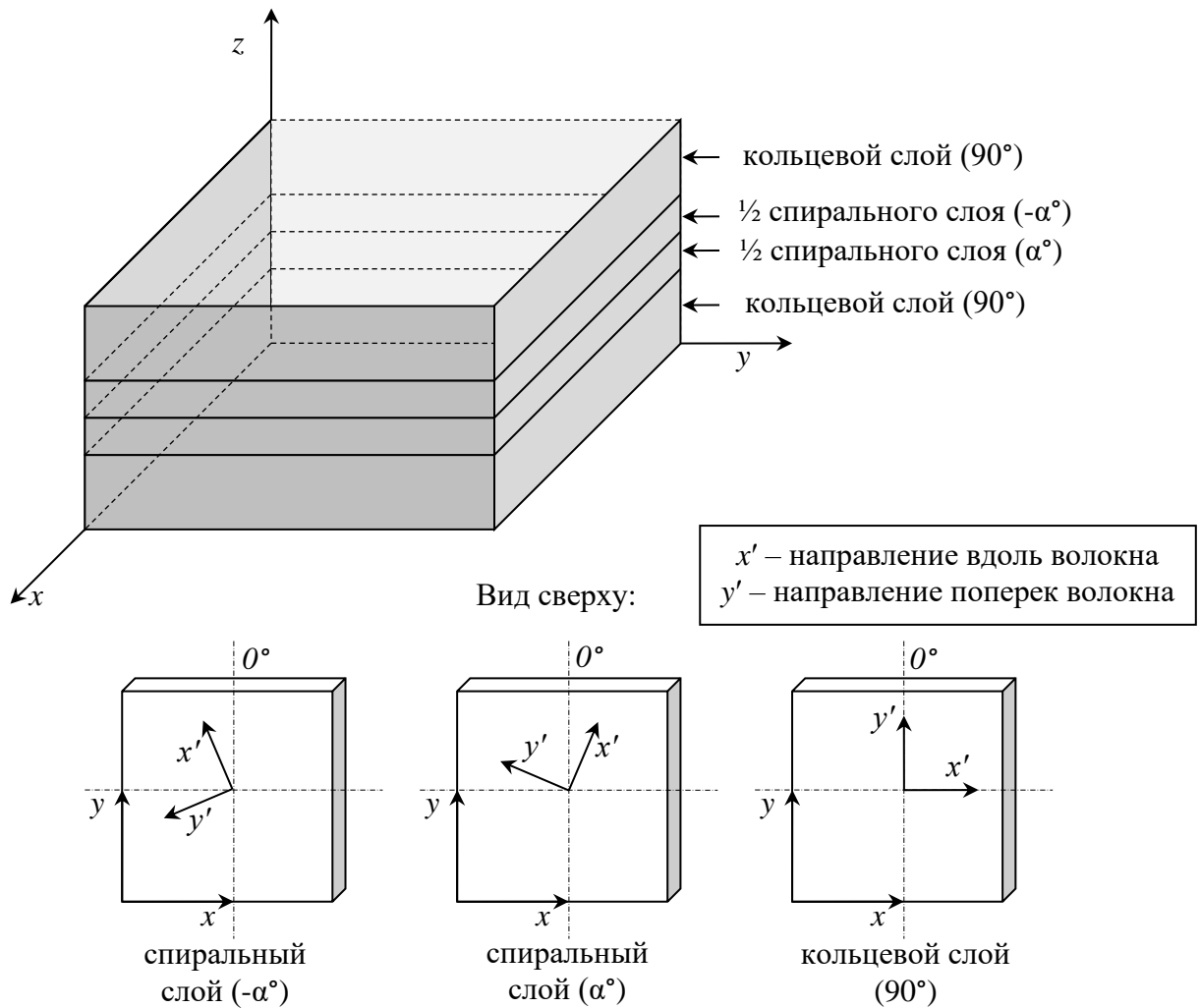


Рисунок 3.2 – Иллюстрация расположения ЛСК монослоев относительно СК пакета

Задача отыскания эволюции НДС конструкции в процессе намотки предполагает постепенное наращивание толщины оболочки с учетом начальных напряжений в каждом слое, возникающих от усилия натяжения лент. В пакете инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL данный процесс возможно смоделировать 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, которое можно определить по соотношению $\sigma_0 = \frac{F_0}{b_l h}$, где

F_0 – сила натяжения ленты; b_l – ширина ленты; h – толщина ленты.

Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе укладки слоев оболочки была рассмотрена тестовая задача в виде

сегмента цилиндрического участка для определения возможных путей упрощения конечно-элементного аналога всей системы «оправка – оболочка». Решалась квазистатическая задача в упругой постановке.

Общая постановка краевой задачи теории для тела, занимающего область $V \equiv V^a \cup V^b \cup V^c$ с границей S , где V^a – область, принадлежащая оправке; V^b – область, принадлежащая ТЗП; V^c – область, принадлежащая оболочке, состоит из следующих соотношений для $t > 0$ [52]:

уравнения равновесия

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}(\mathbf{X}, t) = 0, \quad \mathbf{X} \in V, \quad (22)$$

геометрические соотношения теории малых деформаций

$$2\hat{\varepsilon}(\mathbf{X}, t) = \nabla u(\mathbf{X}, t) + (\nabla u(\mathbf{X}, t))^T, \quad \mathbf{X} \in V, \quad (23)$$

граничные условия

$$u(\mathbf{X}, t) = U(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in S_u, \quad (24)$$

начальные условия

$$\hat{\sigma}(\mathbf{X}, 0) = \hat{\sigma}_0(\mathbf{X}, 0), \quad \mathbf{X} \in V_c, \quad (25)$$

определяющие соотношения

$$\hat{\sigma}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{C}^T \hat{\varepsilon}(\mathbf{X}, t), \quad \mathbf{X} \in V, \quad (26)$$

где в соотношениях (22)–(26): $\hat{\sigma}$, $\hat{\varepsilon}$ – тензоры напряжений и деформаций с компонентами σ_{ij} и ε_{ij} соответственно; \mathbf{C} – тензор механических материальных констант; $u(\mathbf{X}, t)$ – вектор перемещений с компонентами u_i ; \mathbf{X} – радиус-вектор произвольной точки тела, имеющий компоненты x_i ; $U(\mathbf{X}, t)$ – заданный на части S_u границы S вектор перемещений с компонентами U_i .

Реализовано две модели представления оболочки – полная послойная (рисунок 3.3, а) и однородное с эффективными характеристиками (рисунок 3.3, б). Эффективные упругие характеристики и осредненные начальные напряжения для оболочки определялись с помощью серии вычислительных экспериментов для представительного объема.

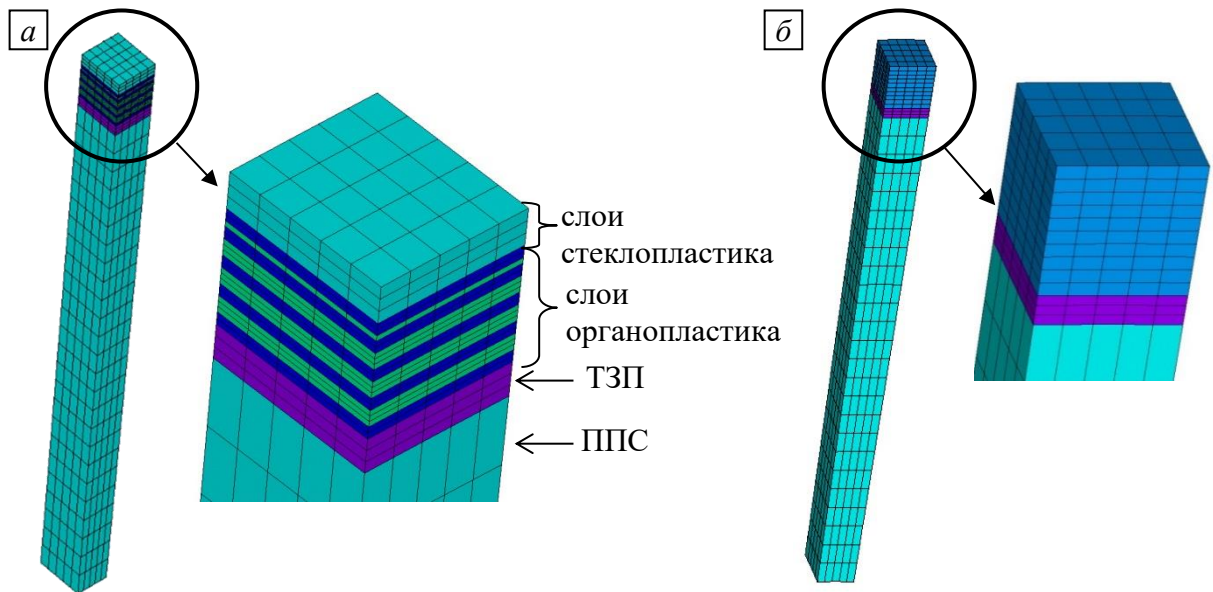


Рисунок 3.3 – КЭ-модели тестовых задач:

a – послойное представление оболочки; *б* – оболочка с эффективными характеристиками

Для корректного описания поведения представительного объема конструкции применен специальный набор граничных и периодических граничных условий. На рисунке 3.4, *a* представлены обозначения поверхностей и линий для определения граничных условий в цилиндрической системе координат. На рисунке 3.4, *б* представлена локальная система координат слоев оболочки, в которой определяются ортотропные свойства материалов.

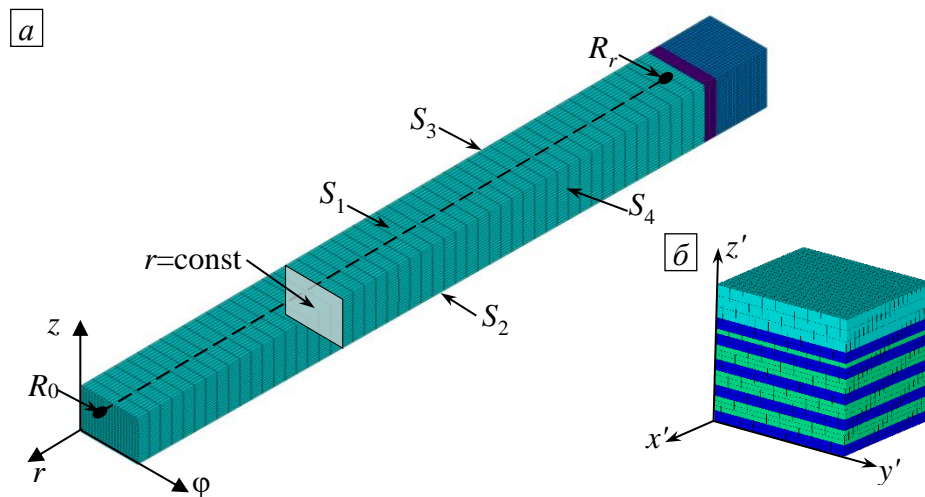


Рисунок 3.4 – Представительный объем и принятые системы координат:

a – сегмент системы «оправка – оболочка»; *б* – сегмент оболочки

На рисунке S_1, S_2, S_3, S_4 – левая, правая, передняя, задняя грани сегмента соответственно; r – плоскость с постоянным радиусом; R_0-R_r – линия с постоянными координатами z и φ ; x', y', z' – локальная система координат в слоях

оболочки. Система граничных условий (23) при этом дополняется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} u_\varphi(r_i, \varphi, z) &= u_\varphi(r_j, \varphi, z), \forall r_i, r_j \in [R_0, R_r], & u_\varphi(r, \varphi_i, z) &= 0, \forall \varphi_i \in S_1, \\ u_z(r_i, \varphi, z) &= u_z(r_j, \varphi, z), \forall r_i, r_j \in [R_0, R_r], & u_\varphi(r, \varphi_i, z) &= u_\varphi(r, \varphi_j, z), \forall \varphi_i, \varphi_j \in S_2, \\ u_r(r, \varphi_i, z_i) &= u_r(r, \varphi_i, z_i), \forall r = \text{const}, & u_z(r, \varphi, z_i) &= 0, \forall z_i \in S_3, \\ & & u_z(r, \varphi, z_i) &= u_z(r, \varphi, z_j), \forall z_i, z_j \in S_4. \end{aligned} \quad (27)$$

Для обеспечения совместности деформирования конструкции из различных материалов рассмотрен случай «идеального» контакта на границах сред:

$$u(\mathbf{X}_i, t) = u(\mathbf{X}_j, t), \mathbf{X}_{i,j} \in S_{i,j}, \quad (28)$$

где $S_{i,j}$ – поверхности контакта между i и j материалом.

Для имитации последовательной укладки каждого слоя применена технология «оживления» элементов. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.5.

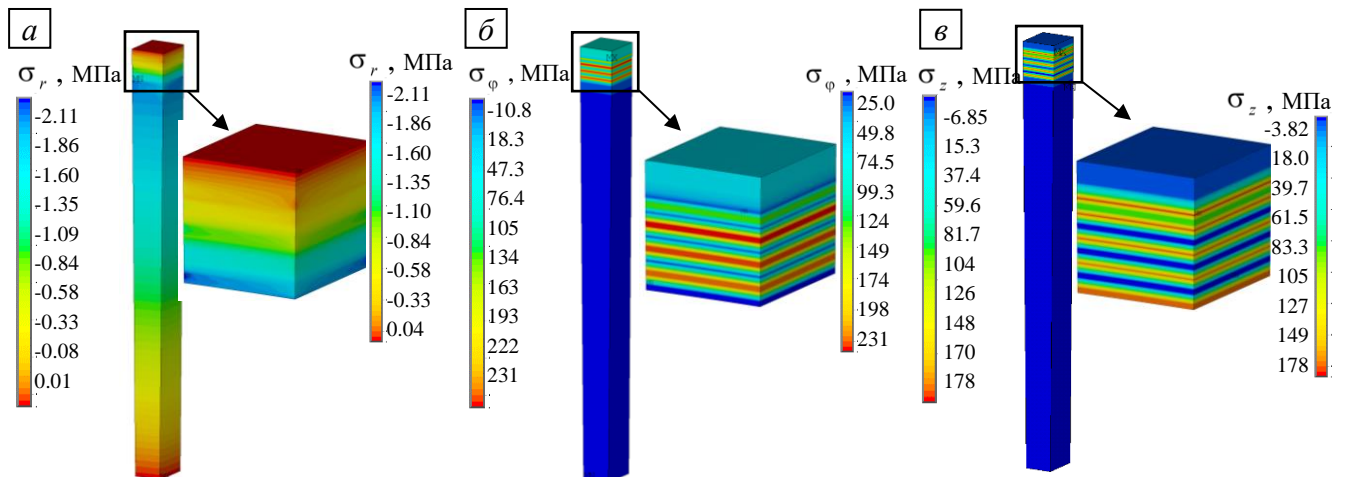


Рисунок 3.5 Распределение главных напряжений в конструкции и оболочке после 10 суток намотки и суточной выдержки

Радиальные напряжения (рисунок 3.5, а) на свободных поверхностях стремятся к нулевому значению, на границе с оправкой достигают значения $-2,11$ МПа, что соответствует сжатию поверхности под действием начальных усилий в армирующих лентах. Распределение окружных и осевых напряжений (рисунок 3.5, б, в) соответствует распределению начальных усилий в слоях оболочки. Распределение главных напряжений в оправке и оболочке однородно, не наблюдается зон локальных экстремумов, соответствует механике рассматриваемого процесса, что подтверждает корректность сформулированной

задачи механики деформируемого твердого тела и дополнительных периодических граничных условий, реализованных для тестовой модели.

В результате решения задачи построена зависимость радиальных напряжений по толщине оболочки (рисунок 3.6, *а* – красная линия) после 10 суток намотки и суточной выдержки. Для экономии вычислительных ресурсов исследована возможность поэтапного «оживления» слоев и одномоментного «оживления». Результаты поэтапного «оживления» за 10, 5, 2 и 1 шаг представлены на рисунке 3.6, *б*.

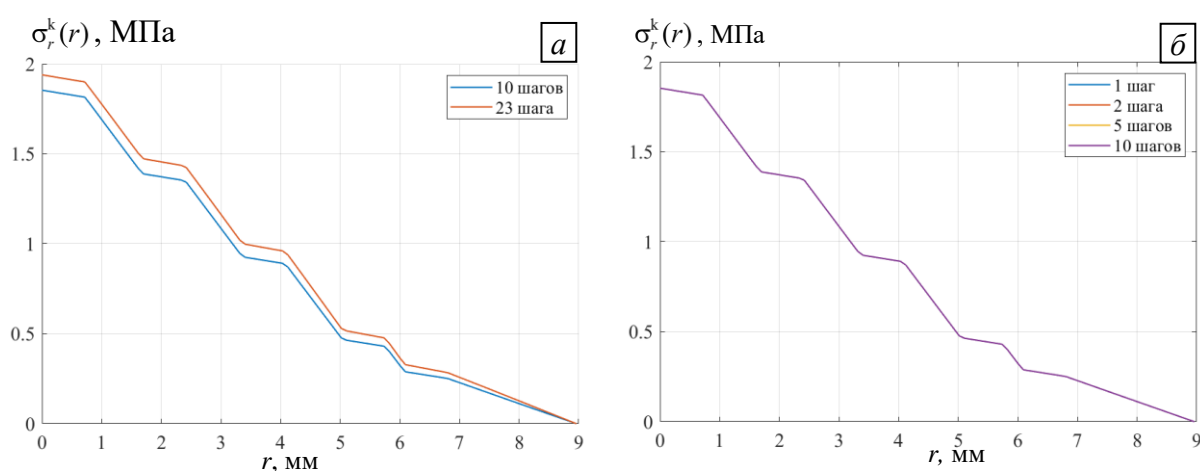


Рисунок 3.6 – Распределение радиальных напряжений:

а – послойное оживление за 23 и 10 шагов; *б* – послойное оживление за 1, 2, 5, 10 шагов

Получено, что при поэтапном оживлении зависимости радиальных напряжений по толщине оболочки идентичны, но максимальное значение на внутреннем радиусе оболочки ниже эталонного на 4,39 %. Для оценки влияния поэтапного «оживления» на НДС формообразующей оправки построены зависимости радиальных напряжений на поверхности оправки от времени намотки. Полученные результаты представлены на рисунке 3.7.

Установлено, что поэтапное «оживление» влияет на изменение напряжений на поверхности оправки от времени, при этом число этапов возрастания значений соответствует количеству шагов, за которое было осуществлено наращивание толщины оболочки. К концу процесса намотки значения напряжений на поверхности оправки при поэтапном наращивании идентичны и ниже эталонного на 4,18 %.

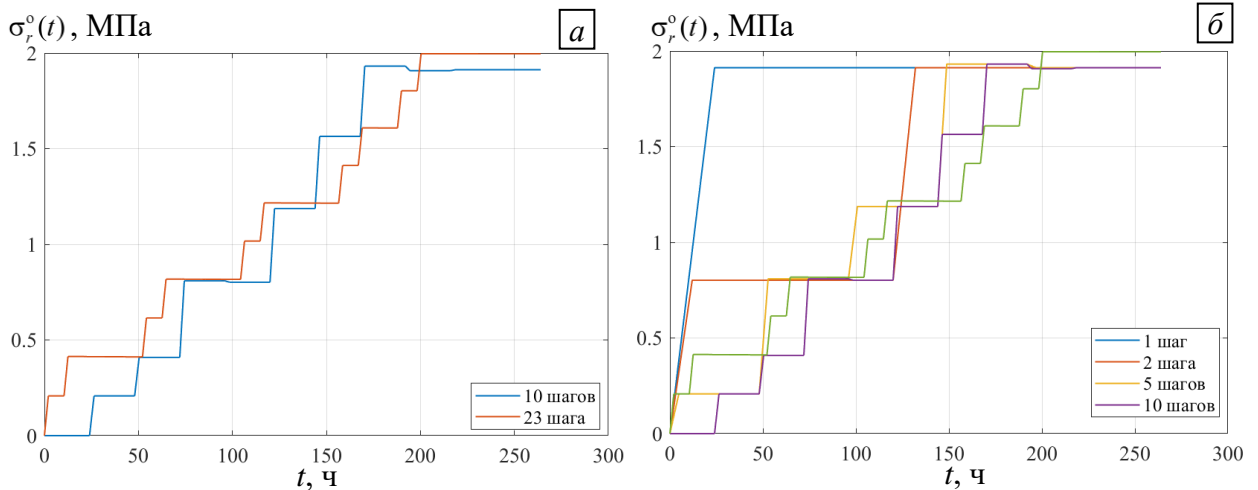


Рисунок 3.7 – Зависимость радиального напряжения на поверхности оправки:
 а – послойное оживление за 23 и 10 шагов; б – послойное оживление за 1, 2, 5, 10 шагов

На основе полученных результатов сделан вывод, что при вводе соответствующего корректирующего коэффициента начального натяжения можно наращивать толщину оболочки за один шаг.

Далее был проведен анализ зависимостей радиальных напряжений по толщине оболочки и динамики изменения напряжений на поверхности оправки для случая 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 3.8.

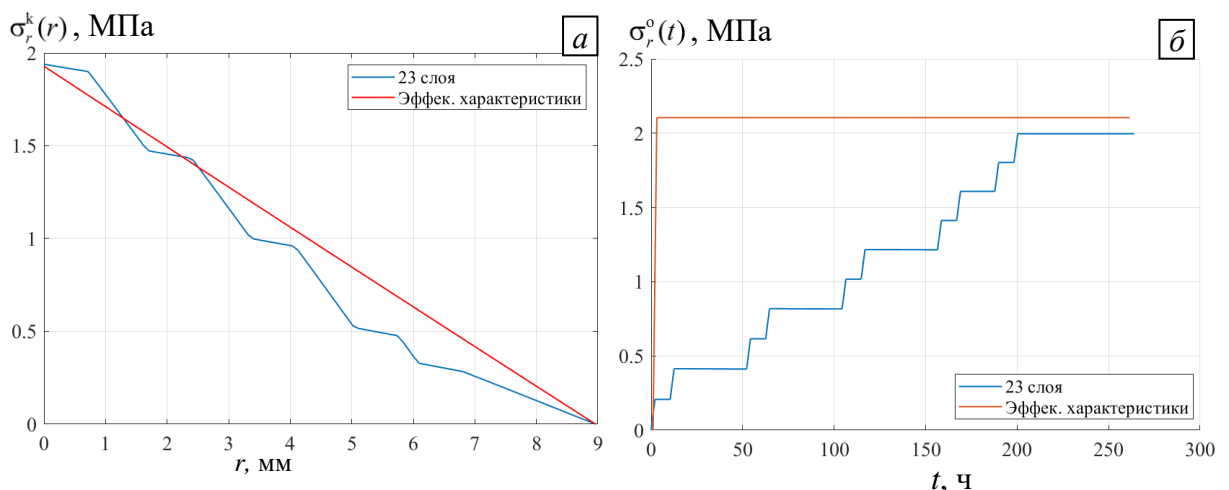


Рисунок 3.8 – Распределение радиальных напряжений в оболочке (а) и на поверхности оправки (б) для послойного представления (синяя линия) и с распределенными эффективными характеристиками (красная линия)

Полученная для однородного представления оболочки линейная зависимость радиальных напряжений по толщине является корректной, при этом максимальное

и минимальные значения полностью совпадают с эталонным представлением оболочки. Величина радиальных напряжений на поверхности оправки при этом получена на 5,44 % выше. 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.

3.2. Прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик многослойного материала оболочки

Для прогнозирования эффективных термовязкоупругих характеристик наматываемой оболочки использован метод многоуровневого моделирования. На первом уровне рассмотрена ячейка периодичности однонаправленного пластика для определения полного набора характеристик, описывающих его поведение как трансверсально-изотропного. На втором уровне рассмотрен представительный объем слоистого материала оболочки в виде пакета, состоящего из слоев однонаправленного пластика. Общий алгоритм процесса идентификации термомеханических характеристик материала оболочки представлен на рисунке 3.9. На первом шаге алгоритма записываются данные о поведении связующего и волокна. Вторым шагом определяется полный набор характеристик однонаправленного пластика с помощью трех вычислительных экспериментов на трехмерной ячейке периодичности: исследование продольной, поперечной и сдвиговой продольной деформаций. Для определения коэффициентов линейного температурного расширения формулируется вычислительный эксперимент по вычислению температурной деформации. Третьим шагом полученные данные для однонаправленных пластиков сохраняются, при этом происходит переназначение индексов компонент: $\{\varepsilon_z \varepsilon_x \varepsilon_y\} \Rightarrow \{\varepsilon_{x'} \varepsilon_{y'} \varepsilon_{z'}\}$, где координаты x, y, z – координаты ячейки периодичности жгута (геометрические); координаты x', y', z' – координаты в элементной системе координат отдельного слоя. Четвертым шагом на представительном объеме слоистого пакета, учитывающем заданную схему

армирования, с помощью серии вычислительных экспериментов отыскиваются эффективные характеристики материала и начальные напряжения реализующихся под действием заданного усилия натяжения лент. Пятым шагом сохраняются полученные данные во внешние файлы. Шестым шагом вычисляются коэффициенты для описания термовязкоупругого поведения композита и сохраняются во внешние файлы для дальнейшего использования.

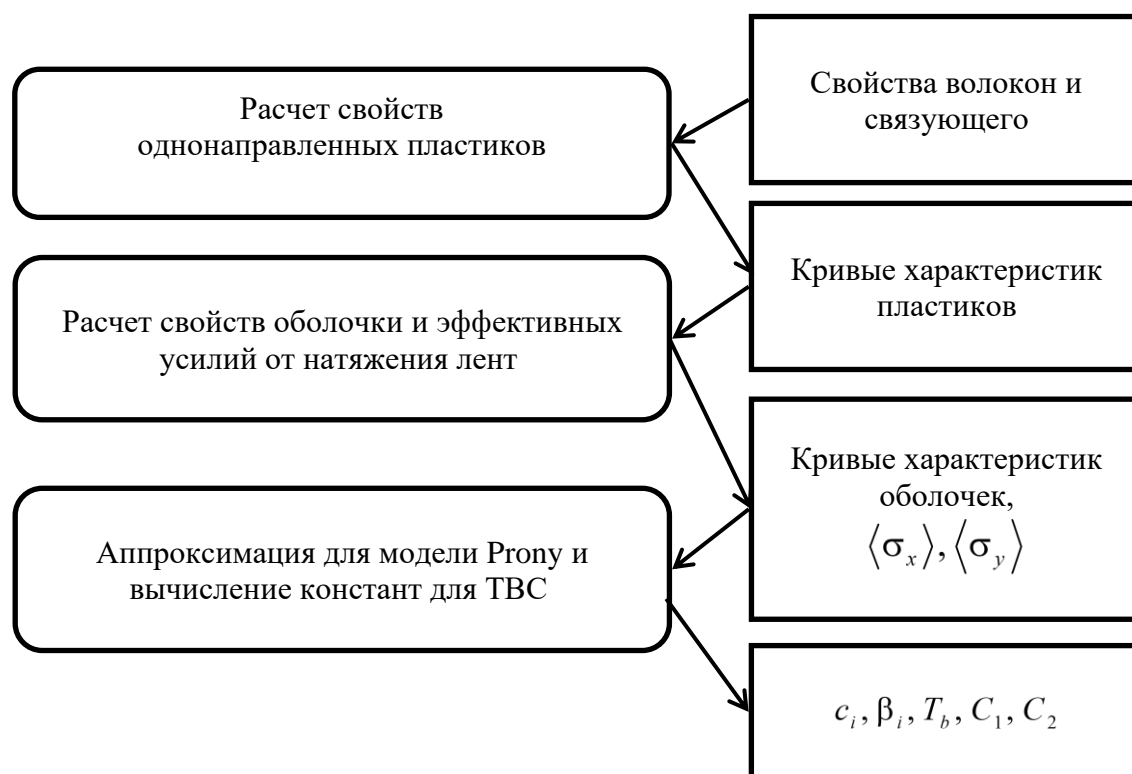


Рисунок 3.9 – Алгоритм расчета эффективных характеристик материала оболочки

В общем случае прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик для композиционной оболочки представляет собой задачу линейной вязкоупругости. Для разработки автоматизированного модуля прогнозирования термовязкоупругих характеристик на языке APDL ANSYS Mechanical удобно воспользоваться квазиупругим методом. Согласно выбранному методу, необходимо получить упругое решение для набора краевых задач по определению характеристик ячейки периодичности, затем заменить упругие характеристики вязкоупругими операторами. Алгоритм конечно-элементной реализации данного подхода в среде ANSYS Mechanical APDL представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.10.

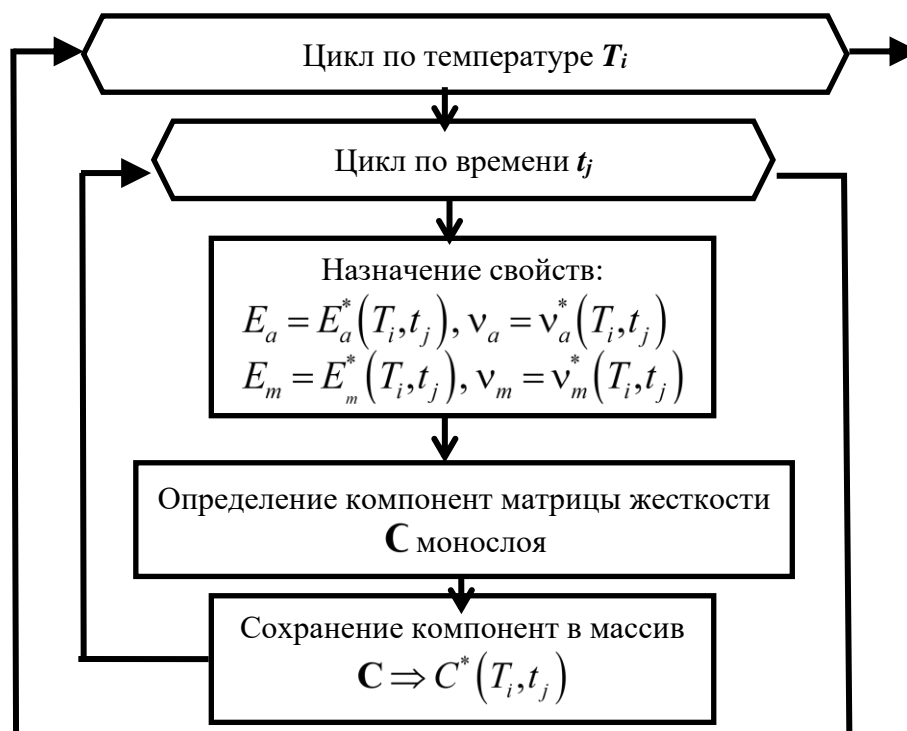


Рисунок 3.10 – Процесс расчета эффективных характеристик квазиупругим методом

Аналогичным образом можно вычислить характеристики слоистого пакета. В результате реализации предложенных алгоритмов получен автоматизированный расчетный модуль на языке APDL для прогнозирования эффективных термовязкоупругих характеристик слоистых композиционных материалов для задаваемой схемы армирования.

3.2.1. Постановка задачи для однонаправленного композита

При решении термоупругой задачи прогнозирования эффективных характеристик однонаправленно армированного композита предполагается, что волокно и связующее изотропные. Математическая постановка задачи включает в себя соотношения (21)–(26), а компоненты тензора механических характеристик \mathbf{C} принимаются постоянными для данного дискретного момента времени при рассматриваемой температуре.

Для рассматриваемого монослоя предполагается, что армирующее волокно прямолинейно, однонаправленно и представляет собой бесконечные цилиндры с равными диаметрами [73]. Укладка волокон предполагается гексагональной. Пространство между волокнами полностью заполнено связующим, характеристики которого отличны от характеристик волокон. В описанной среде выбран

бесконечно малый параллелепипед – ячейка периодичности, представленная на рисунке 3.11.

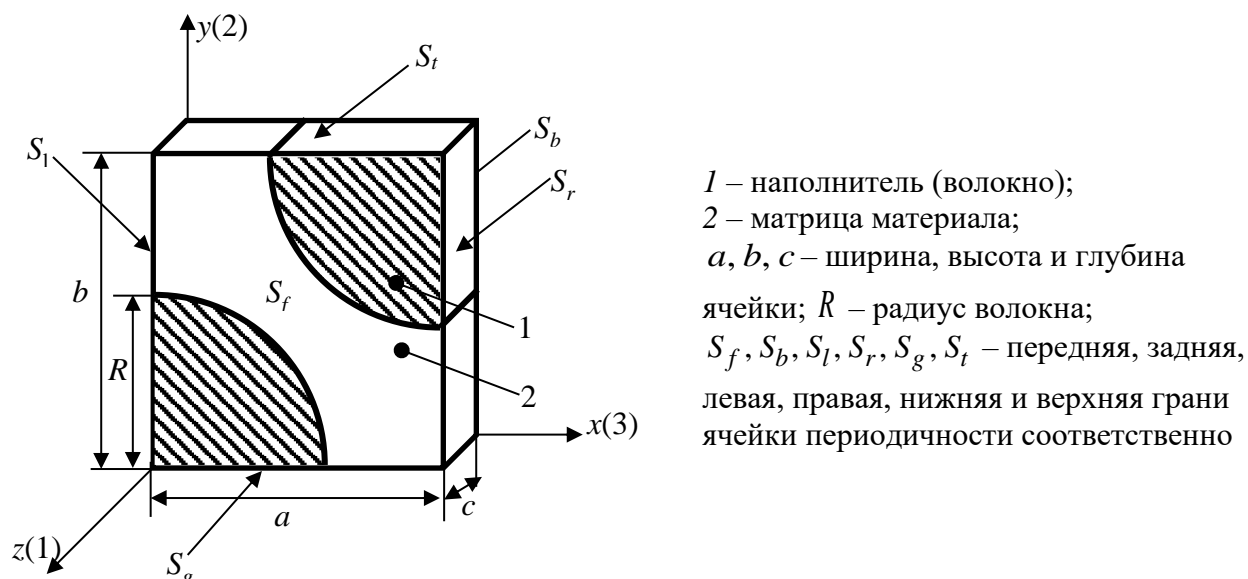


Рисунок 3.11 – Ячейка периодичности в принятой системе координат [73]

Считается, что свойства однонаправленного композита определяются относительным объёмным содержанием (или долей) волокон [94]. Относительное объёмное содержание волокна в композите выражается через параметры ячейки

$$\mu = \frac{2V^m}{V^m + 2V^a} = \frac{\pi R^2}{2ab}, \text{ где } a = \frac{b}{\sqrt{3}}.$$

Однонаправленные композиты принято считать трансверсально-изотропными материалами в плоскостях, перпендикулярных направлению армирования, и имеющими ось бесконечно большого порядка в каждой точке упругой симметрии, которая совпадает с направлением волокон. Поведение композита в таком случае описывается пятью независимыми константами: двумя модулями упругости, соответствующими направлениям вдоль и поперек волокон, двумя коэффициентами Пуассона и операторным модулем сдвига G_{12} , которые потребуется определить из (22)–(26).

Для определения пяти необходимых констант для описания поведения монослоя пластика проводятся три вычислительных эксперимента на трехмерной

ячейке периодичности. Дополнительно проводится вычислительный эксперимент для определения коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР).

Продольная деформация ячейки периодичности [146]

Для вычисления продольной деформации на границах ячейки периодичности задаются следующие группы условий:

$$\begin{array}{lll} u_1(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_b; & u_1(\mathbf{X}) = U_1^0, \mathbf{X} \in S_f; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{13}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_f; \\ u_2(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & u_2(\mathbf{X}) = U_2, \mathbf{X} \in S_i; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_i; \\ u_3(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_l; & u_3(\mathbf{X}) = U_3, \mathbf{X} \in S_r; & \sigma_{13}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_r. \end{array}$$

Величина $U_1^0 = 0,01 \cdot c$, а U_2 и U_3 – неизвестные параметры, получаемые из решения задачи.

Для описания механических свойств композита введем понятие средних напряжений и средних деформаций:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}(\mathbf{X}) dV, \quad \langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}(\mathbf{X}) dV.$$

Продольная деформация композита не изменяется и запишется следующим

образом: $\varepsilon_{11}^0 = \langle \varepsilon_{11} \rangle = \frac{U_1^0}{c}.$

Необходимые величины, которые определяются из решения задачи: осредненные продольные напряжения $\langle \sigma_{11} \rangle$ и осредненные поперечные

деформации $\langle \varepsilon_{22} \rangle = \frac{U_2}{b}, \quad \langle \varepsilon_{33} \rangle = \frac{U_3}{a}.$

При этом непосредственно из решения должно следовать

$$\langle \sigma_{22} \rangle = \langle \sigma_{33} \rangle = \langle \sigma_{12} \rangle = \langle \sigma_{13} \rangle = \langle \sigma_{23} \rangle = 0.$$

Эффективные характеристики композита, модуль E_1 и коэффициент Пуассона ν_1 , определяются из следующих соотношений:

$$E_1 = \frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{\varepsilon_{11}^0}, \quad \nu_{12} = \frac{\langle \varepsilon_{22} \rangle}{\varepsilon_{11}^0}, \quad \nu_{13} = \frac{\langle \varepsilon_{33} \rangle}{\varepsilon_{11}^0}.$$

В силу того что композит является трансверсально-изотропным материалом, должно выполняться равенство $\nu_{12} = \nu_{13}.$

Поперечная деформация ячейки периодичности

Для вычисления поперечной деформации на границах ячейки периодичности задаются следующие группы условий:

$$\begin{array}{lll} u_1(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_b; & u_1(\mathbf{X}) = U_1, \mathbf{X} \in S_f; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{13}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_f; \\ u_2(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & u_2(\mathbf{X}) = U_2^0, \mathbf{X} \in S_t; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_t; \\ u_3(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_l; & u_3(\mathbf{X}) = U_3, \mathbf{X} \in S_r; & \sigma_{13}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_r. \end{array}$$

Величина $U_2^0 = 0,01 \cdot c$ задается, а U_1 и U_3 – неизвестные параметры, получаемые из решения задачи. Поперечная деформация композита является постоянной величиной и запишется следующим образом: $\varepsilon_{22}^0 = \langle \varepsilon_{22} \rangle = \frac{U_2^0}{b}$.

Необходимые величины, которые определяются из решения задачи: осредненные поперечные нормальные напряжения $\langle \sigma_{22} \rangle$ и осредненные деформации $\langle \varepsilon_{11} \rangle = \frac{U_1}{c}$, $\langle \varepsilon_{33} \rangle = \frac{U_3}{a}$.

При этом непосредственно из решения должно следовать

$$\langle \sigma_{11} \rangle = \langle \sigma_{33} \rangle = \langle \sigma_{12} \rangle = \langle \sigma_{13} \rangle = \langle \sigma_{23} \rangle = 0.$$

Эффективные характеристики композита, модуль E_2 и коэффициент Пуассона ν_{23} , определяются из следующих соотношений:

$$E_2 = \frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{\varepsilon_{22}^0}, \quad \nu_{23} = \frac{\langle \varepsilon_{33} \rangle}{\varepsilon_{22}^0}, \quad \nu_{21} = \frac{\langle \varepsilon_{11} \rangle}{\varepsilon_{22}^0}.$$

В силу того что композит является трансверсально-изотропным материалом, должно выполняться равенство $\nu_{21}E_2 = \nu_{12}E_1$.

Сдвиговая продольная деформация ячейки периодичности

Для вычисления сдвиговой продольной деформации на границах ячейки периодичности задаются следующие группы условий:

$$\begin{array}{lll} u_i(x, y, 0) = u_i(x, y, c), i = 1, 2, 3; & u_1(\mathbf{X}) = U_1^0, \mathbf{X} \in S_t; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{13}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_f, S_b; \\ u_1(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & u_2(\mathbf{X}) = U_2, \mathbf{X} \in S_t; & \sigma_{22}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_t; \\ u_2(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & u_3(\mathbf{X}) = U_3, \mathbf{X} \in S_r; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{13}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_r, S_l; \\ u_3(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_l; & & \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_g. \end{array}$$

При этом известно ненулевое перемещение на верхней грани S_f , равное U_1^0 , а также ставится условие одинаковости перемещений противоположащих точек передней и задней граней (см. рисунок 3.11). Продольная сдвиговая деформация композита определяется следующим образом: $\varepsilon_{12}^0 = \langle \varepsilon_{12} \rangle = \frac{U_3}{b}$.

Необходимые величины, которые определяются из решения задачи: осредненные касательные напряжения $\langle \sigma_{12} \rangle$ и осредненные поперечные деформации $\langle \varepsilon_{22} \rangle = \frac{U_2}{b}$, $\langle \varepsilon_{33} \rangle = \frac{U_3}{a}$.

При этом непосредственно из решения должно следовать

$$\langle \sigma_{11} \rangle = \langle \sigma_{22} \rangle = \langle \sigma_{33} \rangle = \langle \sigma_{13} \rangle = \langle \sigma_{23} \rangle = 0.$$

Эффективный модуль сдвига G_{12} определяется из соотношения $G_{12} = \frac{\langle \sigma_{12} \rangle}{\beta_1}$.

Так как композит трансверсально-изотропный, в нем отсутствуют связи между сдвиговыми и линейными деформациями. Поэтому должно выполняться равенство $U_2 = U_3 = 0$.

Температурная деформация ячейки периодичности

При температурном нагружении, в отличие от перечисленных выше схем, дополнительно задается температурная деформация

$$\varepsilon_{Tij}^m(\mathbf{X}, T) = \alpha^m(T) \Delta T \delta_{ij}, \quad \mathbf{X} \in V^m,$$

$$\varepsilon_{Tij}^\alpha(\mathbf{X}, T) = \alpha^\alpha(T) \Delta T \delta_{ij}, \quad \mathbf{X} \in V^\alpha,$$

где ΔT – заданное приращение температуры относительно базового уровня. Кроме того, необходимо реализовать следующие условия на границах ячейки периодичности:

$$\begin{array}{lll} u_1(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_b; & u_1(\mathbf{X}) = U_1, \mathbf{X} \in S_f; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{13}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_f; \\ u_2(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & u_2(\mathbf{X}) = U_2, \mathbf{X} \in S_t; & \sigma_{12}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_t; \\ u_3(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_l; & u_3(\mathbf{X}) = U_3, \mathbf{X} \in S_r; & \sigma_{13}(\mathbf{X}) = \sigma_{23}(\mathbf{X}) = 0, \mathbf{X} \in S_r. \end{array}$$

Величины U_1 , U_2 и U_3 – неизвестные параметры, получаемые из решения задачи. Деформация композита во всех направлениях в данной постановке постоянна, и ее компоненты определяются следующим образом:

$$\varepsilon_{11} = \langle \varepsilon_{11} \rangle = \frac{U_1}{a}, \quad \varepsilon_{22} = \langle \varepsilon_{22} \rangle = \frac{U_2}{b}, \quad \varepsilon_{33} = \langle \varepsilon_{33} \rangle = \frac{U_3}{c}.$$

При этом непосредственно из решения должно следовать

$$\langle \sigma_{11} \rangle = \langle \sigma_{22} \rangle = \langle \sigma_{33} \rangle = \langle \sigma_{12} \rangle = \langle \sigma_{13} \rangle = \langle \sigma_{23} \rangle = 0.$$

Эффективные коэффициенты температурного расширения композита α_i

вычисляются из соотношения: $\alpha_i = \frac{\langle \varepsilon_{ii} \rangle}{\Delta T}$.

3.2.2. Построение функции релаксации и функции ТВС органоволокна

Для численной реализации первого уровня определения эффективных характеристик для монослоя необходимо построить и аппроксимировать функцию релаксации волокна, для связующего коэффициенты аппроксимации получены в разделе 2. Исходными данными для построения функции релаксации волокна являются результаты аппроксимации экспериментальных кривых продольной релаксации органопластика и эпоксидного связующего, полученные при различных температурах. Материал органоволокна рассмотрен как изотропный и терморологически простой. Функцию релаксации материала волокна можно выразить из известного соотношения для определения эффективного продольного модуля однонаправленно-армированного композиционного материала, записанного в операторной форме:

$$E_1^* \varepsilon(t) = \mu E_B^* \varepsilon(t) + (1 - \mu) E_c^* \varepsilon(t) \quad (29)$$

где $E^* \varepsilon(t) = \int_0^t E(t - \tau) d\varepsilon(\tau)$, $\mu = 0,79$ – коэффициент объемного содержания волокна;

E_B^* , E_c^* – операторные модули релаксации для волокна и связующего.

В силу линейности операторов в (29) функция релаксации волокна может быть выражена в виде

$$E_b(t) = \frac{1}{\mu} \left(E_1(t) - (1 - \mu) E_c(t) \right), \quad (30)$$

где E_1 , E_c – соответствующие функции релаксации.

Выделенная в результате кривая функции релаксации для органоволокна представлена на рисунке 3.12, *а*. На рисунке 3.12, *б* показано сравнение исходной кривой релаксации для волокна при температуре 120 °С и ее аппроксимация. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0,2 %.

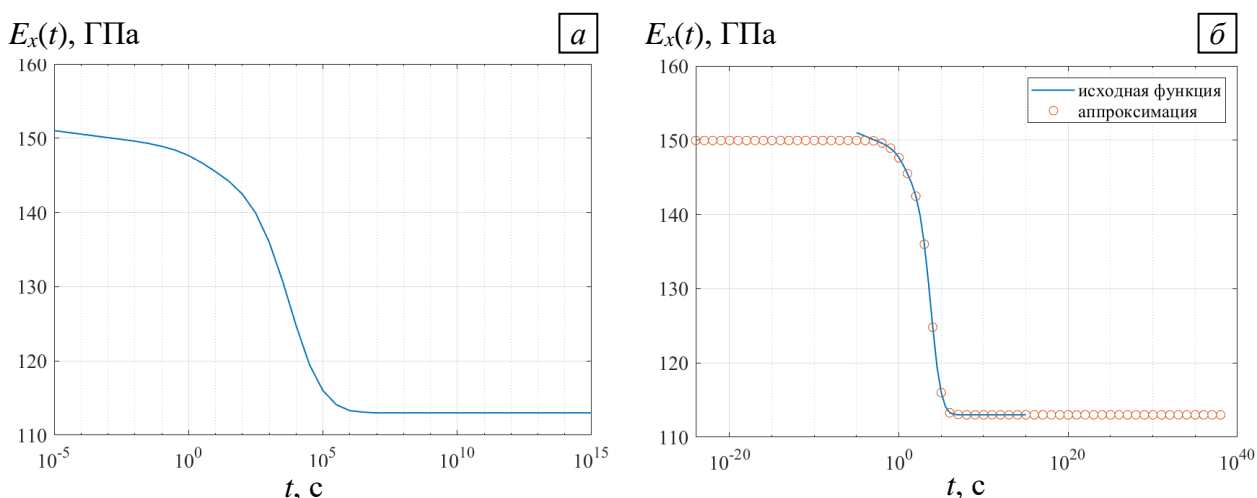


Рисунок 3.12 – Кривая функции релаксации (*а*) и аппроксимация (*б*) органоволокна

Параметры аппроксимации E_0 , E_∞ , соответствующие мгновенному и длительному модулям, составляют: $E_0 = 151,02$ ГПа, $E_\infty = 113,03$ ГПа. Параметры функции температурно-временного сдвига: $T_b = 120$ °С, $C_1 = 112,5942$, $C_2 = 2751,3$ °С. Весовые коэффициенты c_i по временам релаксации β_i определялись согласно общей методике обработки экспериментальных данных. Результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов аппроксимации обобщенной функции релаксации волокна

i	β_i	c_i	i	β_i	c_i
1	1.0000E-02	2.53166e-003	9	2.15443e+003	4.73819e-002
2	4.64159e-002	2.21150e-003	10	1.00000e+004	6.34518e-002
3	2.15443e-001	3.74900e-003	11	4.64159e+004	4.07562e-002
4	1.00000e+000	7.21309e-003	12	2.15443e+005	1.86637e-002
5	4.64159e+000	9.31804e-003	13	1.00000e+006	3.29650e-003
6	2.15443e+001	1.00065e-002	14	4.64159e+006	1.00000e-004
7	1.00000e+002	1.14973e-002	15	2.15443e+007	2.56540e-004
8	4.64159e+002	2.42463e-002	16	1.00000e+008	1.00000e-004

Эффективные вязкоупругие характеристики однонаправленного пластика

Для реализации квазиупругого метода прогнозирования эффективных характеристик необходимо получить значения механических параметров волокна и связующего в табличном виде для каждой рассматриваемой температуры в каждый момент времени. Для этого удобно воспользоваться системой аппроксимации (16)–(17), при этом мгновенное значение коэффициента Пуассона для волокна принималось равным 0,3. Полученные результаты температурно-временного сдвига для волокна показаны на рисунке 3.13.

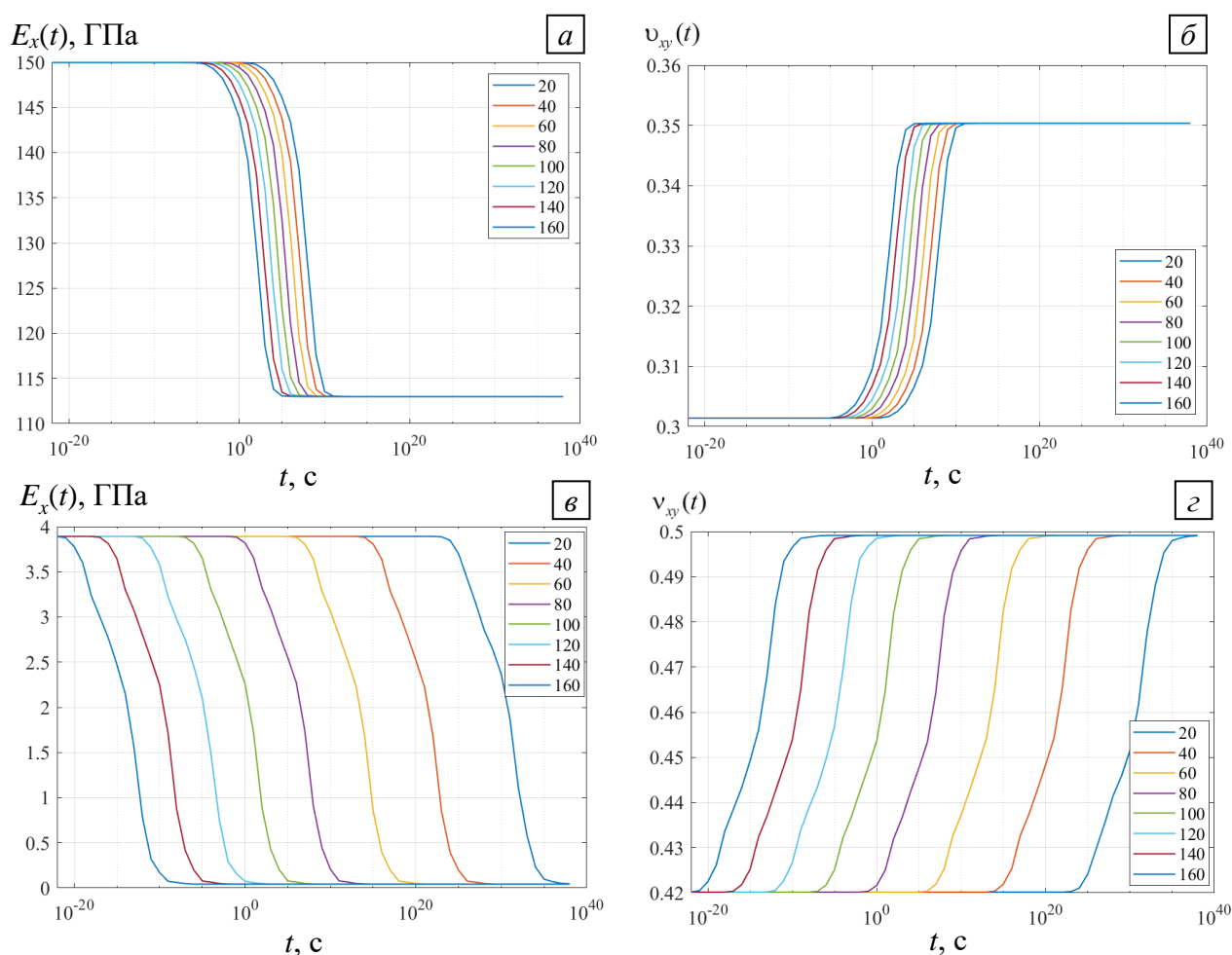


Рисунок 3.13 – Операторные ядра E_x (а), ν_{xy} (б) волокна и E_x (в), ν_{xy} (г) связующего при различных температурах

На основе полученных зависимостей сформированы массивы исходных данных в следующем виде:

T, C	20	40	60	80	100	120	140	160
t, c	значения E или ν							
1.0000000e-022								
...								
1.0000000e+038								

Результаты реализации предложенного алгоритма решения задачи по прогнозированию эффективных характеристик на первом уровне для однонаправленного органопластика представлены на рисунке 3.14.

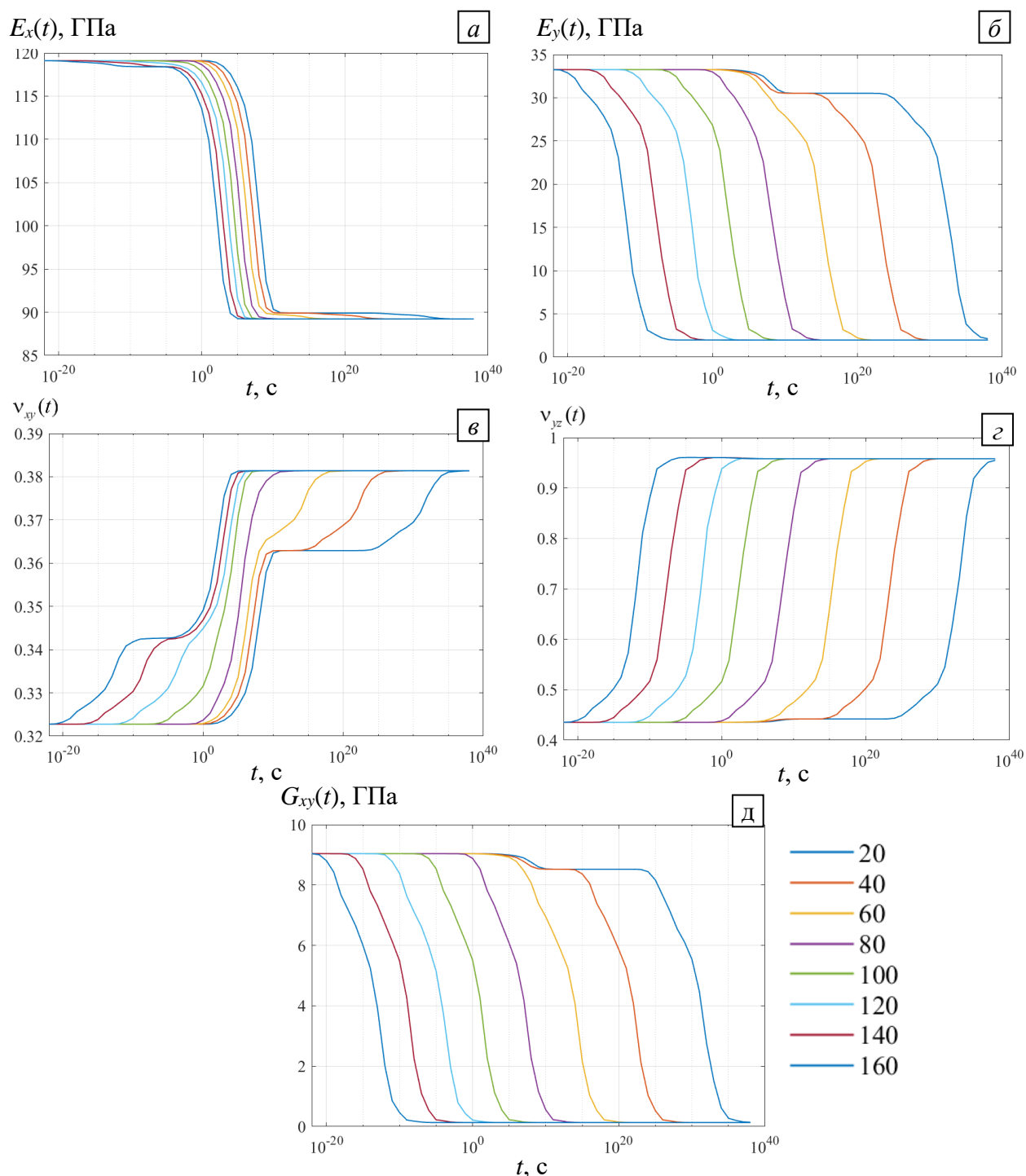


Рисунок 3.14 – Операторные ядра однонаправленного органопластика при различных температурах: $a - E_x(t)$; $b - E_y(t)$; $c - v_{xy}(t)$; $d - v_{yz}(t)$; $e - G_{xy}(t)$

Для полученных кривых релаксации механических параметров E_y , v_{xy} , G_{xy} однонаправленных пластиков отмечено проявление двухэтапного перехода к

длительным значениям. Данный факт можно объяснить суперпозицией кривых релаксации волокна и связующего, а именно тем, что релаксационные переходы при одинаковых температурах происходят в различные интервалы времени, при совместном деформировании волокна и связующего при достижении волокном длительного значения характеристики связующего еще продолжают изменяться.

Для учета температурных деформаций были рассчитаны эффективные значения КЛТР для 2 случаев – с мгновенными и длительными характеристиками волокна и связующего. КЛТР связующего выбран для неотвержденного состояния, потому что на протяжении 80 % рассматриваемого процесса связующее находится в незастеклованном состоянии. Полученные значения представлены ниже:

$$\alpha_1^0 = -0,6113892E-05, \quad \alpha_1^\infty = -0,6438474E-05,$$

$$\alpha_2^0 = 0,5288572E-04, \quad \alpha_2^\infty = 0,7494816E-04,$$

$$\alpha_3^0 = 0,5295076E-04, \quad \alpha_3^\infty = 0,7518437E-04.$$

В исследуемом изделии, помимо лент из органоволокна, также наматываются ленты из стекловолокна. Поскольку экспериментов на релаксацию образцов однонаправленного стеклопластика не проводилось, для прогнозирования эффективных вязкоупругих характеристик оболочки изделия в качестве исходных данных взяты известные данные по стекловолокну. Значения характеристик приведены в таблице 3.2. При проведении численных экспериментов свойства стекловолокна оставались неизменными, менялись лишь характеристики эпоксидного связующего. Результаты численных расчетов в виде кривых релаксаций приведены на рисунке 3.15.

Таблица 3.2 – Свойства стекловолокна

Характеристика	Значение
Модуль упругости E_1 , ГПа	88
Коэффициент Пуассона ν	0,22

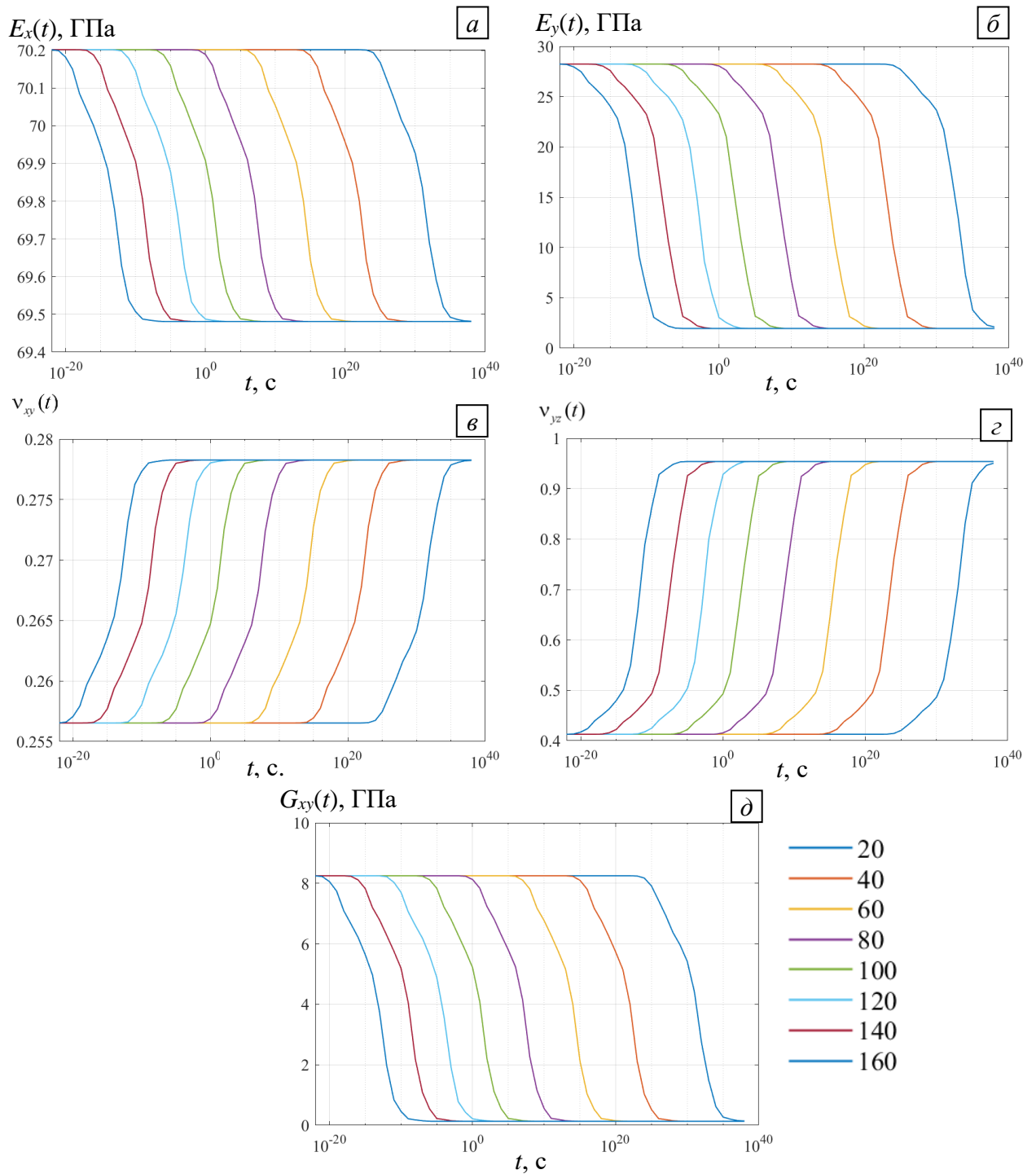


Рисунок 3.15 – Операторные ядра однонаправленного стеклопластика при различных температурах: $a - E_x(t)$; $б - E_y(t)$; $в - v_{xy}(t)$; $г - v_{yz}(t)$; $д - G_{xy}(t)$

Поскольку свойства стекловолокна были постоянные, характер изменения характеристик стеклопластика идентичен поведению материала связующего, изменились только мгновенные и длительные значения.

Далее определены эффективные значения КЛТР для 2 случаев – с мгновенными и длительными характеристиками связующего. Результаты представлены ниже:

$$\alpha_1^0 = 0,8637319\text{E-}05, \quad \alpha_1^\infty = 0,8114078\text{E-}05,$$

$$\alpha_2^0 = 0,2002069\text{E-}04, \quad \alpha_2^\infty = 0,4257633\text{E-}04,$$

$$\alpha_3^0 = 0,2004111\text{E-}04, \quad \alpha_3^\infty = 0,4286517\text{E-}04.$$

На основе описанной методики разработан автоматизированный расчетный модуль на языке APDL для построения эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленных пластиков. Модуль позволяет на основе данных о поведении волокна и связующего построить полный набор ядер релаксации для дальнейшего трехмерного конечно-элементного анализа.

3.2.3. Прогнозирование эффективных вязкоупругих характеристик оболочки

Для следующего этапа определения эффективных термовязкоупругих характеристик оболочки предложено рассмотреть представительный объем оболочки, образованный полным набором слоев. Условная схема с обозначением граней и принятой системы координат представлена на рисунке 3.16.

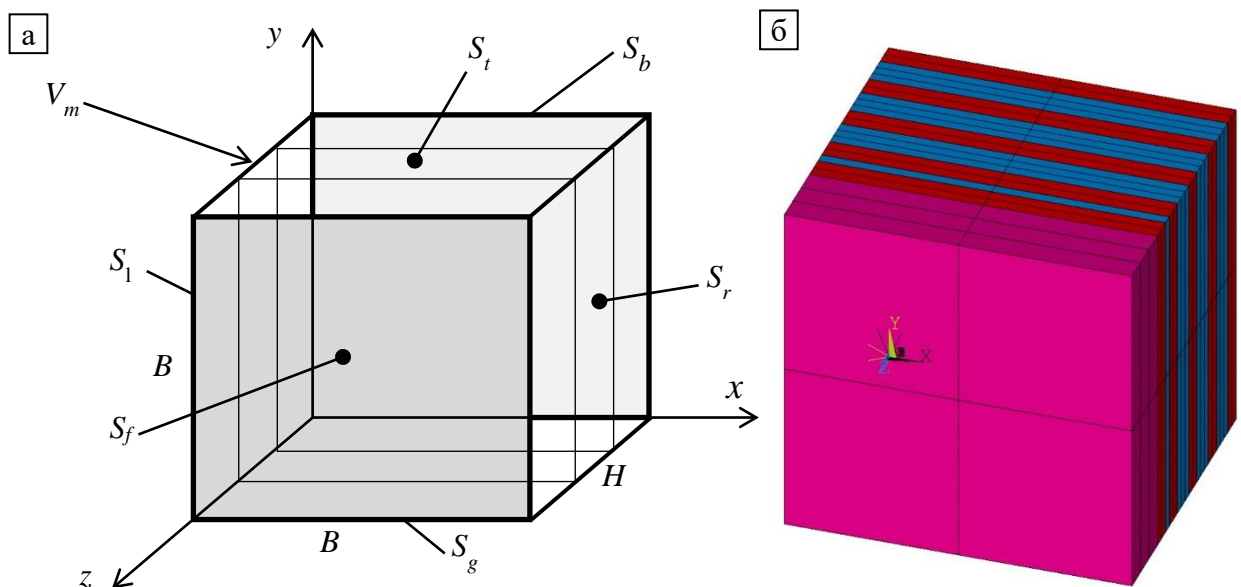


Рисунок 3.16 – Представительный объем: *a* – принятая система координат, S_f , S_b , S_l , S_r , S_g , S_t – передняя, задняя, левая, правая, нижняя и верхняя грани ячейки соответственно; *б* – конечно-элементная реализация

На рисунке 3.16, б представлена конечно-элементная модель представительного объема, в которой в каждом слое введена локальная система координат для корректного учета направления укладки волокон в монослоях (см. рисунок 3.1). Исходя из особенностей армирования, материал оболочки на макроуровне в глобальной системе координат конструкции считаем ортотропным.

Для построения всех операторов необходимо последовательно провести серию вычислительных экспериментов:

- исследование релаксации ячейки при деформировании в направлении кольцевого армирования (окружная координата оболочки), направление x на рисунке 3.16, а;

- исследование релаксации ячейки при деформировании в направлении перпендикулярном кольцевому армированию (осевая координата оболочки), направление y на рисунке 3.16, а;

- исследование релаксации ячейки при деформировании в направлении перпендикулярном плоскости слоев, направление z на рисунке 3.16, а;

- исследование сдвиговой релаксации ячейки в трех плоскостях.

Для отыскания эволюции напряженно-деформированного состояния представительного объема необходимо решить краевую квазистатическую задачу линейной вязкоупругости, общая постановка которой включает следующие соотношения:

- уравнения равновесия

$$\sigma(\mathbf{X}, t)_{ij,j} = 0, \quad \mathbf{X} \in V_1 \cup V_2 \dots \cup V_m, \quad (31)$$

- геометрические соотношения

$$\varepsilon(\mathbf{X}, t)_{ij} = \frac{1}{2}(u(\mathbf{X}, t)_{i,j} + u(\mathbf{X}, t)_{j,i}), \quad \mathbf{X} \in V_1 \cup V_2 \dots \cup V_m, \quad (32)$$

- физические соотношения

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t R_{ijkl}^m(t - \tau) d\varepsilon_{kl}(\tau), \quad \mathbf{X} \in V_m, \quad (33)$$

где $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненты тензоров напряжений и деформаций; $R_{ijkl}^m(t)$ – ядра операторных жесткостей материалов слоев; V_m – области, занимаемые материалом m -го слоя. Система замыкается набором граничных условий.

Для построения функции релаксация ячейки при деформировании в направлении кольцевого армирования решается краевая задача вязкоупругости (31)–(33) при следующих граничных условиях [73]:

$$\begin{aligned} u_z(\mathbf{X}, t) &= 0, \mathbf{X} \in S_b; & u_y(\mathbf{X}, t) &= U_y(t), \mathbf{X} \in S_f; \\ u_y(\mathbf{X}, t) &= 0, \mathbf{X} \in S_g; & u_z(\mathbf{X}, t) &= U_z(t), \mathbf{X} \in S_i; \\ u_x(\mathbf{X}, t) &= 0, \mathbf{X} \in S_l; & u_x(\mathbf{X}, t) &= U_x^0 h(t), \mathbf{X} \in S_r, \end{aligned}$$

где величина $U_x^0 = 0,01 \cdot B$; $h(t)$ – единичная ступенчатая функция Хевисайда; при этом деформация в направлении кольцевого армирования при $t \geq 0$ постоянна и равна

$$\varepsilon_{xx}^0 = \langle \varepsilon_{xx}(t) \rangle = \frac{U_x^0}{B}.$$

Изменение осредненных поперечных деформаций во времени можно определить по соотношениям

$$\langle \varepsilon_{yy}(t) \rangle = \frac{U_y(t)}{B}; \quad \langle \varepsilon_{zz}(t) \rangle = \frac{U_z(t)}{H},$$

где $U_y(t)$ и $U_z(t)$ – перемещения, получаемые из численного решения.

Эффективные ядра операторного модуля упругости $E_x(t)$ и операторного коэффициента Пуассона $\nu_{xy}(t)$ определяются из следующих соотношений:

$$E_x(t) = \frac{\langle \sigma_{xx}(t) \rangle}{\varepsilon_{xx}^0}; \quad \nu_{xy}(t) = \frac{\langle \varepsilon_{yy}(t) \rangle}{\varepsilon_{xx}^0},$$

где $\langle \sigma_{xx}(t) \rangle$ – средние напряжения, получаемые из численного решения.

Для исследования релаксация ячейки при деформировании в направлении, перпендикулярном кольцевому армированию, рассматривается краевая задача вязкоупругости (31)–(33) при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} u_z(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in S_b; & \quad u_x(\mathbf{X}, t) = U_x(t), \mathbf{X} \in S_r; \\ u_y(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & \quad u_z(\mathbf{X}, t) = U_z(t), \mathbf{X} \in S_f; \\ u_x(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in S_l; & \quad u_y(\mathbf{X}, t) = U_y^0 h(t), \mathbf{X} \in S_t, \end{aligned}$$

где величина $U_y^0 = 0,01 \cdot B$; $h(t)$ – единичная ступенчатая функция Хевисайда; деформация композита в направлении y при $t \geq 0$ постоянна:

$$\varepsilon_{yy}^0 = \langle \varepsilon_{yy}(t) \rangle = \frac{U_y^0}{B}.$$

Из решения краевой задачи определяются релаксация осредненных напряжений $\langle \sigma_{yy}(t) \rangle$ и осредненные поперечные деформации во времени:

$$\langle \varepsilon_{xx}(t) \rangle = \frac{U_x(t)}{B}; \quad \langle \varepsilon_{zz}(t) \rangle = \frac{U_z(t)}{H},$$

где $U_x(t)$ и $U_z(t)$ – неизвестные перемещения, получаемые из решения.

Эффективные ядра операторного модуля упругости $E_y(t)$ и операторного коэффициента Пуассона $\nu_{yx}(t)$ определяются из следующих соотношений:

$$E_y(t) = \frac{\langle \sigma_{yy}(t) \rangle}{\varepsilon_{yy}^0}; \quad \nu_{yx}(t) = \frac{\langle \varepsilon_{xx}(t) \rangle}{\varepsilon_{yy}^0}.$$

Для отыскания функции релаксация ячейки при деформировании в направлении, перпендикулярном слоям пакета, решается краевая задача вязкоупругости (31)–(33) с граничными условиями

$$\begin{aligned} u_z(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in S_b; & \quad u_x(\mathbf{X}, t) = U_x(t), \mathbf{X} \in S_r; \\ u_y(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in S_g; & \quad u_y(\mathbf{X}, t) = U_y(t), \mathbf{X} \in S_t; \\ u_x(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in S_l; & \quad u_z(\mathbf{X}, t) = U_z^0 h(t), \mathbf{X} \in S_f, \end{aligned}$$

где величина $U_z^0 = 0,01 \cdot H$; $h(t)$ – единичная ступенчатая функция Хевисайда; при этом деформация композита в рассматриваемом направлении при $t \geq 0$ постоянна и

$$\text{равна } \varepsilon_{zz}^0 = \langle \varepsilon_{zz}(t) \rangle = \frac{U_z^0}{H}.$$

Из решения краевой задачи находятся релаксация осредненных напряжений $\langle \sigma_{zz}(t) \rangle$ и изменение осредненных поперечных деформаций во времени:

$$\langle \varepsilon_{xx}(t) \rangle = \frac{U_x(t)}{B}; \langle \varepsilon_{yy}(t) \rangle = \frac{U_y(t)}{B},$$

где $U_x(t)$ и $U_y(t)$ – перемещения, полученные в результате решения.

Ядра операторного модуля упругости $E_z(t)$ и операторного коэффициента Пуассона $\nu_{zx}(t)$ определяются из следующих соотношений:

$$E_z(t) = \frac{\langle \sigma_{zz}(t) \rangle}{\varepsilon_{zz}^0}; \nu_{zx}(t) = \frac{\langle \varepsilon_{xx}(t) \rangle}{\varepsilon_{zz}^0}.$$

Для реализации условий сдвига в плоскости xu краевая задача (31)–(33) дополняется следующими условиями:

$$\begin{aligned} u_x(\mathbf{X}, t) &= \beta_1 y h(t), u_z(\mathbf{X}, t) = 0, & \mathbf{X} \in S_l, S_r \\ u_y(\mathbf{X}, t) &= 0, u_x(\mathbf{X}, t) = \beta_1 B h(t), & \mathbf{X} \in S_i; \\ u_x(\mathbf{X}, t) &= u_y(\mathbf{X}, t) = 0, & \mathbf{X} \in S_g; \\ u_z(\mathbf{X}, t) &= 0, & \mathbf{X} \in S_f, S_b. \end{aligned}$$

Деформация сдвига ячейки постоянна и равна

$$\varepsilon_{xy}^0 = \langle \varepsilon_{xy}(t) \rangle = \frac{\beta_1}{2}.$$

Из решения задачи на ячейке периодичности строится зависимость осредненных касательных напряжений $\langle \sigma_{xy}(t) \rangle$ во времени. Ядро эффективного операторного модуля сдвига $G_{xy}(t)$ тогда можно определить как

$$G_{xy}(t) = \frac{\langle \sigma_{xy}(t) \rangle}{\beta_1}.$$

Решение краевых задач осуществлено с помощью вычислительных экспериментов на конечно-элементной модели представительского объема, представленной на рисунке 3.14, б, с использованием описанного квазиупругого метода.

В результате получены кривые релаксации операторных модулей, характеризующих механическое поведение оболочки. На рисунке 3.17 представлены полученные операторные ядра модулей Юнга для описания ортотропности получаемого материала.

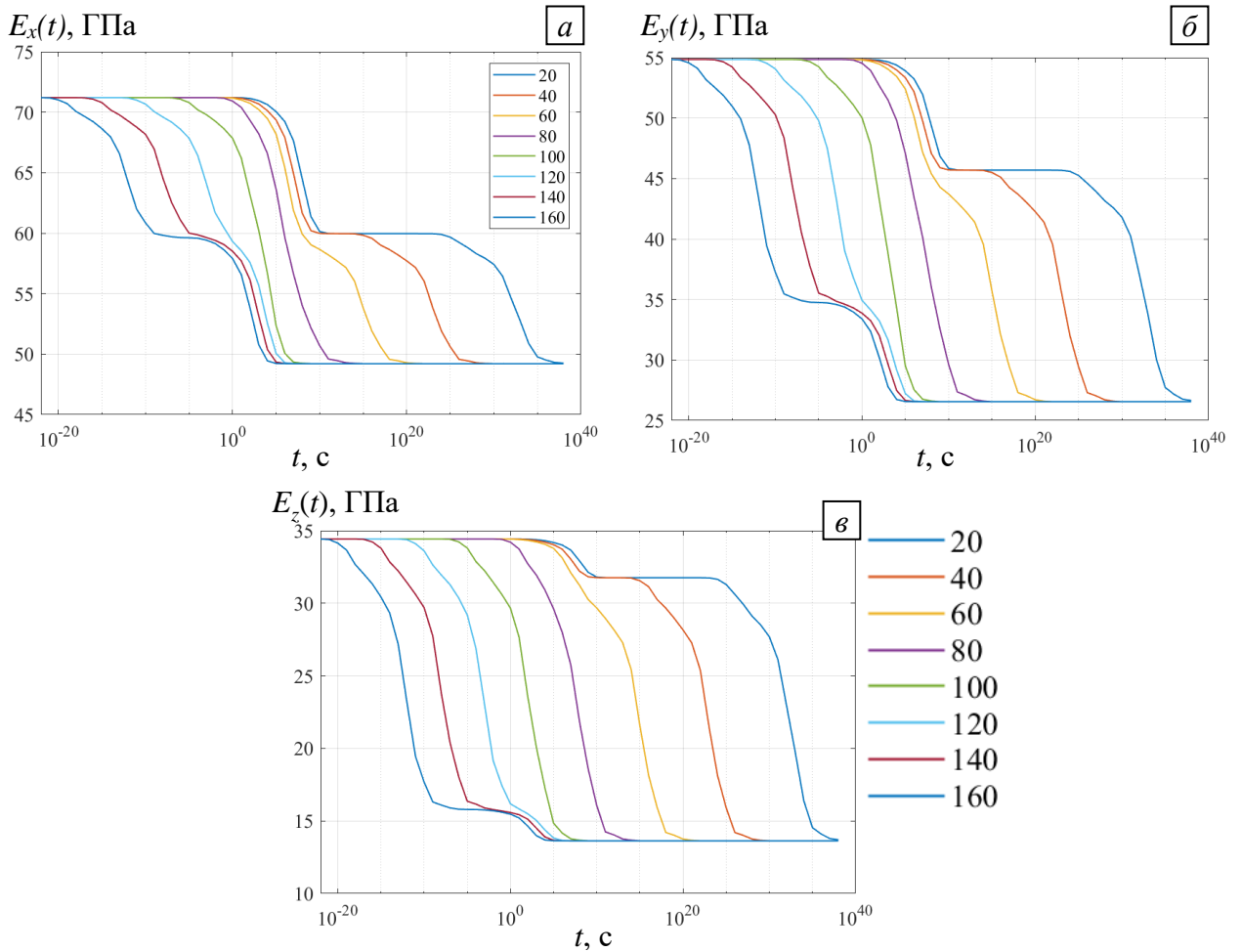


Рисунок 3.17 – Операторные ядра модулей Юнга пакета

На рисунке 3.18 представлены полученные операторные ядра модулей сдвига получаемого материала.

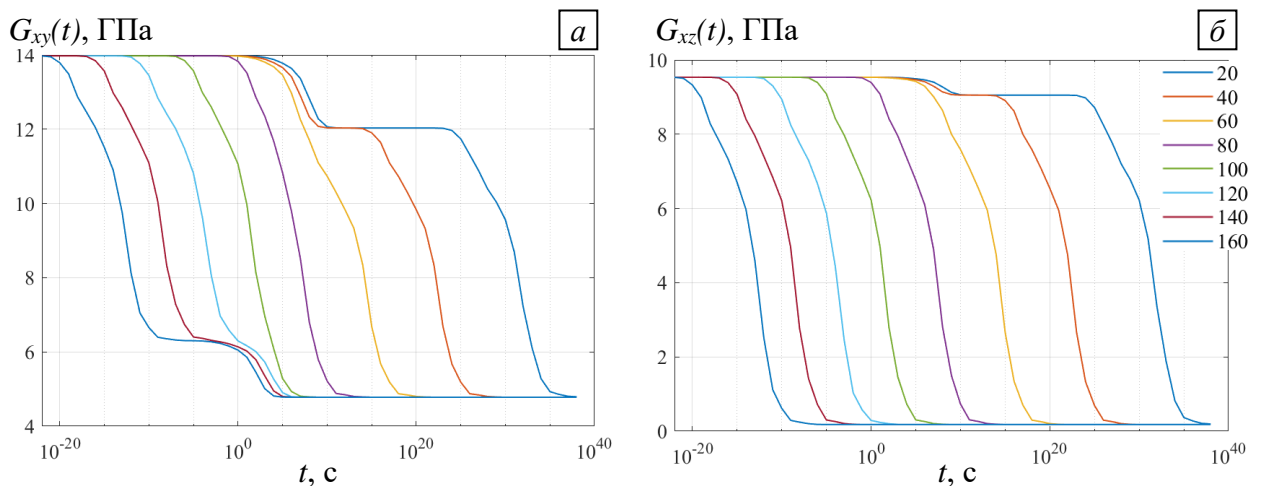


Рисунок 3.18 – Операторные ядра модулей сдвига для пакета

Из анализа полученных кривых релаксации механических параметров пакета также установлено проявление двухэтапного перехода к длительным значениям. Это является следствием суперпозиции характеристик разнонаправленных

монослоев, аналогично описанному ранее принципу. Полученные зависимости на всем рассмотренном временном интервале нельзя рассматривать в рамках гипотез о термореалогически простом поведении материала. На интервале времени 10^0 – 10^6 с, соответствующего длительности процесса изготовления оболочки, кривые подобны и можно воспользоваться температурно-временным сдвигом для использования описанной ранее модели термовязкоупругого поведения.

Определение параметров модели Prony для описания вязкоупругого поведения композиционного слоистого пакета в ANSYS

Для решения задачи о прогнозировании термовязкоупругого поведения намоточной конструкции в процессе изготовления в пакете инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL невозможно использование полного набора операторных ядер ввиду неприменимости квазиупругого метода при решении задач с изменяющимися температурами. Для описания термовязкоупругого поведения материала оболочки в процессе решения выбрана описанная ранее модель Prony. Для выбранной модели необходимо вычислить параметры аппроксимации, а также константы температурно-временного сдвига по формуле Вильямса–Ландела–Ферри. Для определения параметров воспользуется методикой, предложенной ранее в разделе 2.2.

В качестве температуры приведения примем $T = 80$ °С. Параметры аппроксимации определялись из решения задачи о поиске минимума среднеквадратичной невязки. Полученные параметры для операторного ядра E_x приведены в таблице 3.3. Параметры функции температурно-временного сдвига $T_b = 80$ °С, $C_1 = 76,0304$, $C_2 = 484,3478$ °С.

Таблица 3.3 – Значения коэффициентов аппроксимации обобщенной функции релаксации E_x

i	β_i	c_i	i	β_i	c_i
1	1.0000E-02	5.56114e-004	9	2.5118e+004	2.98574e-002
2	6.30957e-002	1.00000e-004	10	1.58489e+005	4.700877e-002
3	3.98107e-001	4.15574e-003	11	1.0000e+006	5.044068e-002
4	2.5118e+000	2.99271e-003	12	6.30957e+006	3.012237e-002
5	1.5848e+001	1.06506e-002	13	3.98107e+007	3.641568e-002
6	1.0000e+002	1.63772e-002	14	2.51188e+008	1.977522e-002
7	6.3095e+002	1.37389e-002	15	1.58489e+009	1.383713e-002
8	3.98107e+003	1.41619e-002	16	1.00000e+010	2.179779e-002

На рисунке 3.19, *a* представлены исходная обобщенная кривая и ее аппроксимация. Распределение весовых коэффициентов представлено на рисунке 3.19, *б*. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0.08 %.

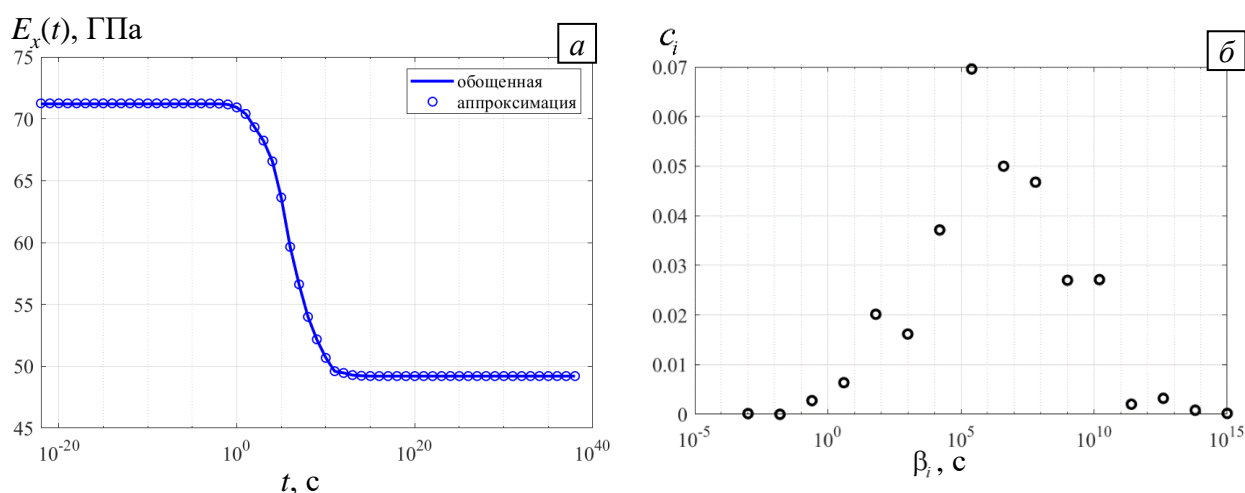


Рисунок 3.19 – Аппроксимация операторного модуля упругости E_x :
a – исходная функция и аппроксимация; *б* – распределение коэффициентов

Описанные подходы, вычислительные эксперименты и аппроксимация операторных ядер моделей Юнга, полученных для слоистого композиционного материала, реализованы в виде автоматизированного модуля, реализованного на языке APDL. Разработанные алгоритмы и автоматизированный модуль позволяют в сжатые сроки получить параметры для описания термовязкоупругого поведения слоистого композита с заданной схемой армирования.

3.3. Исследование влияния модели поведения оболочки на напряженно-деформированное состояние оправки

Рассматриваемая встроенная в ANSYS Mechanical APDL модель описания вязкоупругого поведения Prony позволяет учитывать релаксацию только одного операторного ядра. В случае ортотропного материала встает вопрос выбора ядра, релаксация которого будет учтена. Для этого проведено исследование независимого влияния каждого ядра на напряженно-деформированное состояние конструкции, сравнение осуществлено по изменению напряжений представительного объема при температуре 80 °С.

Реализовано пять вычислительных экспериментов, для различных моделей представления исследуемого материала:

- 1) послойное представление оболочки (ППУ);
- 2) оболочка с эффективными характеристиками (ППУэф);
- 3) оболочка с аппроксимацией ядра в окружном направлении (prony_x);
- 4) оболочка с аппроксимацией ядра в осевом направлении (prony_y);
- 5) оболочка с аппроксимацией ядра в радиальном направлении (prony_z).

При отыскании решений для моделей 1–2 использовался полный набор операторных ядер. Для моделей 3–5 использовался полный набор механических характеристик, равных мгновенным значениям, и аппроксимация одного из операторных ядер модуля Юнга. Для анализа были построены зависимости от времени компонент тензора напряжений в трех ортогональных направлениях, полученные данные представлены на рисунке 3.20.

Установлено, что результаты для моделей 1 и 2 полностью идентичны. Также получены относительные отклонения напряжений для моделей 3–5 относительно модели 1 в соответствующих направлениях. Получено, что минимальное отклонение наблюдается в окружном направлении. Отклонение длительного значения σ_x модели с аппроксимацией в окружном направлении составляет 3,7 %, значения σ_y – 23 %, значения σ_z – 34 %. На интервале времени до 10^7 с максимальные отклонения для разных направлений равны 3,7 %, 8,7 % и 6,5 %

соответственно. Для более полной оценки влияния модели описания материала оболочки необходимо провести исследование эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции.

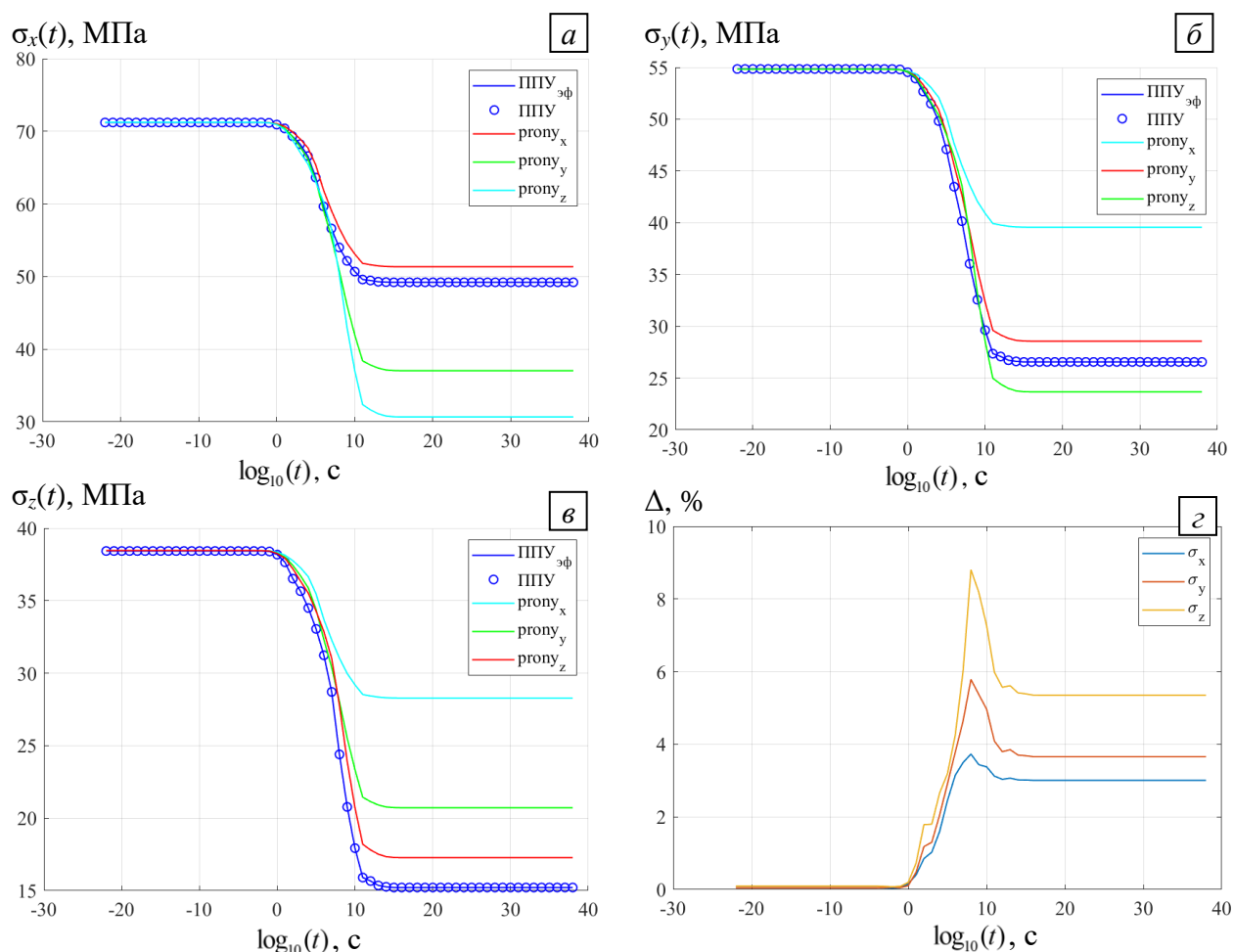


Рисунок 3.20 – Релаксация напряжений и относительное отклонение:

a – направление *x*; *б* – направление *y*; *в* – направление *z*; *г* – относительное отклонение

С целью обоснования выбора операторного ядра модуля Юнга композиционной оболочки рассмотрена задача прогнозирования эволюции НДС при базовой температуре 80 °С. Для экономии вычислительных ресурсов исследование проводилось на упрощенной модели конструкции (см. рисунок 3.2, б). Рассмотрено четыре варианта описания поведения оболочки: использование полного набора эффективных операторных ядер (эталон), аппроксимация ядра модуля Юнга в окружном, осевом и радиальном направлении соответственно. Полученные зависимости компонент тензора напряжений на поверхности формообразующей оправки представлены на рисунке 3.21,

обозначения компонент для удобства приведены в цилиндрической системе координат.

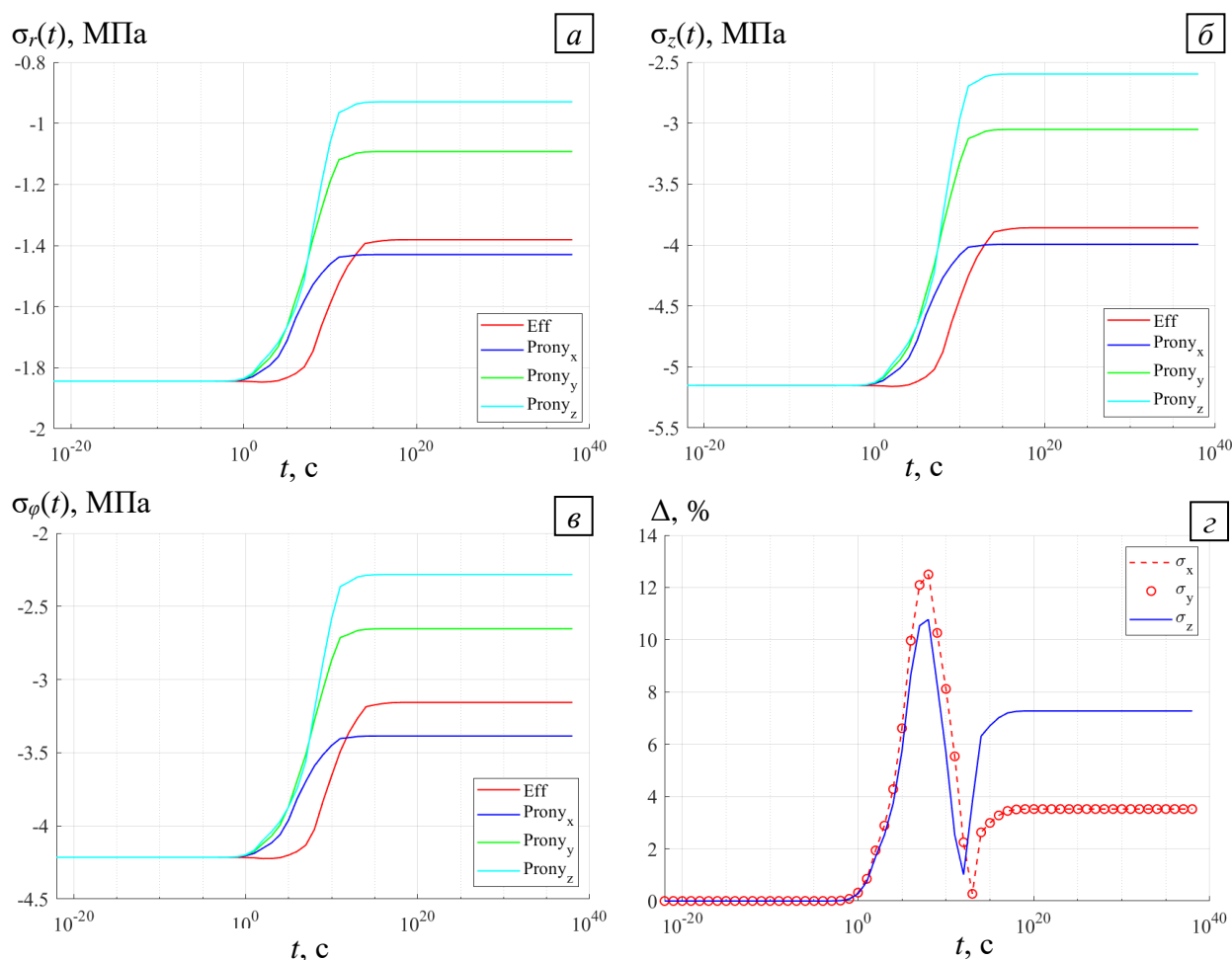


Рисунок 3.21 – Эволюция напряжений при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$:
 a – в радиальном направлении; $б$ – в осевом направлении;
 $в$ – в окружном направлении; $г$ – относительное отклонение
(Eff – эффективные характеристики без аппроксимации; Prony_x – аппроксимация $E_x(t)$;
Prony_y – аппроксимация $E_y(t)$; Prony_z – аппроксимация $E_z(t)$)

Максимальные отклонения значений напряжений относительно модели, учитывающей релаксацию всех ядер, для случая с аппроксимацией ядра $E_x(t)$ в направлении кольцевого армирования составляют σ_x – 12,5 %, σ_y – 12,5 %, σ_z – 10,8 %. При учете аппроксимации ядер в осевом или окружном направлениях максимальные отклонения от эталонного решения превышают 20 %.

В процессе изготовления оправка подвергается сжатию со стороны оболочки, поэтому важно получить корректное описание релаксации напряжений в радиальном направлении. Модель с аппроксимацией продольного ядра $E_x(t)$

обеспечивает отклонение от эталонного решения на уровне 4 % после перехода к длительному модулю. На временном интервале, соответствующему релаксационному переходу, максимальное расхождение достигает 12,5 %. Выбранная модель описания поведения материала оболочки в виде сочетания упругого ортотропного набора характеристик и аппроксимации ядра E_x может быть применена для отыскания напряженно-деформированного состояния формообразующей оправки в процессе изготовления композиционной оболочки.

3.4. Исследование влияния модели поведения оболочки на НДС оправки в процессе намотки и термообработки оболочки

Для оценки влияния поведения материала оболочки на напряженно-деформированное состояние формообразующей оправки в процессе изготовления композиционной наматываемой оболочки необходимо решать два типа задач. Первая задача – это отыскание эволюции температурных полей, реализующихся в конструкции на этапе термообработки. Поскольку процесс термообработки представляет собой термоцикл с изменяющимися во времени температурами, то необходимо решать задачу нестационарной теплопроводности, общая математическая постановка которой включает [74]:

– нестационарное уравнение теплопроводности

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T(\mathbf{X}, t)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T(\mathbf{X}, t))), \quad \mathbf{X} \in V; \quad (34)$$

– начальные условия

$$T(\mathbf{X}, 0) = T_0; \quad (35)$$

– граничные условия

$$\lambda \cdot \mathbf{n} \cdot \text{grad}T(\mathbf{X}, t) = \alpha_T (T(\mathbf{X}, t) - T_{cp}(t)), \quad \mathbf{X} \in S_T; \quad (36)$$

$$\mathbf{n} \cdot \text{grad}T(\mathbf{X}, t) = 0, \quad \mathbf{X} \in S_0, \quad (37)$$

где ρ – плотность; c – теплоёмкость; $T(\mathbf{X}, t)$ – нестационарное температурное поле; \mathbf{X} – радиус-вектор произвольной точки тела, имеющий компоненты $x_i (i = 1, 2, 3)$; λ – коэффициент теплопроводности; t – время; T_0 – начальная

температура; \mathbf{n} – вектор нормали к плоскости с компонентами n_i ; α_T – коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой, имеющей температуру T_{cp} ; S_T – граничная область с условиями конвективного теплообмена; S_0 – с отсутствием теплообмена. Начальным условием для решения задачи нестационарной теплопроводности является T_0 – температура окружающей среды, в нашем решении последовательно меняется ее значение согласно режиму термообработки.

Для определения эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции «оправка – оболочка» в процессе изготовления решается квазистатическая краевая задача. В общем случае постановка задачи для тела, занимающего область $V \equiv V^a \cup V^c \cup V^{et}$ с границей S , где V^a – область, принадлежащая оправке; V^c – область, принадлежащая оболочке; V^{et} – область, принадлежащая остальным элементам конструкции, без учета объемных сил включает:

– уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{X}, t) = 0, \mathbf{X} \in V; \quad (38)$$

– физические соотношения

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{X}, t) + \int_0^t R'_{ijkl}(\mathbf{X}, t - \tau) d\varepsilon_{kl}^*(\mathbf{X}, \tau), \mathbf{X} \in V^{a,b}, \quad (39)$$

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) = \sigma_{ij}^0(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in V^{et},$$

$$\varepsilon_{ij}^*(\mathbf{X}, t) = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^T(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in V; \quad (40)$$

– геометрические соотношения

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{X}, t) = (u_{i,j}(\mathbf{X}, t) + u_{j,i}(\mathbf{X}, t)) / 2, \mathbf{X} \in V; \quad (41)$$

– начальные условия

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, 0) = \sigma_0, \mathbf{X} \in V; \quad (42)$$

– граничные условия

$$u_i(\mathbf{X}, t) = U_i(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in S_u, \quad (43)$$

$$\sigma_{ij}(\mathbf{X}, t) \cdot n_j = P_i, \mathbf{X} \in S_\sigma, \quad (44)$$

где σ_{ij} , ε_{ij} – тензоры напряжений и деформаций; $\varepsilon_{ij}^T(\mathbf{X}, t) = \alpha_{ij} \Delta T$ – температурные деформации; α_{ij} – тензор коэффициентов температурного расширения; $R_{ijkl}(t)$ – тензор функций релаксации; u_i – компоненты вектора перемещений; ΔT – изменение температуры, полученное из решения задачи (34)–(37); σ_0 – начальные напряжения; U_i – заданные перемещения на части границы S_u ; P_i – заданные поверхностные силы на границе S_σ ($S_u \cup S_\sigma \equiv S$).

Для экономии вычислительных ресурсов рассмотрена упрощенная модель конструкции (см. рисунок 3.2, б). Проведено решение задачи на трех вариантах, отличающихся сочетаниями моделей поведения материалов оправки и оболочки. Во всех вариантах оболочка рассматривалась как однородная среда с эффективными характеристиками, компоненты α_{ij} выбраны соответствующими неотвержденному состоянию связующего. В первом варианте рассмотрены упругие модели поведения оправки и оболочки. Во втором варианте учтено термовязкоупругое поведение оправки и упругая оболочка. В третьем варианте поведение оправки и оболочки описано как термовязкоупругое.

Полученные поля радиальных напряжений в трех точках технологического процесса изготовления представлены на рисунке 3.22. Первая точка – начальный момент времени, отображающая распределение напряжений под действием начальных усилий в оболочке (рисунки 3.22, а, г, ж). Вторая точка – начало термообработки, после окончания процесса намотки (рисунки 3.22, б, д, з). Третья точка – окончание процесса изготовления (рисунки 3.22, в, е, и).

Установлено, что во всех рассмотренных вариантах на протяжении всего процесса внешняя поверхность оправки находится в сжатом состоянии, о чем свидетельствуют отрицательные значения напряжений. Учет термовязкоупругих моделей поведения материалов не влияет на качественное распределение напряжений в конструкции, но наблюдается их снижение на 42 % к моменту начала этапа термообработки.

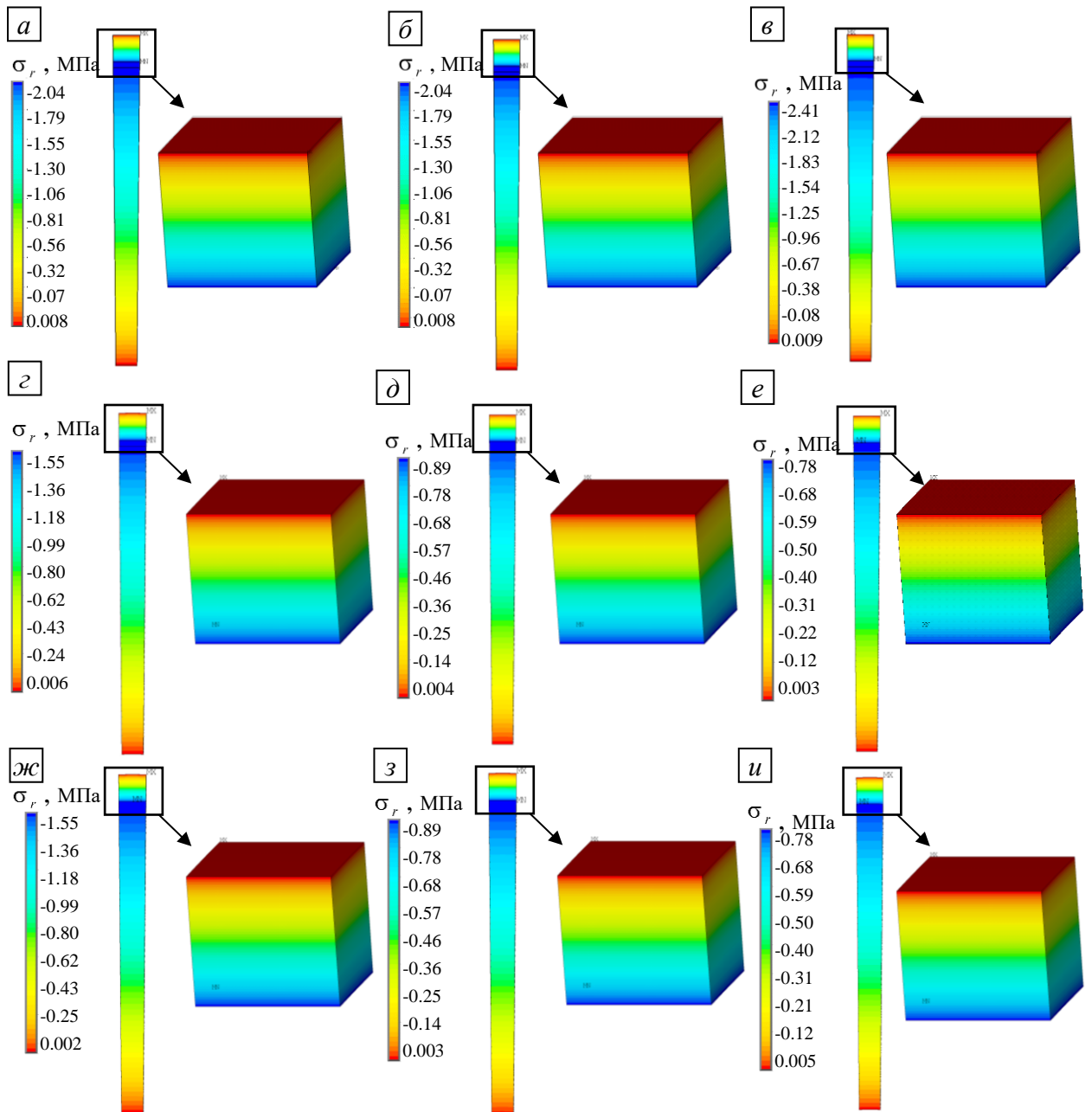


Рисунок 3.22 – Распределение полей радиальных напряжений в конструкции и оболочке в процессе изготовления для трех расчетных случаев

Для оценки эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции построены зависимости значений нормальных напряжений по абсолютному значению на поверхности оправки от времени. Для наглядности и интерпретации полученных результатов оценка проведена для двух временных интервалов – этапов намотки оболочки и термообработки. Результаты сравнения на этапе намотки представлены на рисунке 3.23, а, на этапе термообработки – на рисунке 3.23, б.

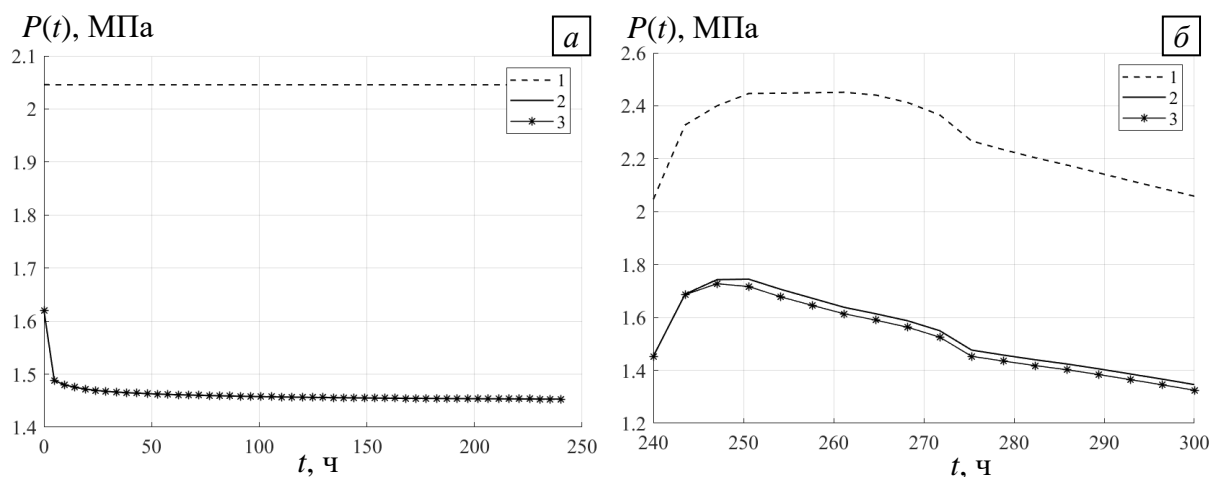


Рисунок 3.23 – Зависимость давления на поверхности оправки в процессе изготовления:
a – этап намотки; *б* – этап термообработки;
 1 – упругие оправка и оболочка; 2 – вязкоупругая оправка и упругая оболочка;
 3 – вязкоупругие оправка и оболочка

На этапе намотки влияние модели поведения материала оболочки несущественно, поскольку наибольший вклад в снижение уровня радиальных напряжений вносит учет вязкоупругости материала оправки, что подтверждается и реологическим поведением материала при нормальной температуре. По результатам экспериментальных данных при температуре $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижение напряжений в образцах материала оправки к моменту времени 10^5 с составило порядка 70 %, со значения 8,5 ГПа до 2,5 ГПа. На этапе термообработки значения уровня радиальных напряжений на поверхности оправки, полученные для вязкоупругой модели оболочки, ниже на 5 % по сравнению с упругой.

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

Выводы по главе

На основе экспериментальных данных получена обобщенная кривая релаксации органоволокна, построены и реализованы численные процедуры для определения ядер релаксации модулей Юнга для однонаправленных пластиков и многослойных полимерных оболочек. На примере представительного объема получен полный набор механических характеристик слоистого композиционного

материала, операторные ядра модулей Юнга в трех ортогональных направлениях и модулей сдвига в двух плоскостях. Получены эффективные коэффициенты линейного температурного расширения для оболочки. Проведена серия вычислительных экспериментов для определения влияния аппроксимации операторного ядра на релаксацию напряжений в представительном объеме оболочки и конструкции при постоянной температуре. Сделан обоснованный выбор аппроксимированного ядра для дальнейших исследований.

Решена задача прогнозирования эволюции напряженно-деформированного состояния представительного объема конструкции в процессе изготовления для трех вариантов сочетания моделей поведения материалов оправки и оболочки. Впервые получены зависимости давления на поверхности формообразующей оправки в процессе изготовления.

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решение сформулированной в главе 3 краевой задачи механики деформируемого твердого тела осуществлено методом конечных элементов в коммерческом пакете инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL. Инструментарий пакета дает возможность организовать решение задачи в автоматизированном режиме, что позволяет использовать разработанные алгоритмы для отыскания напряженно-деформированного состояния в процессе изготовления крупногабаритных намоточных изделий при различных габаритных размерах, схемах армирования и технологических параметрах. Методологию решения поставленной задачи можно представить в виде схемы (рисунок 4.1).

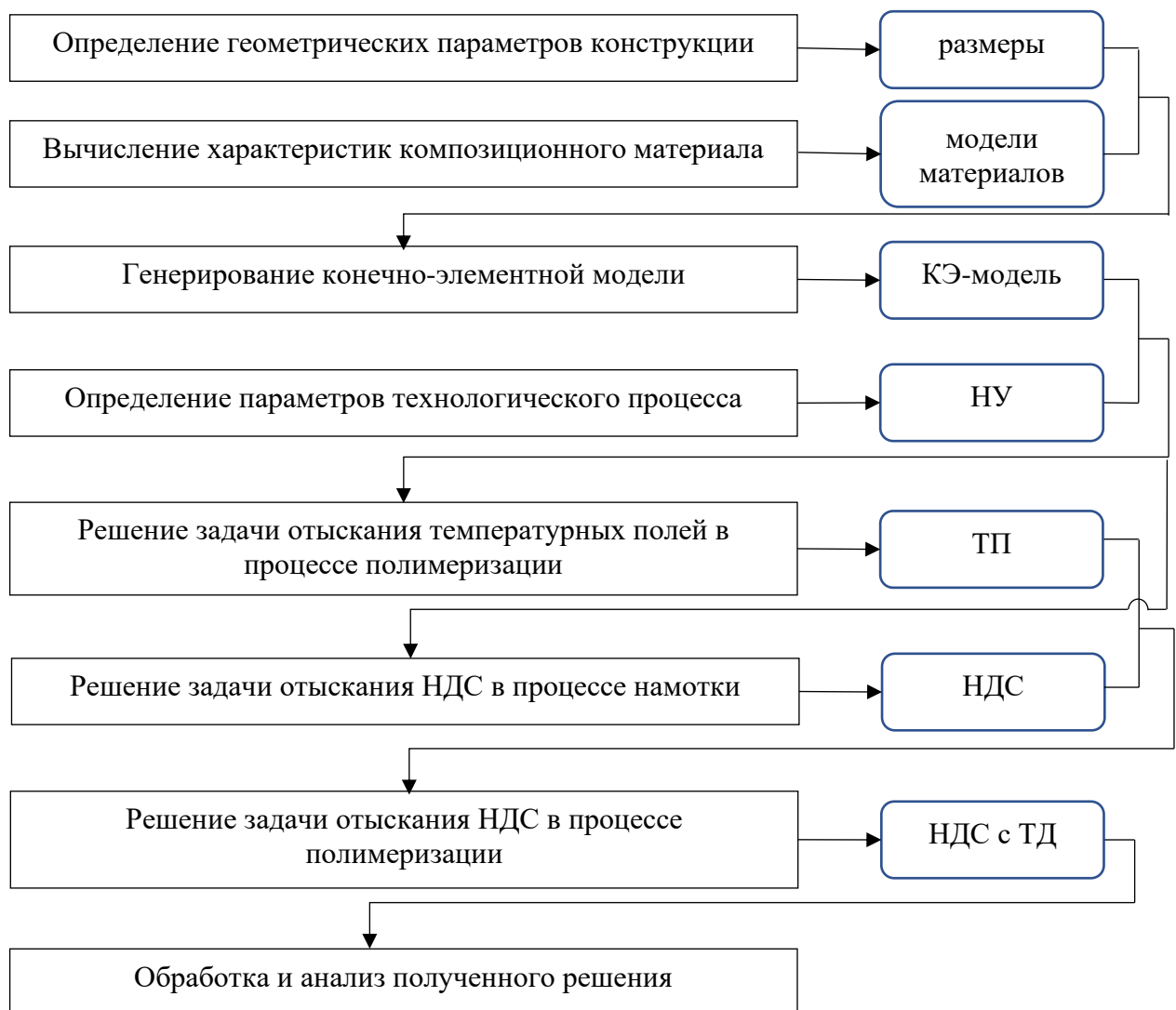


Рисунок 4.1 – Общий порядок решения краевой задачи с помощью МКЭ

На рисунке приняты следующие обозначения: КЭ – конечно-элементная, НУ – начальные условия, ТП – температурные поля, ТД – температурные

деформации. Предложенную методику решения задачи для удобства анализа можно разделить на четыре основных этапа. Первый этап предназначен для создания конечно-элементного аналога конструкции. На втором этапе вычисляется преднапряженное состояние конструкции, возникающее в результате действия усилий в армирующих лентах и со стороны технологической оснастки. На третьем этапе определяется эволюция температурных полей конструкции в процессе термообработки. На четвертом этапе решается квазистатическая краевая задача для всего процесса изготовления.

4.1. Автоматизация построения конечно-элементного аналога конструкции

При исследовании поведения системы «оправка – оболочка» в процессе изготовления на основе доступных исходных данных разработан алгоритм автоматизированного построения КЭ-аналога. Ключевые геометрические параметры определяют конфигурацию оправок – число центральных цилиндрических секций, количество ребер жесткости на сводах. Эти данные позволяют выбрать угловой сегмент периодичности конструкции и количество локальных систем координат для построения геометрического аналога. На рисунке 4.2 показана общая схема конструкции и расположение локальных систем координат (ЛСК) для дальнейших построений.

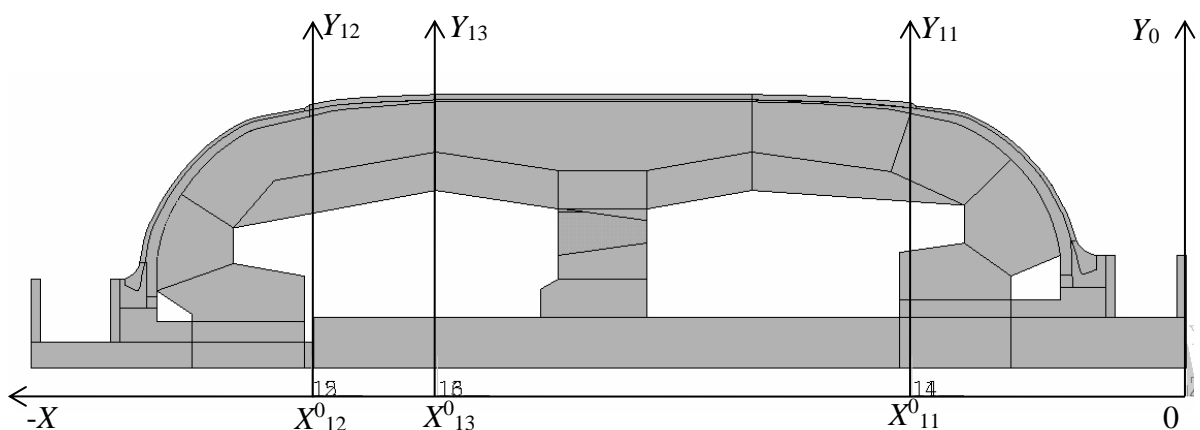


Рисунок 4.2 – Схема расположения ЛСК для удобства построения

Автоматизированное построение геометрического аналога начинается с создания набора локальных систем координат, начало координат которых определяется согласно конструкторской документации для обеспечения

единообразия размеров и координат. Затем в локальных системах координат, соответствующих правому и левому донным участкам, отстраиваются линии и области, определяющие геометрию формообразующей оправки, закладных элементов и оболочки с конечной толщиной. Полное описание геометрии конструкции содержит более 100 линейных и угловых размеров, а также шесть наборов координат для построения образующих (сплайнов) криволинейных поверхностей оправок и закладных элементов. На рисунке 4.3 представлены обозначения некоторых размеров и сплайнов, использованные при построении геометрического аналога правого края конструкции.

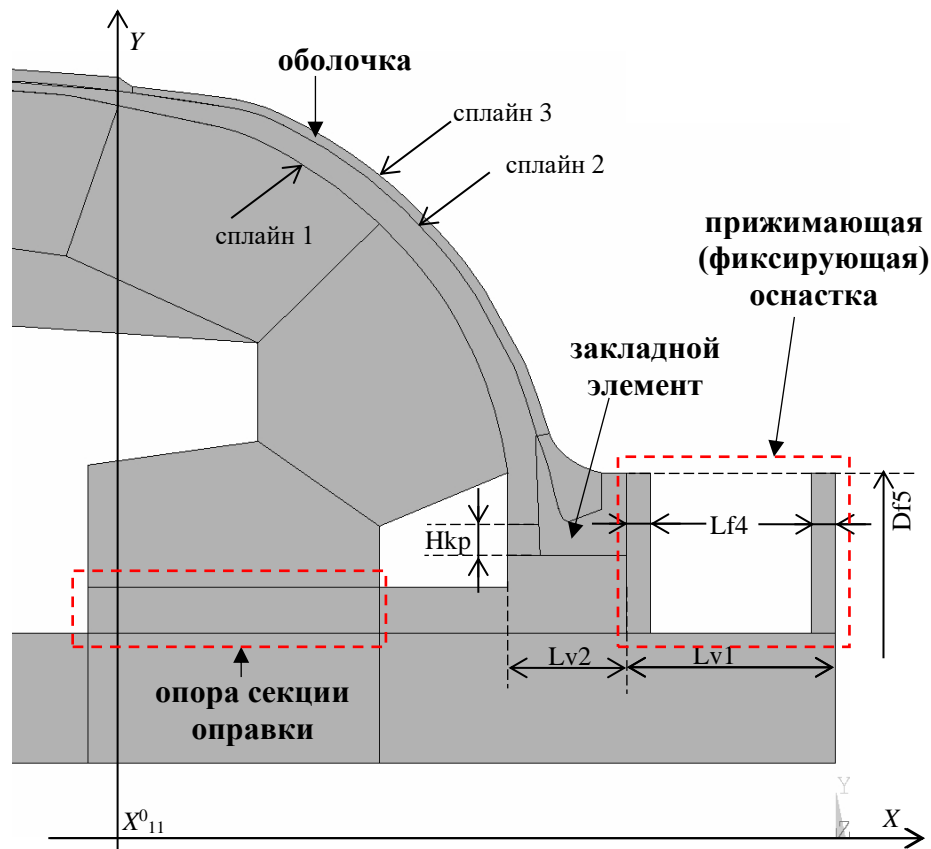


Рисунок 4.3 – Область правого донного участка

После построения плоской схемы конструкции производится операция экструдирования и достраивание отдельных элементов для построения объемного аналога. На рисунке 4.4 представлен трехмерный вид исследуемой системы. С целью экономии вычислительных ресурсов приняты следующие допущения: рассматривается сегмент, равный $1/8$ части конструкции; внешний диаметр

оправок совпадает, высота ребер жесткости постоянна и равна высоте ребра на цилиндрической части оправки.

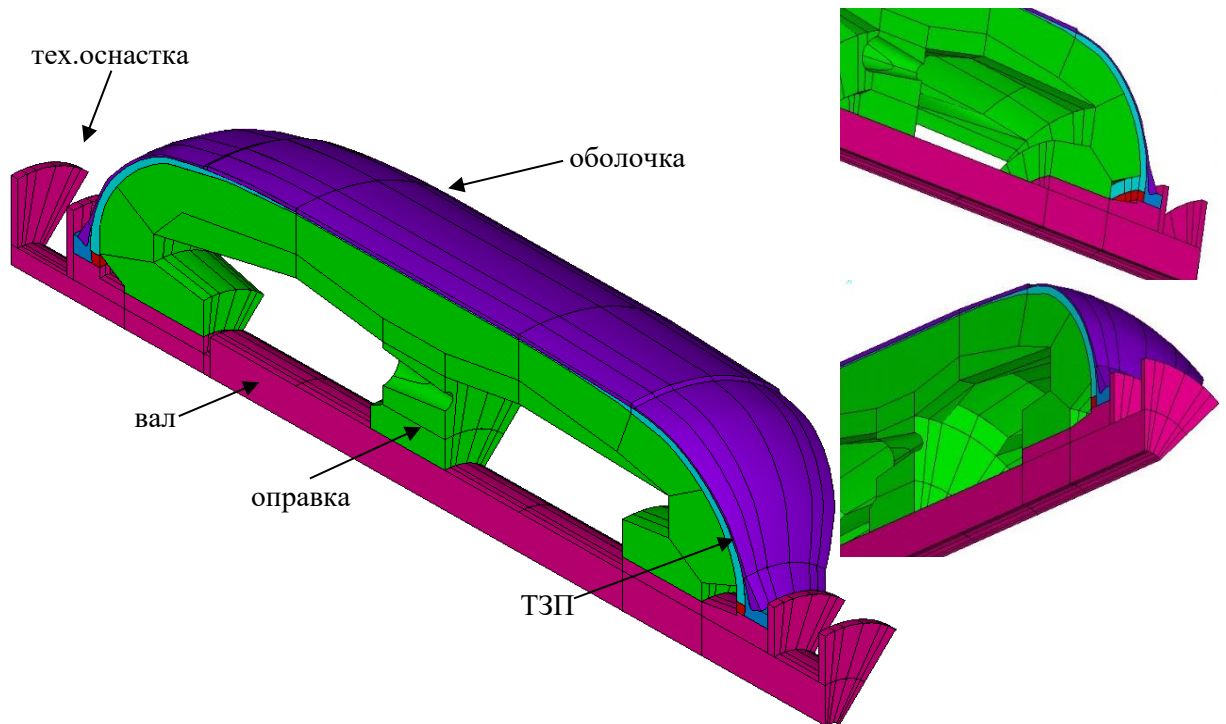


Рисунок 4.4 – Пример геометрической модели конструкции

Разработанный модуль построения геометрии конструкции позволяет варьировать габаритные размеры изделия, в том числе количество центральных секций оправки, пример работы представлен на рисунке 4.5.

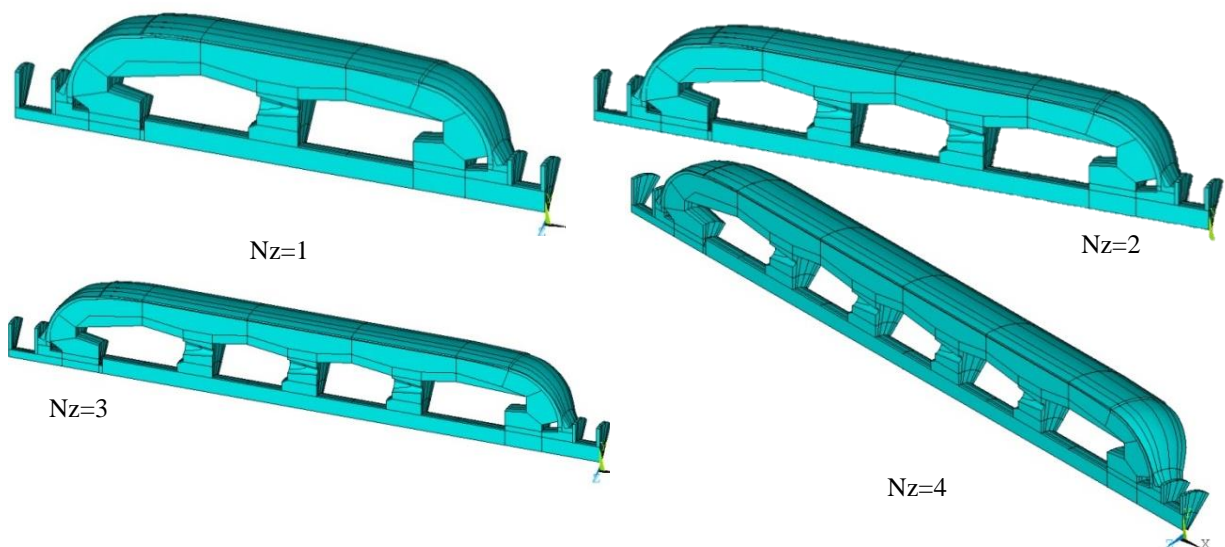


Рисунок 4.5 – Примеры автоматизированного построения геометрии конструкции

Разработанный алгоритм построения конечно-элементного аналога позволяет варьировать степень дискретизации модели и число разбиений по

толщине оболочки, при этом всегда строится не менее трех элементов по толщине. Для удобства работы степень дискретизации определяется масштабным коэффициентом, от значения которого зависит число разбиений на каждой линии. На рисунке 4.6 представлен полученный конечно-элементный аналог конструкции при масштабном коэффициенте, равном 8.

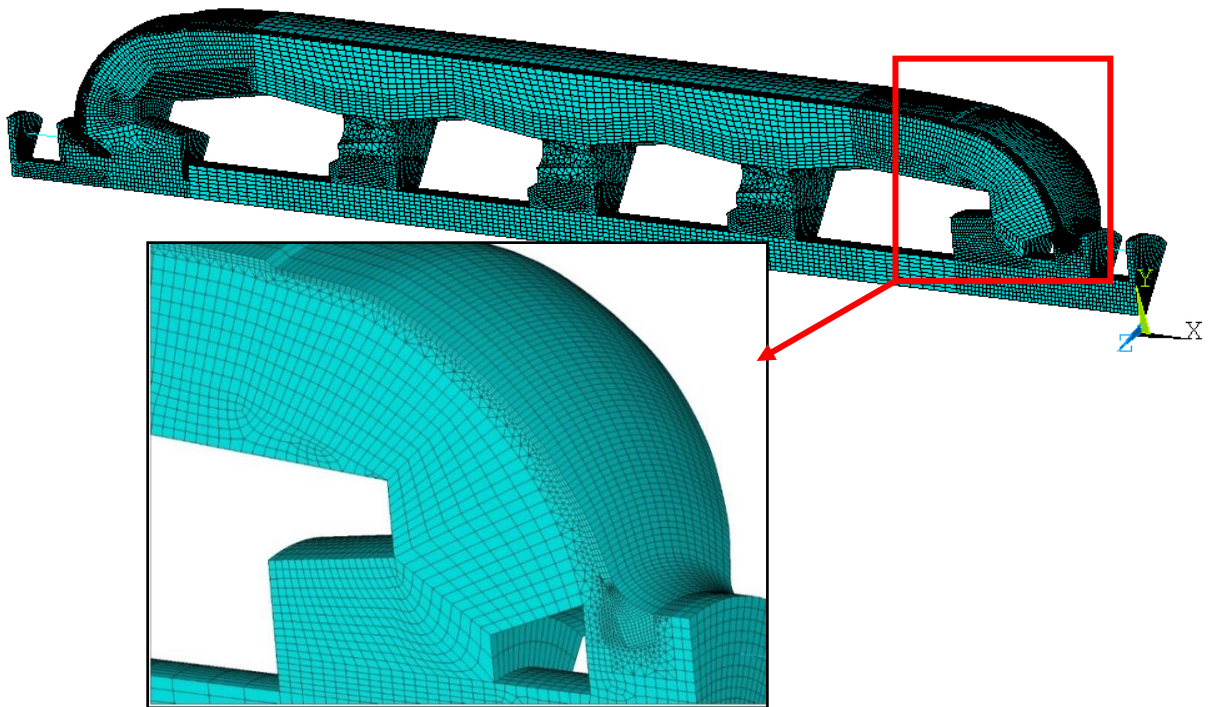


Рисунок 4.6 – Пример автоматизированного построения дискретного аналога

Создание дискретного аналога осуществляется за 4 шага. На первом шаге генерируются осесимметричные области геометрии, затем на построенных областях формируется плоская сетка. На втором шаге плоская сетка экструдируется (вытягивается) в объемную вокруг продольной оси изделия на заданный угол. Третьим шагом достраиваются и дискредитируются элементы ребер жесткости и опоры центральных сегментов оправки. Заключительным шагом в конечно-элементный аналог достраиваются два балочных элемента, которые далее будут использованы для имитации работы прижимающих устройств технологической оснастки.

Предложенный алгоритм автоматизированного построения геометрии за счет параметризации размеров и введения ключевых параметров дает возможность применять обобщенную модель для исследования поведения наматываемых

оболочек при различных вариантах нагружения, схемах армирования, значениях диаметров и длин.

4.2. Назначение эффективных термовязкоупругих свойств оболочки

При исследовании поведения намоточных конструкций неканонических форм необходимо учитывать зависимость механических характеристик от формы оболочки. На цилиндрическом участке оболочки характеристики материала допустимо рассматривать в рамках ортотропной модели поведения, на донных участках угол армирования является переменной величиной. В точке сопряжения цилиндра и дна углы армирования равны, к зоне полюсных отверстий угол армирования стремится к 90° . Таким образом, на донных участках механические характеристики оболочки непрерывно изменяются вдоль образующей.

Для определения эффективных характеристик материала на донном участке использован описанный в третьей главе многоуровневый подход. Предложенная методика проведения серии вычислительных экспериментов на представительном объеме материала позволяет на основе данных о термовязкоупругом поведении волокон и связующего получить характеристики композиционного материала с произвольной схемой армирования. Для построения характеристик материала при изменяющемся угле армирования с помощью возможностей языка APDL реализован алгоритм автоматизированного проведения вычислений характеристик пакета, состоящего из определенного четного числа слоев с симметричными углами. При этом рассмотренный диапазон углов армирования соответствует четверти окружности – от 1 до $\pi/2$, с постоянным шагом. Полученные зависимости модулей упругости от угла армирования представлены на рисунке 4.7 в предельные моменты времени.

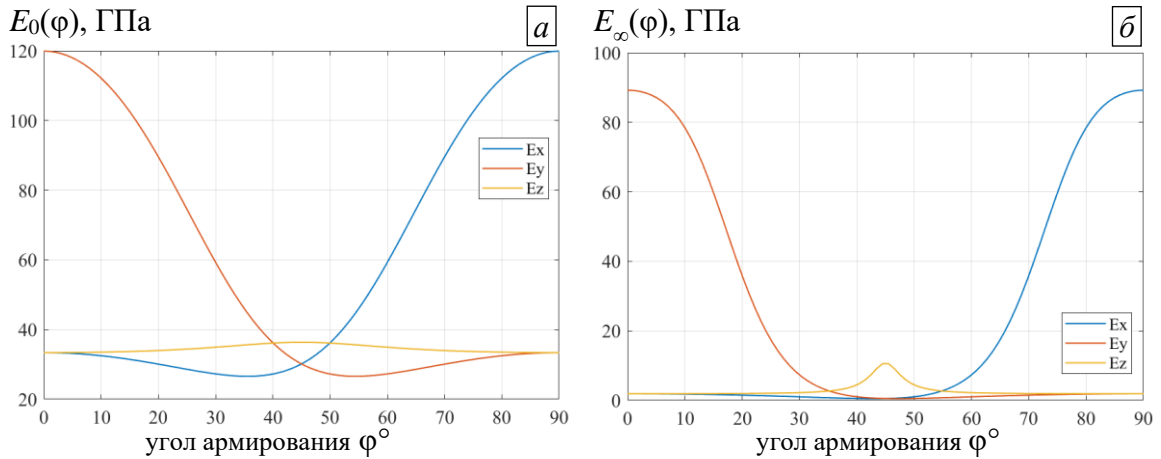


Рисунок 4.7 – Зависимость модулей упругости от угла армирования:
 a – мгновенные значения; b – длительные значения

При переходе из системы координат представительного объема композита к цилиндрической системе оболочки происходит переназначение индексов. На рисунке 4.7 обозначение индекса x соответствует окружному направлению, y – осевому, z – радиальному. Установлено, что по мере увеличения угла прочность в окружном и осевом направлениях симметрично перераспределяется относительно точки $\pi/4$. Прочность в радиальном направлении к точке $\pi/4$ достигает максимального значения, затем возвращается к начальной величине.

На рисунке 4.8 представлены полученные зависимости для модулей сдвига от угла армирования в предельные моменты времени.

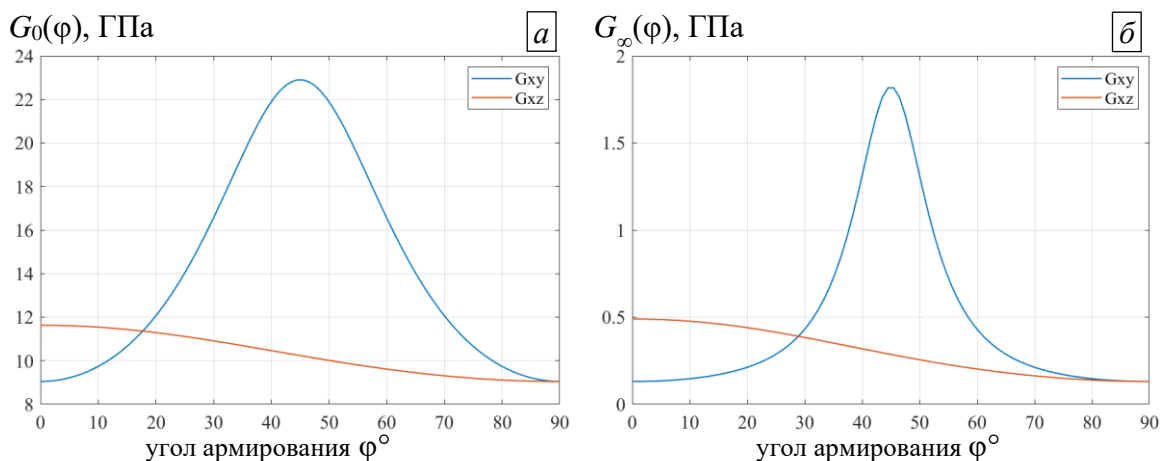


Рисунок 4.8 – Зависимость модулей сдвига от угла армирования:
 a – мгновенные значения; b – длительные значения

Получено, что модуль сдвига в плоскости xy симметричен относительно точки $\pi/4$, в плоскости xz снижается по мере увеличения угла армирования и в точке $\pi/2$ достигает минимального значения.

Реализованный алгоритм позволил получить необходимый набор данных для описания термовязкоупругого поведения слоистого композиционного материала при переменном угле армирования. Полученные данные носят дискретный характер как по углу армирования, так и по времени. На основе полученных данных построены аппроксимации, описанные в главе 2, для материалов с углом армирования, изменяющимся от 0 до $\pi/2$.

Для учета изменения механических характеристик материала оболочки на донных участках предложено разбить поверхность на отдельные участки вдоль оси изделия. На каждом участке предполагается постоянный радиус и механические характеристики, соответствующие углу армирования на данном радиусе. Схематическое представление алгоритма реализации описанной процедуры представлен на рисунке 4.9, где R_i – текущий радиус; φ_a – соответствующий угол армирования; ССК – сферическая система координат; ЭСК – элементная система координат.

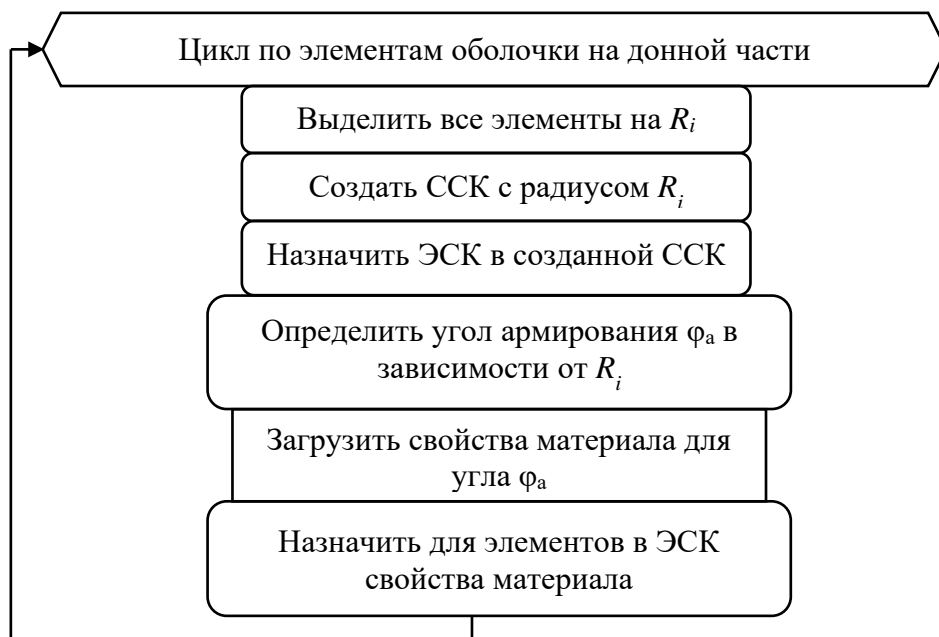


Рисунок 4.9 – Алгоритм назначения свойств на донных участках

При построении конечно-элементного аналога для реализации предложенного подхода последовательно выделяются элементы, расположенные на одном радиусе, затем для этих элементов генерируются сферические системы координат с центром, равноудаленным от выделенных элементов. Затем в каждом выделенном элементе создается локальная система координат, ориентированная

согласно сгенерированной на предыдущем шаге. Затем по значению текущего радиуса определяется соответствующий угол укладки волокон, для которого берутся эффективные термовязкоупругие характеристики материала оболочки. Взаимное расположение локальных и глобальной систем координат на различных участках оболочки показано на рисунке 4.10.

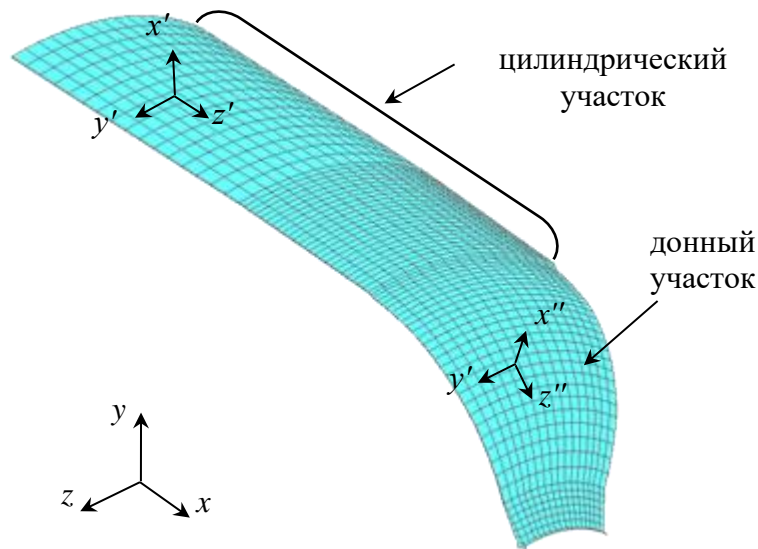


Рисунок 4.10 – Расположение систем координат конструкции

Системы координат в элементах на цилиндрическом участке ($x'y'z'$) – цилиндрические, на донном участке ($x''y'z''$) – сферические. При этом свойства материала оболочки учитываются таким образом, чтобы на всей протяженности оболочки продольный модуль пакета (E_x) соответствовал направлениям y , поперечный направлениям z в элементных системах координат. В результате реализации предложенного метода описания механического поведения композиционной оболочки при построении конечно-элементного аналога получено, что оболочка состоит из набора материалов, свойства каждого из которых описывают эффективное термовязкоупругое поведение пакета с определенной схемой армирования, которая изменяется вдоль профиля донного участка. На рисунке 4.11 продемонстрирован результат работы алгоритма в виде дискретного аналога, на котором цвета соответствуют номерам материалов.

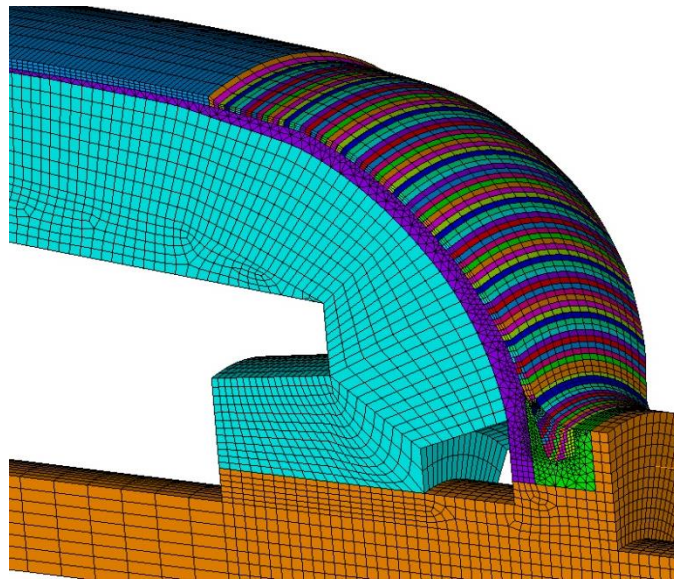


Рисунок 4.11 – Результат работы алгоритма назначения свойств на донных участках

Предложенный алгоритм и полученный конечно-элементный аналог конструкции позволяют учесть на донных участках изменение угла укладки армирующих лент от экватора до полюсного отверстия, а также геометрически верное направление осей локальных систем координат, что в результате позволяет корректно учесть усилия от натяжения лент и распределения физико-механических свойств ортотропного материала. Учет сложного распределения механических характеристик ортотропной оболочки позволит получить более точное распределение напряжений в оболочке и давления на поверхности формообразующей оправки на донных участках.

4.3. Начальные и граничные условия для решения нестационарной задачи теплопроводности

Для определения изменения температурных полей в процессе термообработки необходимо решить задачу нестационарной теплопроводности, постановка которой приведена в разделе 3.4. Начальным условием для решения задачи нестационарной теплопроводности является T_0 – температура окружающей среды, которая последовательно меняется согласно режиму термообработки. Граничные условия определяются через значение α_T – коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой, имеющей температуру T_{cp} .

При численном решении задач нестационарной теплопроводности необходимо определять значение коэффициента конвективного теплообмена с окружающей средой. В общей теории теплопередачи α_T зависит от физических свойств среды и ряда внешних факторов, таких как градиент температуры, скорость потока воздуха, геометрия тела, удаленность источников тепла от нагреваемых поверхностей [147, 148].

Для рассматриваемой конструкции значение α_T можно вычислить согласно работе [147] по соотношениям, которые приводятся для случая поперечного обтекания трубы в условиях естественной конвекции:

$$\begin{aligned} \text{Re}_ж &= \frac{\omega d}{\nu_ж}, \\ \text{Nu}_ж &= 0,245 \text{Re}_ж^{0,6}, \\ \alpha &= \text{Nu}_ж \frac{\lambda_ж}{d}, \end{aligned}$$

где $\text{Re}_ж$ – число Рейнольдса; $\text{Nu}_ж$ – среднее число Нуссельта для поверхности; α – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи; ω – скорость потока воздуха; d – диаметр трубы; $\nu_ж$ – кинематический коэффициент вязкости воздуха; $\lambda_ж$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Для трубы с заданным диаметром, параметрами воздуха при 100 °С и скорости потока 5 м/с коэффициент α_T получен равным 12,29 Вт/(м²·°С). Проверка применимости выбранных соотношений проведена на тестовой модели с последующим сравнением полученных результатов численного решения со значениями, полученными при термометрии реальной конструкции. В рамках тестовой задачи рассмотрена область, состоящая из трех прямоугольников, длиной 1 м и высотами, равными толщинам элементов конструкции. Теплофизические характеристики материалов были предоставлены предприятием-производителем намоточной конструкции. Для оболочки и разделительного слоя данные были предоставлены для комнатной температуры. Теплофизические характеристики материала оправки были предоставлены для четырех температур – 20, 50, 100,

150 °С. Поскольку расчетная область состоит из материалов с различными теплофизическими характеристиками, систему уравнения (34)–(37) необходимо дополнить граничными условиями на границе их сопряжения:

$$T_{1\Gamma} = T_{2\Gamma},$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} \right)_{\Gamma} = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} \right)_{\Gamma},$$

где T_1, T_2 – температуры на границе двух тел; $\lambda_{1,2}$ – коэффициенты теплопроводности двух тел; \mathbf{n} – вектор нормали к плоскости сопряжения.

Результаты сравнения полученного численного решения и термометрии реальной конструкции представлены на рисунке 4.12, а, в виде зависимости температуры на поверхности оправки от времени. Также на тестовой модели проведено исследование сходимости максимальной температуры в конструкции от количества разбиений по толщине оболочки и разделительного слоя, которая представлена на рисунке 4.12, б.

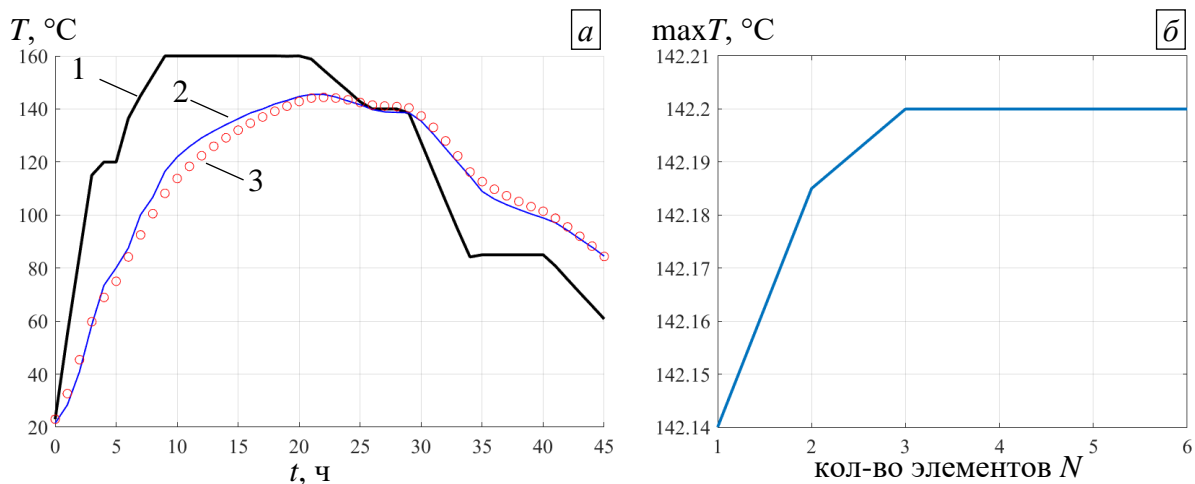


Рисунок 4.12 – Верификация тестовой задачи теплопроводности:

a – зависимость температур от времени; b – сходимость численного решения
 1 – режим термокамеры; 2 – термометрия конструкции, 3 – численное решение

Максимальное отклонение составило 5,7 % на 10-м часу термообработки. Среднее отклонение составило порядка 0,5 %. Тем не менее погрешность лежит в допустимых для инженерных расчетов интервалах. Сходимость решения достигается при разбиении толщин разделительного слоя и оболочки на 3 элемента.

Поскольку коэффициент теплоотдачи в условиях свободной конвекции вокруг цилиндрической трубы зависит от ее диаметра, решено разделить реальную конструкцию на 3 зоны по средним диаметрам. Первая зона – протяженный цилиндрический участок. Вторая зона – поверхности сферических днищ. Третья зона – свободные поверхности технологической оснастки. Зоны действия коэффициентов теплоотдачи и вычисленные значения приведены на рисунке 4.13.

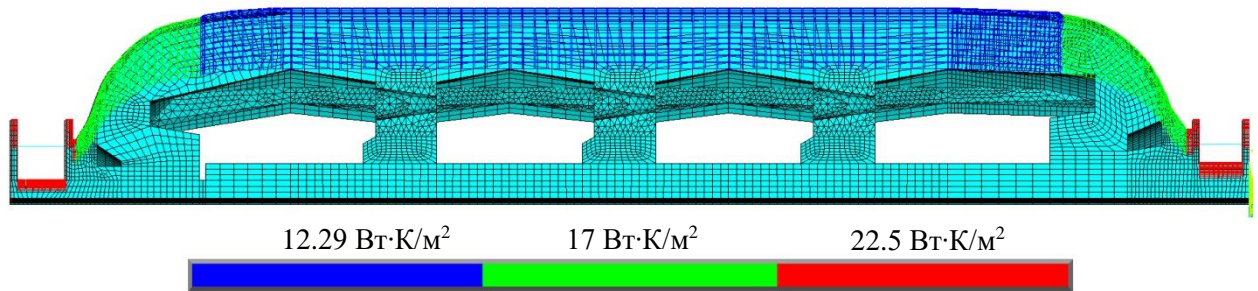


Рисунок 4.13 – Зоны и значения коэффициентов конвективного теплообмена

При построении конечно-элементного аналога учтено, что для разделительного слоя и оболочки необходимо задать минимум 3 элемента по толщине. Для решения использовались трехмерные элементы с одной степенью свободы, для соответствующих зон на поверхности конструкции задавались граничные условия с помощью α_T и значения температуры окружающей среды в каждый момент времени. Временной шаг при численном решении задачи составлял один час, изменение температуры на каждом временном шаге осуществлено линейно за 10 итераций.

Для верификации решения сформулированной задачи нестационарной теплопроводности намоточного изделия в процессе изготовления проведено сравнение полученных результатов с термометрией реальной конструкции по 6 точкам, в которых были расположены термопары. На рисунке 4.14 показаны зависимости показания температур термокамеры («печь»), термопар с реальной конструкции («эксперимент»), численного решения («расчет») в контрольных точках от времени.

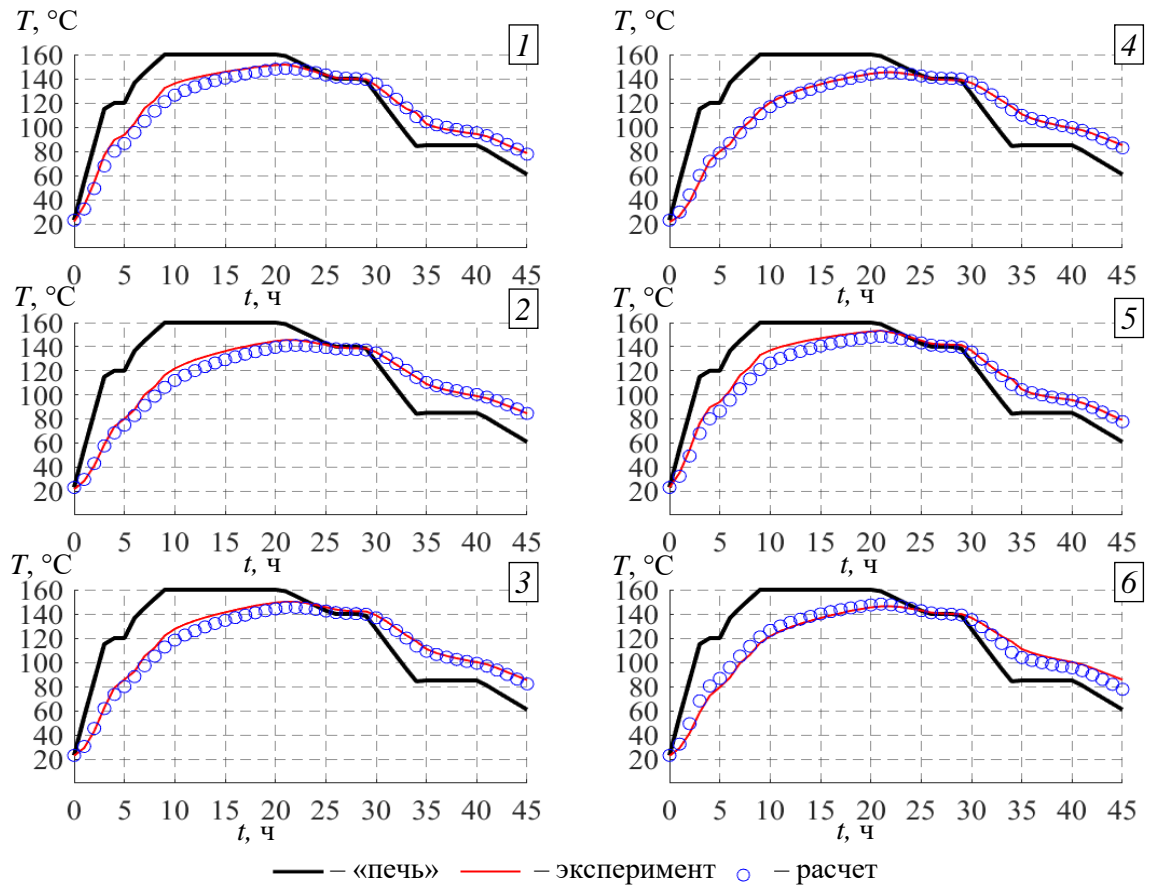


Рисунок 4.14 – Сравнение численных результатов с термометрией конструкции

Полученные в результате расчета зависимости температур в контрольных точках идентичны данным термометрии реальной конструкции. Относительная погрешность численного решения не превысила 6 %, максимальные отклонения наблюдаются при нагреве, когда расхождение расчетной и реальной температур достигает 10 °С, при этом расчетное значение ниже. На этапе выдержки вычисленные значения достигают реальных, затем в процессе охлаждения результаты идентичны. Таким образом, сформулированная краевая задача нестационарной теплопроводности для намоточной конструкции в процессе изготовления позволяет с достаточной точностью спрогнозировать температурные градиенты в исследуемой области, необходимые для учета температурных деформаций и зависимостей физико-механических характеристик материалов.

4.4. Начальные и граничные условия для решения квазистатической краевой задачи

Сформулированная для исследуемого процесса изготовления математическая постановка квазистатической задачи механики приведена в разделе 3.4. Начальными условиями в рассматриваемой задаче выступают эффективные начальные напряжения, которые реализуются в материале оболочки в процессе намотки под действием усилия натяжения армирующих лент. Эффективные начальные усилия от укладки волокон для оболочки определялись на представительском объеме композиционного материала, аналогично процессу определения эффективных характеристик пакета для цилиндрического и донных участков. В конечно-элементном аналоге рассматриваемой конструкции учтены начальные напряжения в элементах оболочки, ориентированные согласно элементным системам координат, что позволяет корректно учесть неравномерность распределения начальных напряжений.

В начальных условиях, кроме усилий от натяжения лент, необходимо учесть влияние технологической оснастки, предназначенной для фиксации формообразующей оправки на сборочном валу. Для имитации работы оснастки в конечно-элементом аналоге достраиваются стержневые элементы, в которых задается начальное усилие, рассчитываемое по соотношению

$$\sigma_0 = \frac{F_3}{8 \cdot \pi \cdot r^2}$$

где F_3 – усилия на все болты, с одной стороны, Н; r – радиус стержневого элемента (в данном исследовании принят 12 мм). Расположение стержневых элементов показано на рисунке 4.15. Данный прием позволяет существенно упростить численный аналог реальной оснастки и учесть важный технологический фактор производства.

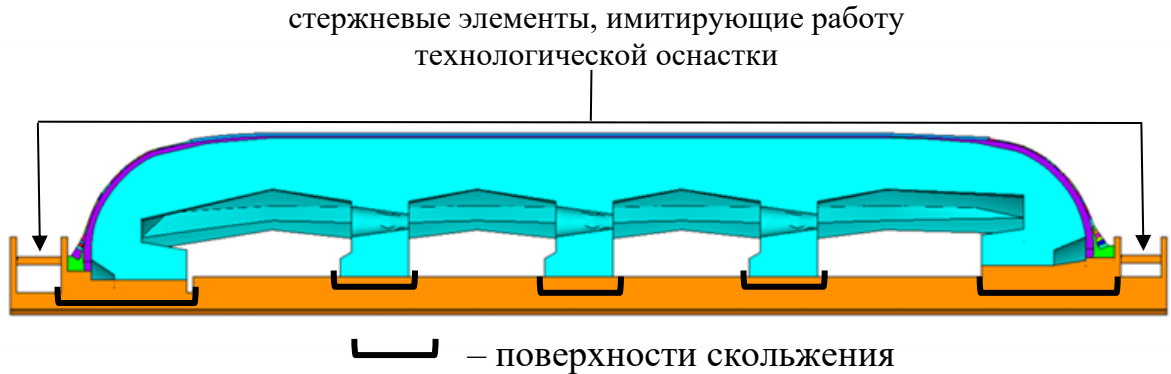


Рисунок 4.15 – Схема расположения стержневых элементов и поверхности скольжения

В реальной конструкции после укладки первого слоя оболочки фиксация формообразующей оправки снимается, вследствие чего опоры секций оправки далее могут свободно перемещаться вдоль вала. Для корректного учета данного момента производства при решении квазистатической задачи первый временной шаг решения разбивается на два. В нулевой момент времени в конструкции учитываются начальные напряжения в оболочке и оснастке, на следующем шаге стержневые элементы исключаются из расчетной области. Дальнейшее решение происходит согласно описанному ранее алгоритму (см. рисунок 4.1).

Учет свободных перемещений опор секций оправки реализован с помощью поверхностей скольжения (см. рисунок 4.15). Поверхности скольжения представляют собой контактные пары со свободным скольжением в осевом направлении. Общая математическая постановка (44)–(50) при этом дополняется условиями на границе между двумя телами:

$$u_i^1(\mathbf{X}, t) = u_i^2(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in S_K,$$

где u_i – компоненты вектора перемещений; S_K – поверхность сопряжения вала с опорами секций оправки.

Кроме граничных условий на поверхности сопряжения вала и опор секций оправки, для обеспечения периодичности рассмотренного объема конструкции применены ограничения перемещений на внешних поверхностях конструкции:

$$\begin{aligned} u_r(\mathbf{X}, t) &= 0, \mathbf{X} \in S_R, \\ u_\varphi(\mathbf{X}, t) &= 0, \mathbf{X} \in S_{\Phi_1} \cup S_{\Phi_2}, \\ u_z(\mathbf{X}, t) &= 0, \mathbf{X} \in S_{Z_1} \cup S_{Z_2}. \end{aligned}$$

На рисунке 4.16 показаны области применения ограничений (*a*), ограничения в окружном (*б*) и осевом (*в*) направлениях.

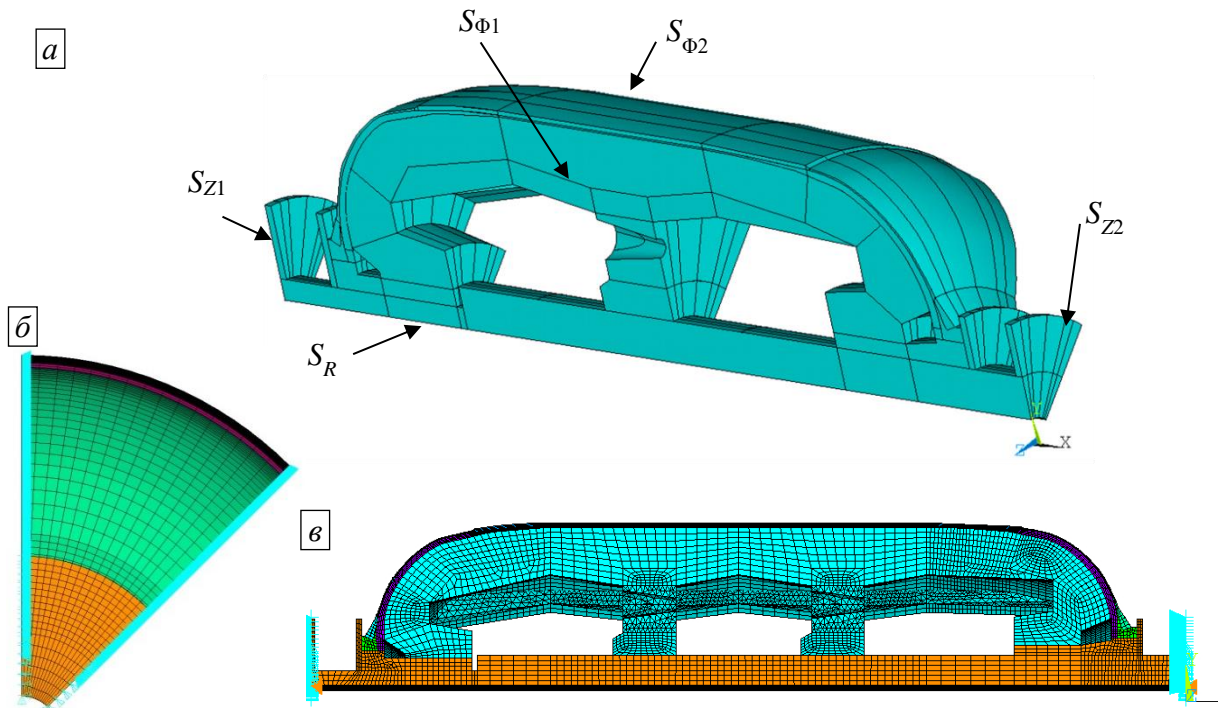


Рисунок 4.16 – Граничные условия задачи: *a* – общая система ограничений; *б* – ограничение перемещений по угловой координате; *в* – ограничение осевых перемещений

Учет приведенной системы граничных условий для конструкции позволяет сократить количество узловых неизвестных, тем самым обеспечить экономию вычислительных ресурсов, что весьма актуально при решении реальных задач в производственных условиях, когда на проведение исследования поведения конструкции отводятся сжатые сроки, а также не всегда обеспечен доступ к высокопроизводительным ЭВМ.

4.5. Валидация и верификация численной модели

Разработка конечно-элементного аналога рассматриваемой конструкции велась с учетом требований ГОСТР 57700.10–2018 «Численное моделирование физических процессов». Основные требования, которые соблюдены в описанном конечно-элементном аналоге: для оболочки и ТЗП использовано 3 и более элементов по толщине; использована преимущественно структурированная сетка (до 90 % элементов); размеры элементов подобраны так, чтобы точно описывать нелинейные участки.

При проведении первого вычислительного эксперимента для отыскания эволюции НДС намоточной конструкции в процессе изготовления, согласно ГОСТ Р, были использованы трехмерные конечные элементы 2-го порядка. Общее время решения задачи составило 36 часов. Для сокращения времени численного решения задачи было проведен расчет с использованием элементов 1-го порядка аппроксимации. В силу нелинейности поведения материалов конструкции сравнение результатов решения проведено по величине абсолютного изменения длины оболочки в процессе изготовления. Полученные значения изменения длины и количество узлов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение вычислительных экспериментов 1–2

Тип элементов	Кол-во узлов	Длительность решения, ч	ΔL , м
1-го порядка	141 453	2	0,0045
2-го порядка	570 539	36	0,0041

Относительная погрешность составила 9,7 %, при этом время решения задачи сокращается в 18 раз. Дальнейшую верификацию решено провести для конечно-элементной модели с аппроксимацией 1-го порядка. Проведено 3 вычислительных эксперимента при увеличении количества узлов в рассматриваемой модели. Полученные решения сравнивались по значению абсолютного изменения длины оболочки к концу процесса изготовления:

Кол-во узлов	50 581	141 453	311 745
ΔL , м	0,0053	0,0045	0,0041

Установлено, что при увеличении количества узлов до 311 745, полученное изменение длины оболочки равно результату, полученному при использовании элементов 2-го порядка, но при этом длительность решения составила около 4 часов. Таким образом переход к элементам 1-го порядка оправдан с позиции экономии вычислительных ресурсов и быстрого получения решения, точность которого сопоставима с решением, получаемым с помощью элементов 2-го порядка.

Для верификации разработанного метода решения задачи описания термовязкоупругого поведения намоточной конструкции в процессе изготовления

проведена оценка изменения длины оболочки на этапе термообработки. Предприятием – производителем оболочек были предоставлены данные о длине серии оболочек после намотки и удаления формообразующей оправки. На основе имеющихся экспериментальных данных было вычислено среднее значение изменения длины оболочки между двумя этапами изготовления. Аналогичное значение определялось на основе полученного численного решения. В таблице 4.2 приведены данные, полученные для реальной конструкции и двух численных решений. Численные решения отличались учетом термовязкоупругих свойств оболочки. Результаты, представленные в таблице 4.2 получены для конечно-элементного аналога из 141 453 узлов с элементами 1-го порядка аппроксимации.

Оценка изменения длины оболочки проведена между окончанием этапа намотки и после удаления формообразующей оправки.

Таблица 4.2 – Изменение длины оболочки в процессе изготовления

Параметр	Реальная конструкция	Модель с упругой оболочкой	Модель с вязкоупругой оболочкой
Изменение длины, мм	-2,3±1,7	-10,68	-2,59
Отн. изменение длины, %	-0,08	-0,39	-0,09

В результате численного решения при рассмотрении упругой модели поведения оболочки изменение длины оболочки в 4,5 раза выше, чем в реальной конструкции. При учете термовязкоупругости материала оболочки изменение общей длины оболочки меньше на 12 % относительно медианного значения. На основе полученных результатов сделан вывод, что при использовании конечно-элементного аналога из 141 453 узлов с элементами 1-го порядка аппроксимации численное решение позволит получить достоверные данные для описания качественных и количественных закономерностей основных параметров деформационного поведения конструкции в процессе изготовления. Серия вычисленных экспериментов подтвердила, что при проведении исследований поведения крупногабаритных намоточных изделий необходимо учитывать

термовязкоупругие зависимости механических свойств материалов оболочки и формообразующей оправки.

Выводы по главе

Предложены и описаны основные принципы разработанного конечно-элементного аналога для исследуемой конструкции. Описаны алгоритмы параметризации и автоматизации построения дискретного аналога. Уточнены начальные и граничные условия задач нестационарной теплопроводности и краевой квазистатической задачи механики, которые позволяют учесть особенности нагружения и работы конструкции в процессе изготовления. Приведены данные верификации и валидации численного решения. Получены решения при использовании двух типов элементов, для двух моделей поведения наматываемой оболочки. Проведено сравнение результатов решений по изменению длины конструкции на наборе сгущающихся сеток.

На основе приведенных выше сведений для дальнейшего исследования и анализа деформационного поведения намоточного изделия в процессе изготовления выбраны степень дискретизации, физические соотношения, системы начальных и граничных условий.

5. АНАЛИЗ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ НАМОТОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В главе представлены результаты решения задачи нестационарной теплопроводности и краевой задачи механики деформируемого твердого тела. Представлены зависимости температурных градиентов в конструкции на протяжении процесса термообработки, пространственные и временные распределения перемещений и интенсивностей напряжений в конструкции, рассмотрены отдельные элементы конструкции, получены зависимости осредненного давления на поверхности формообразующей оправки.

5.1. Анализ решения задачи нестационарной теплопроводности

В результате численного решения задачи о нестационарной теплопроводности в исследуемой конструкции при естественной конвекции проведена оценка эволюции температур в элементах конструкции. Полученное решение расширило представления о реальном распределении температур в элементах конструкции по времени для рассматриваемого технологического процесса. Полученные распределения температуры по времени в секциях оправки для трех зон оправки представлены на рисунке 5.1.

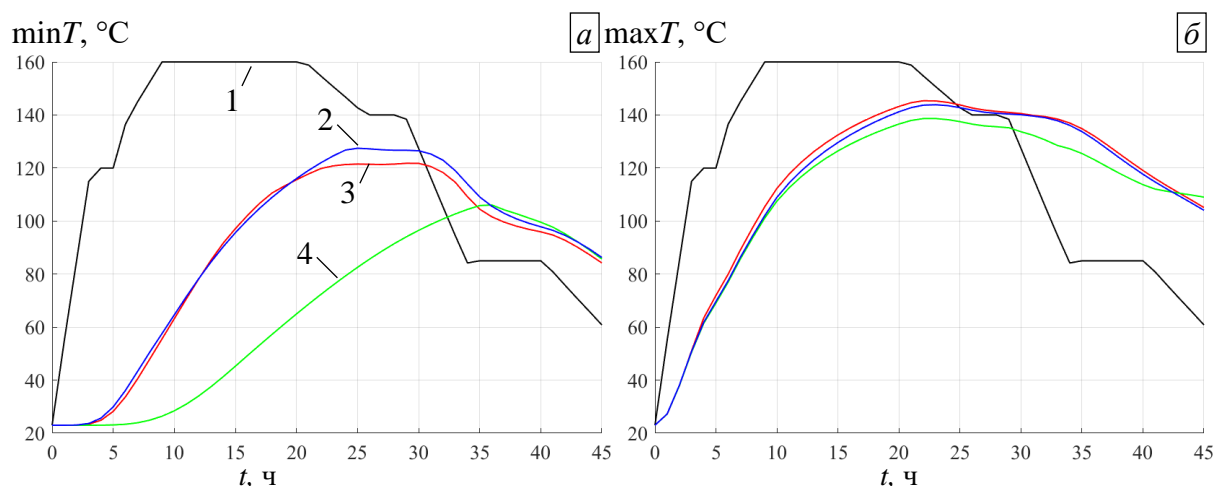


Рисунок 5.1 – Зависимости температур в оправке от времени:

a – минимальные значения; *б* – максимальные значения;

1 – печь; 2 – правая секция; 3 – левая секция; 4 – центральная секция

Максимальные значения температур во всех зонах лежат на одном уровне. Максимальная температура в оправке составляет 145 °С. В центральной секции

оправки выявлены зоны, которые прогреваются до максимального значения $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средние температуры в донных секциях оправки совпадают и выше, чем в центральной секции, что объясняется меньшей толщиной оболочки на этих участках, а также меньшим объемом материала оправки. Наибольшее расхождение температур происходит на интервале 25–30 часов и составляет $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Весь объем материала достигает температуры $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что должно обеспечить возможность дальнейшего разрушения оправки под действием водяного пара. Опоры центральной секции прогреваются до значения $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ с запаздыванием в 10 часов, после чего начинается процесс охлаждения. Общее время выдержки полностью прогретой оправки при температуре выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет порядка 10 часов.

Распределения минимальных и максимальных температур в оболочке представлены на рисунке 5.2.

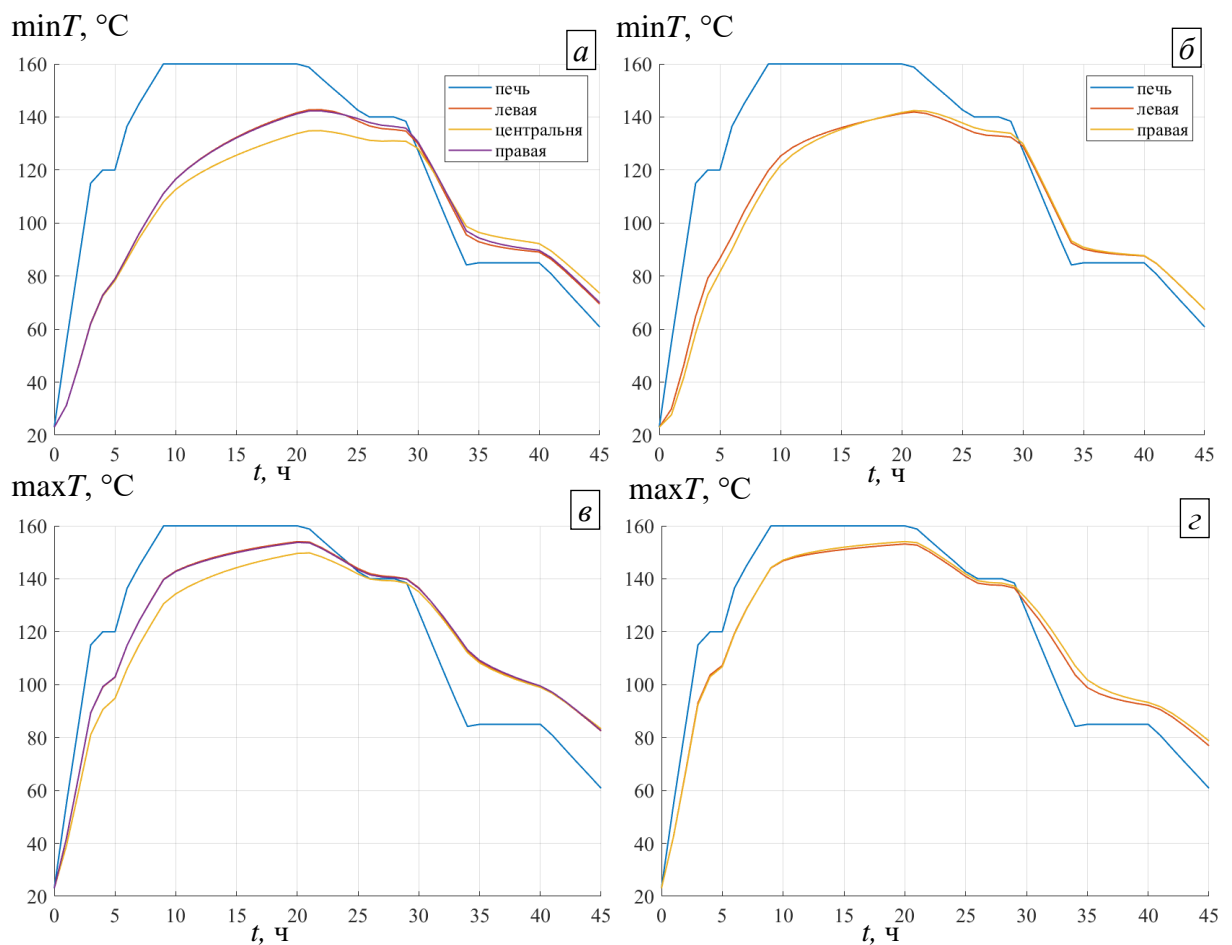


Рисунок 5.2 – Зависимость температур в оболочке от времени:

а, в – участки оболочки; *б, г* – зоны полюсных отверстий

Для удобства анализа оболочка была разделена на 5 зон. Рассмотрены левый и правый донные участки, цилиндрический участок и две зоны около полюсных

отверстий. Максимальное расхождение температур по зонам составляет 6 %, таким образом, оболочка прогревается равномерно на всей протяженности. Минимальная температура составила 138 °С, максимальная – 155 °С на отдельных участках. Общее время выдержки оболочки при температуре выше температуры стеклования связующего составляет более 20 часов.

Для анализа распределения температурных полей по объему конструкции рассмотрены градиенты температур через 10, 20, 30 и 45 часов термообработки, представленные на рисунке 5.3.

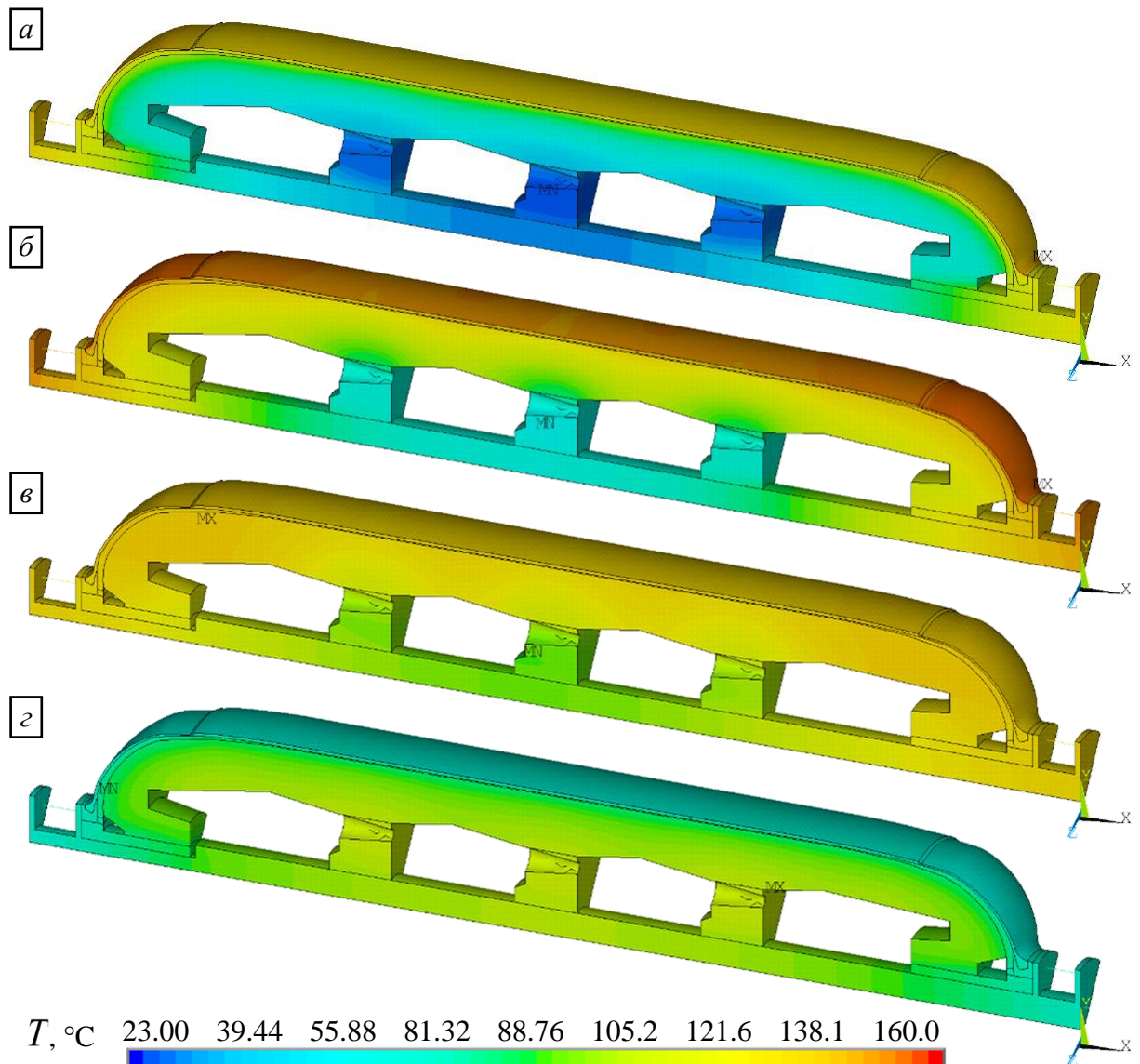


Рисунок 5.3 – Градиент температур в контрольные моменты времени

Анализируя полученные градиенты температур конструкции, можно отметить, что внешняя поверхность конструкции нагревается равномерно. Но за счет дополнительного прогрева донных секций оправки от сборочного вала на

этапе длительной выдержки при максимальной температуре соответствующие участки оболочки прогреваются на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем цилиндрический участок. Зоны с минимальными температурами расположены в опорах центральных секций оправки, к концу процесса термообработки температура в этих зонах выше, чем на внешней поверхности конструкции. На рисунке 5.3, *в* стоит отметить наличие локального максимума температуры в переходной зоне на концах цилиндрического участка, данный факт стоит связывать скорее с погрешностью численных процедур ввиду особенностей конечно-элементной сетки в этом месте.

5.2. Анализ напряженно-деформированного поведения конструкции в процессе изготовления

Для визуализации полей перемещений и напряжений рассмотрены 4 основных момента времени: **I** – начало процесса изготовления, когда к системе приложены начальные напряжения от натяжения лент и растягивающие напряжения в стержневых элементах для фиксации конструкции на сборочном валу; **II** – момент, соответствующий окончанию намотки и началу термообработки; **III** – момент окончания термообработки; **IV** – момент окончания суточной выдержки после удаления формообразующей оправки.

Для оценки изменения длины оболочки в процессе изготовления необходимо определить осевые перемещения ее крайних точек; поскольку полюсные отверстия связаны с закладными элементами, то изменения длины удобно оценивать по их перемещениям. На рисунке 5.4 представлены перемещения конструкции вдоль оси изделия для основных моментов времени. Из-за особенностей численных процедур реализации контактного взаимодействия правая секция оправки не имеет возможности свободно перемещаться вдоль оси изделия, поэтому левая часть конструкции сдвигается, а правая остается неподвижной.

В момент времени **I** (рисунок 5.4, *а*) получено что под действием начальных и граничных условий конструкция сжимается, к моменту **II** (рисунок 5.4, *б*) распределение перемещений остается идентичным, при этом увеличивается максимальное значение, поскольку начальные сжимающие напряжения в оболочке

продолжают воздействовать на конструкцию. К моменту времени **III** (рисунок 5.4, *в*) перемещения левой части конструкции снижаются, что указывает на то, что эта зона стремится к начальному положению за счет расширения оправки в процессе термообработки и перераспределения остаточных напряжений в материале оболочки из-за учета ее термовязкоупругости. В момент времени **IV** (рисунок 5.4, *г*) перемещения в зоне левого полюсного отверстия незначительно возрастают, что может свидетельствовать о сжатии оболочки после удаления оправки под действием остаточных напряжений.

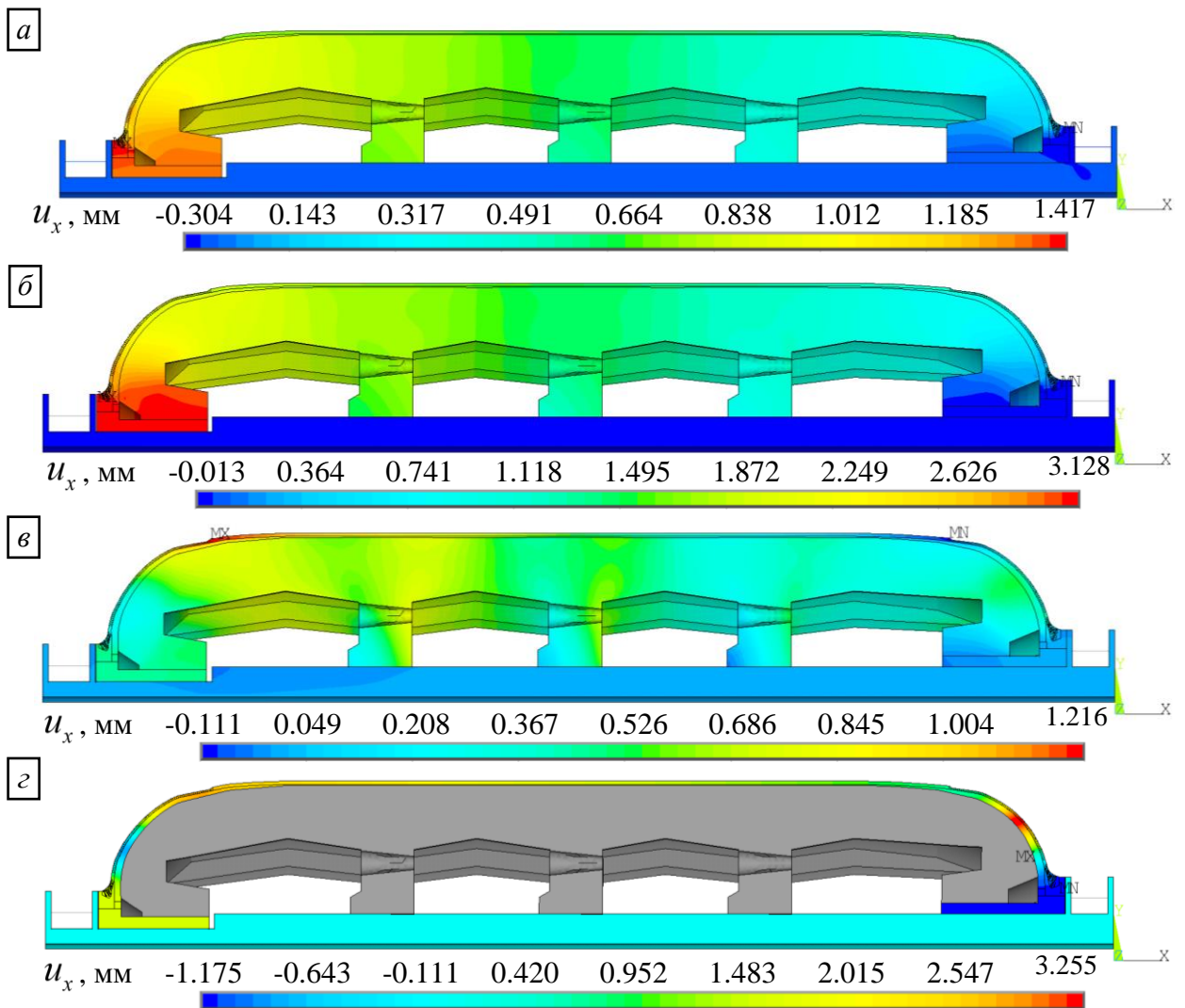


Рисунок 5.4 – Осевые перемещения конструкции:
 а – время **I**; б – время **II**; в – время **III**; г – время **IV**

Несмотря на то что осевые перемещения в реальной конструкции очевидно должны быть симметричны относительно середины изделия, полученное в результате решения изменение длины оболочки на 9 % ниже, чем в реальной конструкции. Изменения длины оболочки на основных контрольных моментах

времени соответствуют данным, полученным с производства. Для наглядной иллюстрации описанного механизма деформирования исследуемой конструкции на рисунке 5.5 представлена зависимость перемещений вдоль вала части оснастки, расположенной под левой секцией оправки.

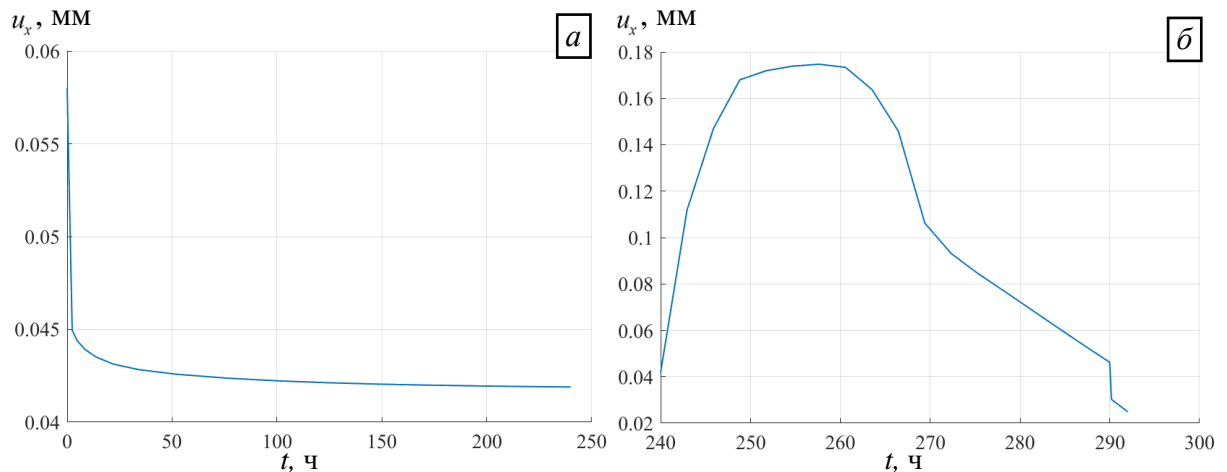


Рисунок 5.5 – Горизонтальные перемещения оснастки левого участка:
а – этап намотки; *б* – этап термообработки

Для удобства анализа поведения конструкции, перемещения вдоль сборочного вала представлены на двух временных интервалах: на рисунке 5.5, *а* рассмотрен этап намотки, на рисунке 5.5, *б* – этап термообработки. В начальный момент времени под действием начальных усилий в оболочке и стержневых элементах левая часть смещается к центру конструкции. На протяжении этапа намотки перемещения снижаются, что указывает на смещение рассматриваемой зоны в противоположную сторону. При нагревании конструкции перемещения равномерно возрастают, что характеризует сжатие конструкции в осевом направлении. При выдержке на максимальной температуре перемещения незначительно возрастают, после чего вслед за охлаждением начинают снижаться, то есть технологическая оснастка стремится к начальному положению.

Для оценки поведения конструкции в процессе термообработки также возможно измерение диаметра намотанной оболочки, однако на предприятии-производителе данные измерения не проводятся, из-за чего нет возможности верифицировать численное решение еще по одному параметру. Изменение диаметра конструкции можно определить по изменению в процессе изготовления

вертикальных перемещений конструкции. Поля вертикальных перемещений, полученные в результате численного решения, представлены на рисунке 5.6 для основных моментов времени.

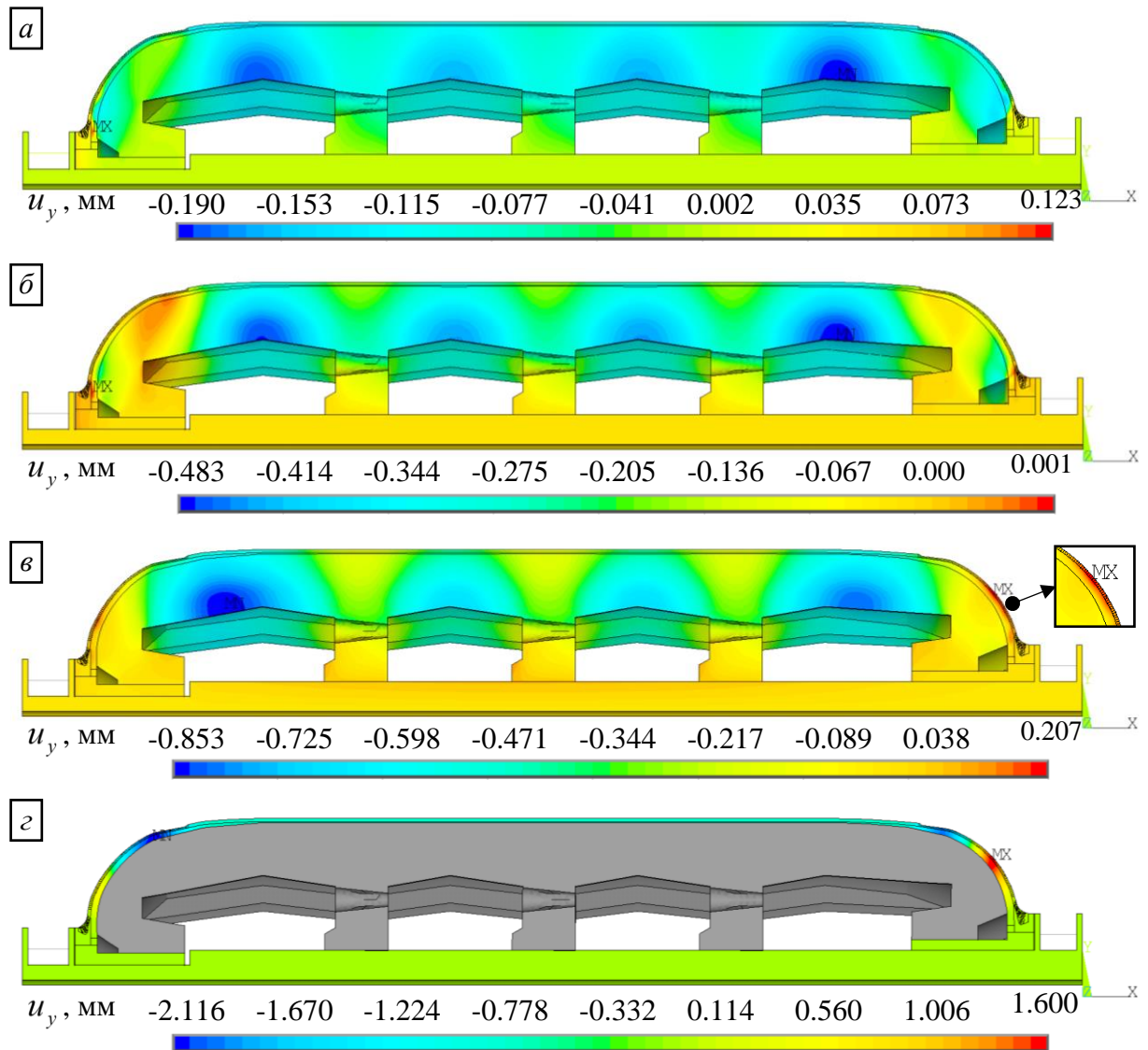


Рисунок 5.6 – Вертикальные перемещения конструкции:
 а – время I; б – время II; в – время III; г – время IV

Из анализа распределения и изменения вертикальных перемещений в процессе изготовления видно, что полученное численное решение отражает изменение габаритов конструкции. В момент времени I (рисунок 5.6, а) практически все области конструкции имеют отрицательные значения, что указывает на всестороннее сжатие, реализуемое из-за наличия начальных напряжений в оболочке и стержневых элементах. К моменту времени II (рисунок 5.6, б) абсолютная величина вертикальных перемещений увеличивается, из-за сохранения начальных напряжений в оболочке. В момент времени III

(рисунок 5.6, *в*) на донных участках появляются зоны с положительными значениями вертикальных перемещений, что указывает на вероятную зону возникновения отслоения оболочки от формообразующей оправки. Причиной формирования данной зоны может быть то, что в осевом направлении конструкция расходится, а в вертикальном направлении продолжается сжатие. К моменту **IV** (рисунок 5.6, *г*) в оболочке из-за действия остаточных напряжений формируется незначительная асимметрия вертикальных перемещений на донных участках: на правом дне реализуются максимальные положительные значения, на левом дне получены минимальные отрицательные значения. Перепад диаметров при этом составляет порядка 3 мм, что составляет менее 1 % от радиуса оболочки. Для подтверждения корректности принятой системы периодических граничных условий на рисунке 5.7 проиллюстрированы окружные перемещения в начальный момент времени.

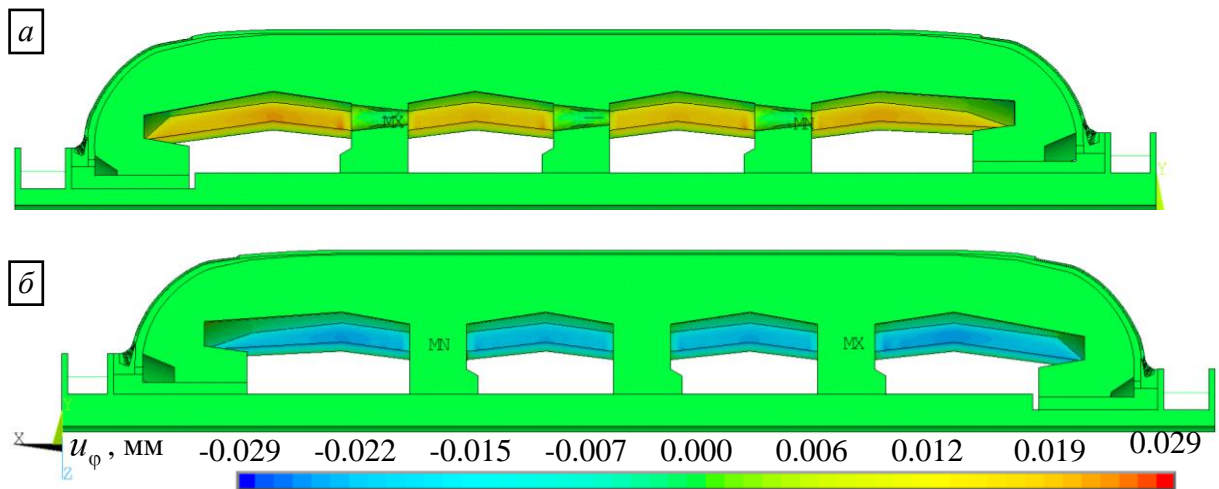


Рисунок 5.7 – Окружные перемещения в момент времени **I**:
a – вид слева; *б* – вид справа

Окружные перемещения в рассматриваемом сегменте симметричны и подтверждают, что конструкция в окружном направлении находится в стесненном состоянии под действием начальных усилий в наматываемой оболочке, что указывает на корректность выбранных начальных и граничных условий.

Для оценки прочности оправки в процессе изготовления получены первые главные напряжения в основные моменты времени, представленные на рисунке 5.8.

Полученные поля напряжений указывают, что оправка находится в сжатом состоянии, наблюдаются локальные положительные и отрицательные максимумы

в зонах геометрических концентраторов. В процессе изготовления значения первых главных напряжений на внешней поверхности оправки не превышают пределов прочности.

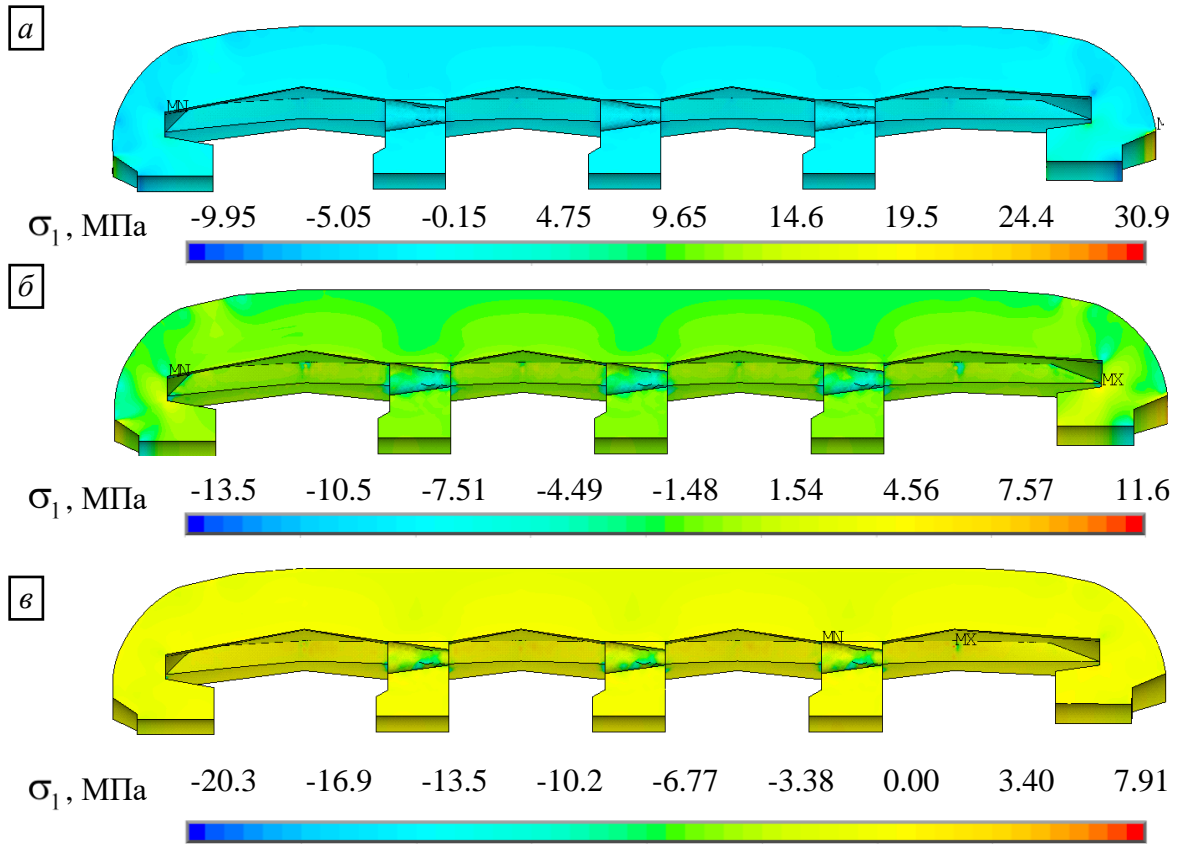


Рисунок 5.8 – Первые главные напряжения оправки:
а – время **I**; *б* – время **II**; *в* – время **III**

К окончанию процесса изготовления в областях технологических отверстий в опорах оправки отмечены зоны со значениями напряжений, превышающих предел прочности при сжатии. Полученные распределения напряжений подтверждают сохранность целостности внешней поверхности оправки в процессе изготовления оболочки.

Для анализа поведения и исследования закономерностей деформирования крупногабаритной намоточной конструкции в процессе изготовления рассмотрены пространственные и временные распределения интенсивностей напряжений в конструкции. Полученные в результате численного решения поля напряжений для основных моментов времени представлены на рисунке 5.9.

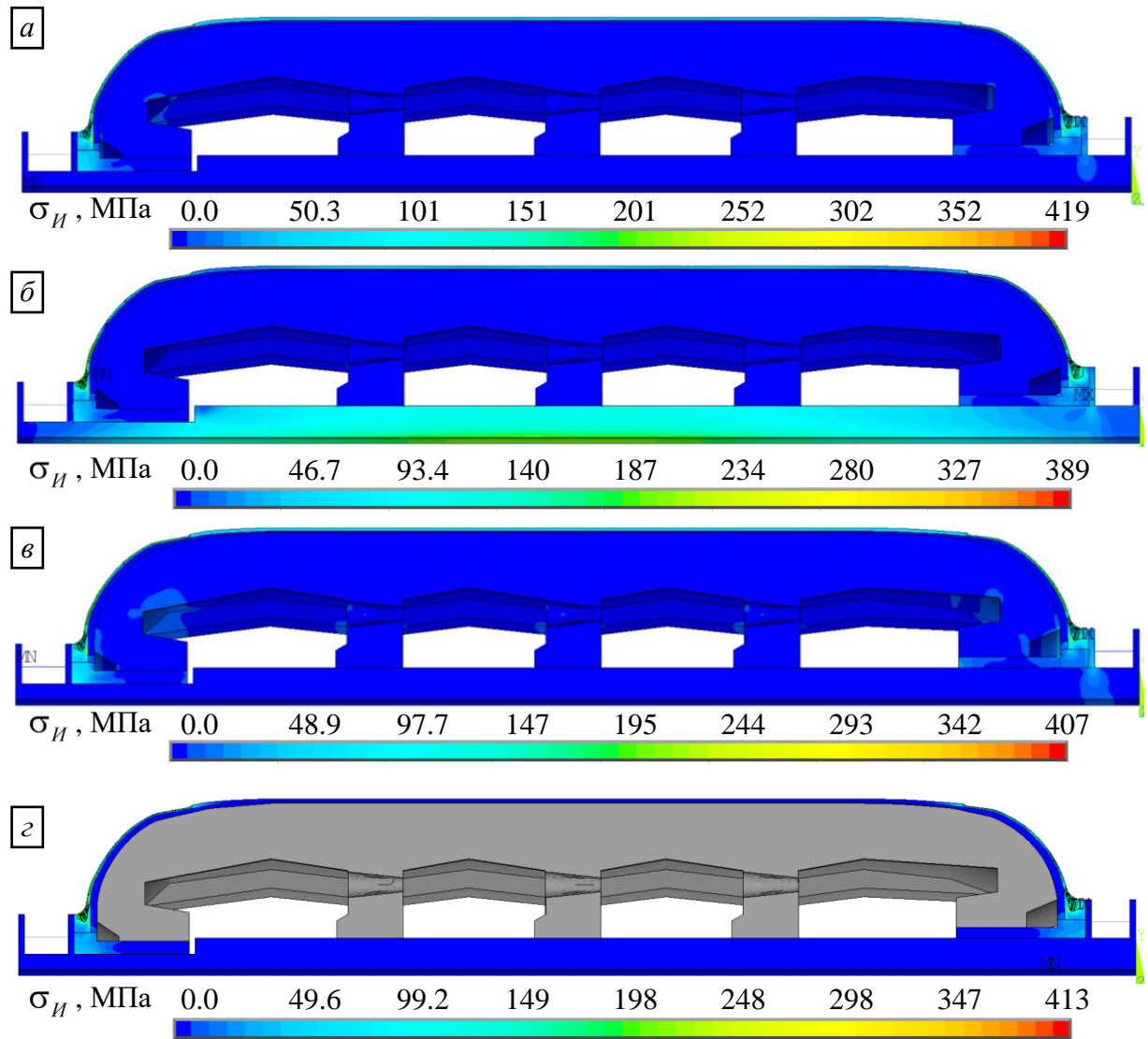


Рисунок 5.9 – Интенсивности напряжений конструкции:
a – время I; *б* – время II; *в* – время III; *г* – время IV

В начальный момент времени (рисунок 5.9, *a*) максимальные интенсивности напряжений реализуются в зоне полюсных отверстий оболочки, где установлены закладные элементы и реализуются начальные усилия в стержневых элементах для фиксации формообразующей оправки на сборочном валу. К моменту времени II наблюдается формирование зоны с величиной напряжений до 140 МПа в центральной части сборочного вала (рисунок 5.9, *б*), максимальные напряжения также остаются локализованными в зоне полюсных отверстий. К моменту времени III (рисунок 5.9, *в*) в результате температурного взаимодействия и расширения конструкции, напряжения в сборочном валу вернулись к начальным значениям. К окончанию процесса изготовления оболочки (рисунок 5.9, *г*) зоны с максимальными интенсивностями напряжений также расположены около

полюсных отверстий. При более детальном рассмотрении отмечено, что максимальные напряжения реализуются в элементах технологической оснастки, достигают 419 МПа, предел прочности материала, из которого изготавливаются эти элементы, составляет 500–600 МПа при сжатии.

Для комплексной оценки деформационного поведения проведен анализ поведения оправки на основе распределения интенсивностей напряжений в основные моменты времени, полученные для каждого случая поля напряжений представлены на рисунке 5.10.

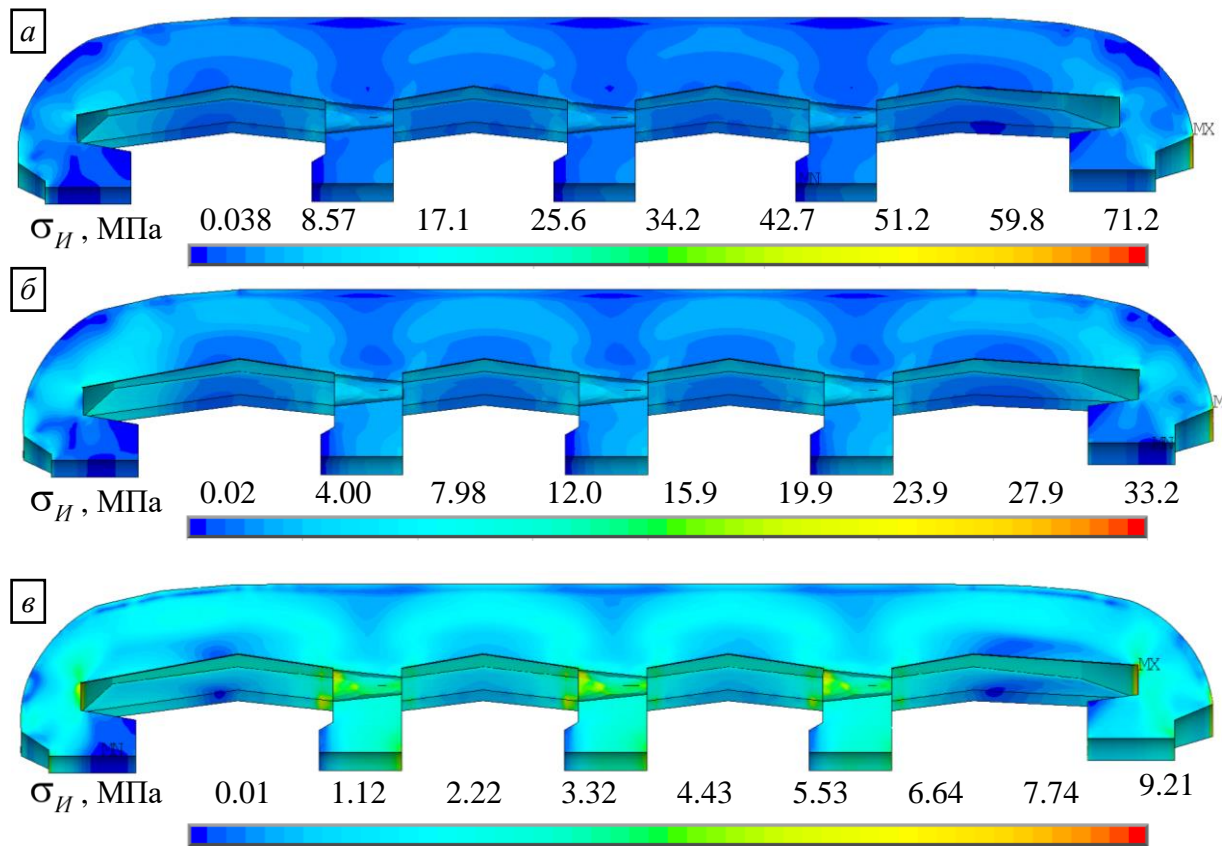


Рисунок 5.10 – Интенсивности напряжений оправки:
а – время I; б – время II; в – время III

Установлено, что в начальный момент времени (рисунок 5.10, а) максимальное значение напряжения составило 71,2 МПа, что превышает полученные значения предела прочности для материала оправки (см. гл. 2). Зона с максимальными напряжениями локализована на остром конце правой секции оправки. Данный факт объясняется наличием угла, который является естественным концентратором напряжений, а также мгновенным нагружением конструкции как начальными усилиями в оболочке, так и в стержневых элементах технологической

оснастки. В процессе изготовления за счет термовязкоупругого характера поведения материала оболочки напряжения в ней снижаются (рисунок 5.10, б–г), к моменту окончания этапа термообработки максимальные напряжения в оправке составили 9,21 МПа, что ниже предела прочности в 4 раза. Общий уровень напряжений лежит в интервале 2–4 МПа, что составляет порядка 8–10 % от предела прочности.

Для более детального анализа зоны с локальным максимумом на рисунке 5.11 представлены поля напряжений в правой секции оправки.

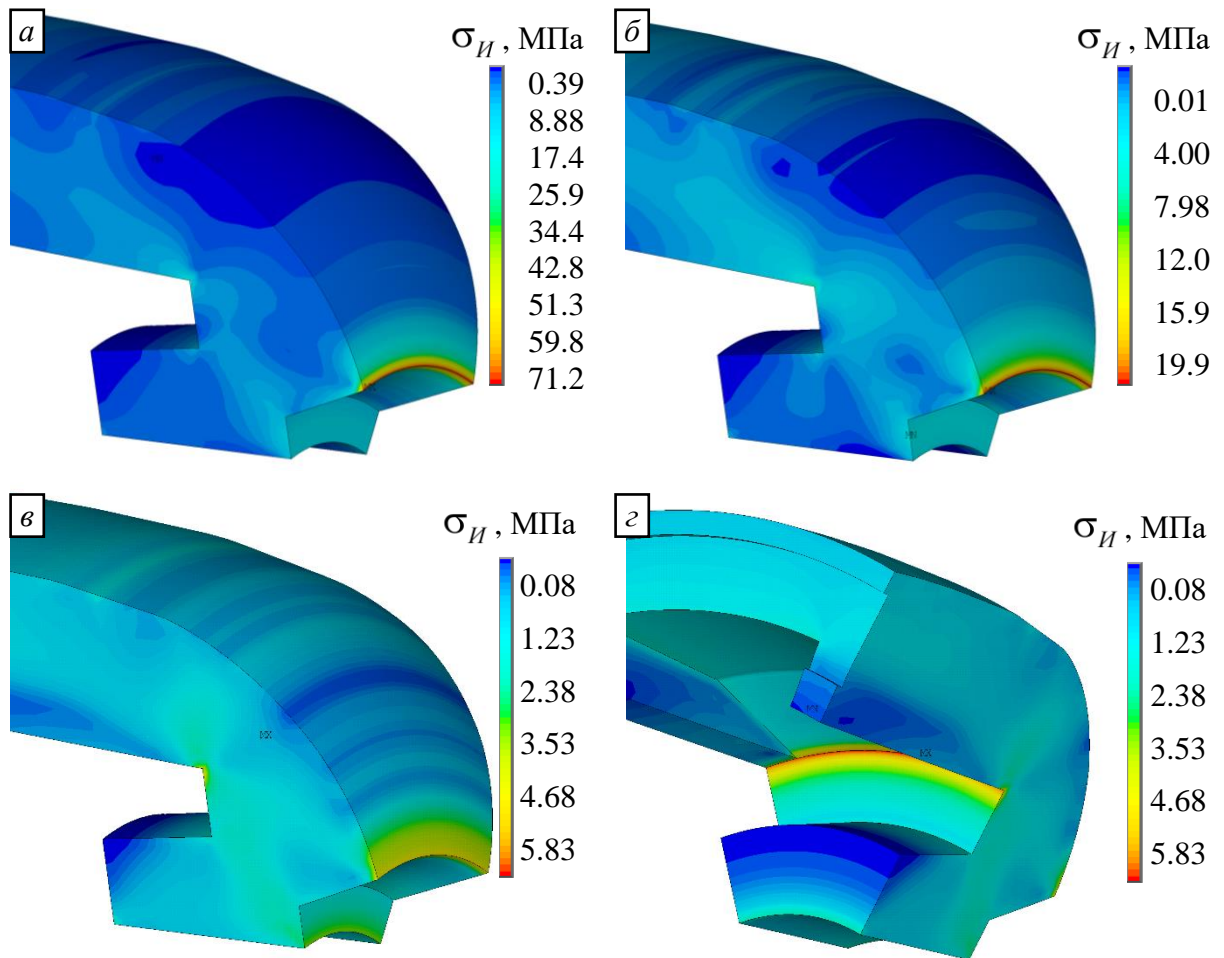


Рисунок 5.11 – Интенсивности напряжений в донной секции оправки:
 а – время I; б – время II; в – время III вид снаружи; г – время III вид изнутри

На этапе намотки локальный максимум расположен на внешней поверхности оправки, при этом видно, что градиент напряжений быстро сглаживается. На этапе термообработки происходит перераспределение напряжений и зона локального максимума смещается во внутреннюю часть секции оправки. Полученные значения и распределения интенсивностей напряжений формообразующей оправки

указывают на возможность локального разрушения оправки на свободном крае внешней поверхности. Поскольку данная зона расположена под слоем разделительного материала и закладного элемента, незначительное разрушение не может привести к нарушению внутренней геометрии наматываемой оболочки. Одним из способов повысить прочность в данной зоне может быть изменение геометрии в сторону сглаживания данного угла либо продления образующего профиля до соприкосновения со скользящей опорой.

Для полноты исследования поведения формообразующей оправки для двух моментов времени рассмотрены поля интенсивностей напряжений в центральной секции, полученные распределения представлены на рисунке 5.12.

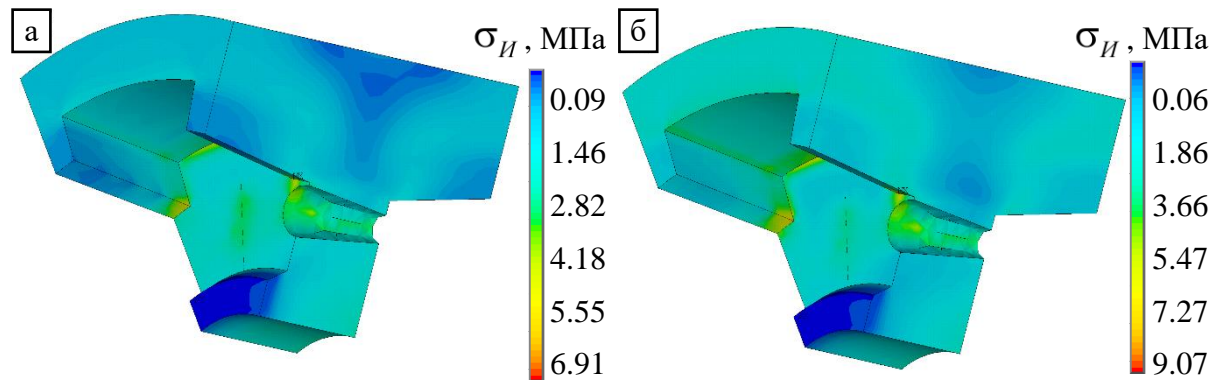


Рисунок 5.12 – Интенсивности напряжений в центральной секции оправки:
a – время **I**; *б* – время **III**

В центральной секции формообразующей оправки отмечено незначительное увеличение максимального значения напряжения к моменту времени **III**, вызванное сжимающими усилиями со стороны цилиндрического участка оболочки в процессе термообработки. Общий уровень напряжений составляет 2–3 МПа, что составляет порядка 5–7 % от предела прочности. Зоны с максимальными значениями напряжений носят локальный характер, сосредоточены в геометрических концентраторах. Общая картина распределения интенсивностей напряжений в формообразующей оправке соответствует системе нагружения, изменения во времени объясняются теплофизическими процессами, сопровождающими производственный цикл.

При исследовании поведения намоточной оболочки в процессе изготовления важно не только провести анализ напряженно-деформированного состояния

элементов конструкции, но и получить зависимость силовых параметров на поверхностях сопряжения формируемой оболочки с технологической оснасткой. Для исследования взаимодействия на границе сопряжения оправки и оболочки построены зависимости радиальных напряжений в элементах, прилегающих к внешней поверхности оправки. Полученные эпюры радиальных напряжений вдоль образующей оправки в основные моменты времени представлены на рисунке 5.13, где за время **II (1)** обозначен момент окончания выдержки при максимальной температуре.

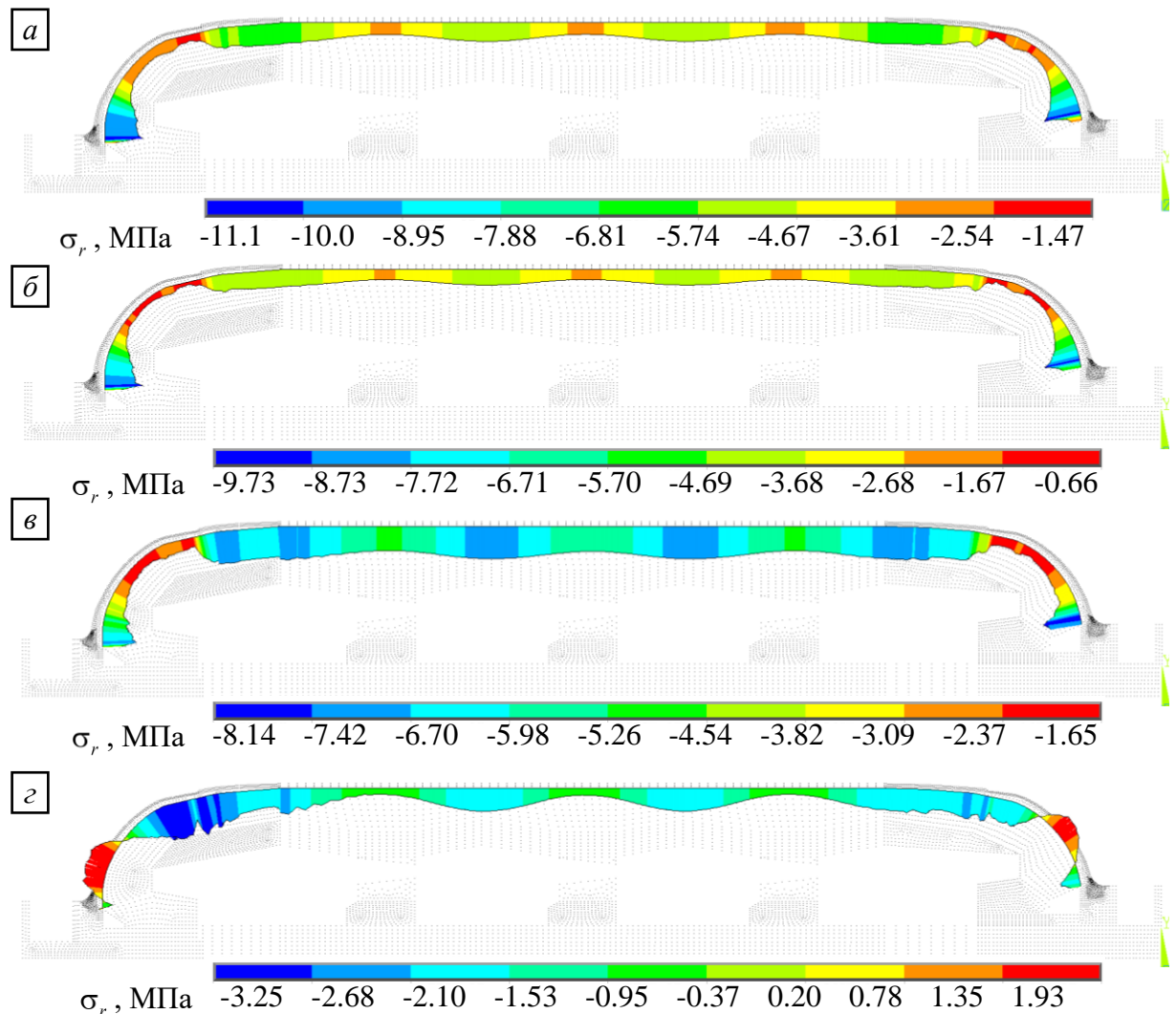


Рисунок 5.13 – Распределения радиальных напряжений по поверхности оправки:
 а – время **I**; б – время **II**; в – время **II (1)**; г – время **III**

На этапах намотки, нагрева и выдержки радиальные напряжения отрицательные, что указывает на всестороннее сжатие оправки со стороны изготавливаемой оболочки. Максимальные сжимающие усилия локализуются в зоне полюсных отверстий, на участке, расположенном под закладным элементом.

Величина радиальных напряжений в данной зоне лежит в интервале 8–10 МПа, что составляет 25–30 % от предела прочности материала оправки. К окончанию процесса охлаждения (рисунок 5.13, *г*) при термообработке 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 прогнозирования эволюции напряженно-деформированного состояния полимерной оболочки рассмотрены распределения первых главных напряжений и интенсивностей напряжений в оболочке, распределения которых для основных моментов времени представлены на рисунках 5.14 и 5.15.

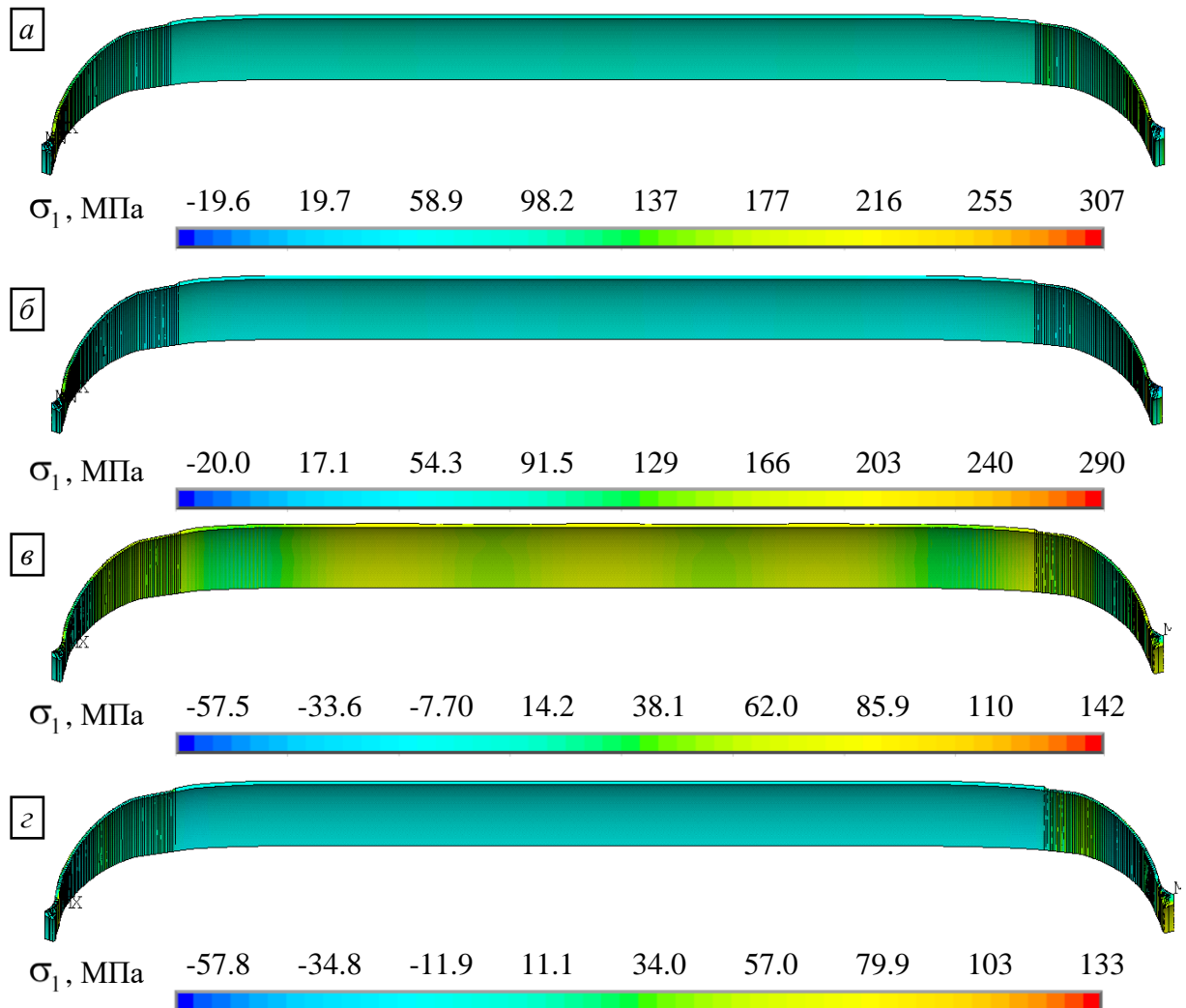


Рисунок 5.14 – Первые главные напряжения оболочки:
а – время I; *б* – время II; *в* – время III; *г* – время IV

Полученные распределения напряжений показывают, что оболочка подвергается растягивающим напряжениям, что является следствием действия растягивающих усилий при намотке. В зоне полюсных отверстий отмечено наличие зон сжатия, возникающих из-за учета действия на оболочку технологической оснастки (фиксирующего устройства). Согласно данным от предприятия-производителя оболочек предел прочности кольцевых образцов органопластика составляет не менее 2,5 ГПа, а для стеклопластика 1,1 ГПа. Максимальные остаточные напряжения реализуются в той части оболочки, которая состоит только из слоев органопластика, поэтому их величина составляет 5 % от заявленной прочности. Таким образом, в оболочке в процессе изготовления не превышены пределы прочности. Для комплексного анализа рассмотрены интенсивности напряжений, представленные на рисунке 5.15.

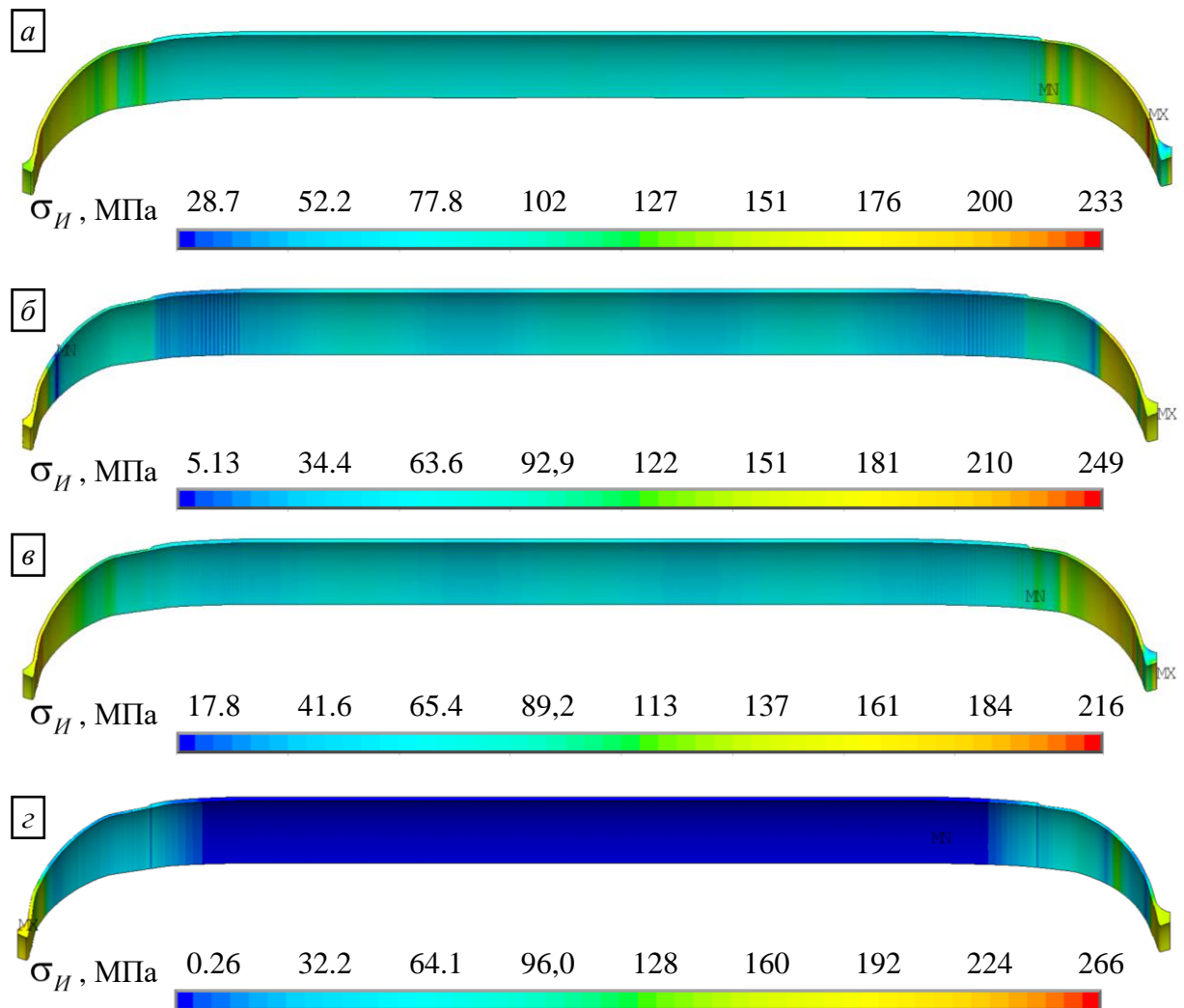


Рисунок 5.15 – Интенсивности напряжений оболочки:
 а – время I; б – время II; в – время III, г – время IV

Поля напряжений для оболочки симметричны относительно середины изделия. Максимальное значение напряжений составило 266 МПа к концу процесса изготовления (рисунок 5.15, *з*), критические зоны расположены около полюсных отверстий и имеют ярко выраженный локальный характер, что обусловлено взаимодействием оболочки с закладным элементом и технологической оснасткой. Напряжения в оболочке на цилиндрическом участке распределены равномерно и минимальны на всех этапах производства. На донных участках наблюдается градиент, с постепенным увеличением величины напряжений к полюсным отверстиям. Для уточнения напряженно-деформированного состояния оболочки в процессе изготовления дополнительно рассмотрены распределения интенсивностей напряжений в донных участках. Поля интенсивностей напряжений для основных моментов времени представлены на рисунке 5.16.

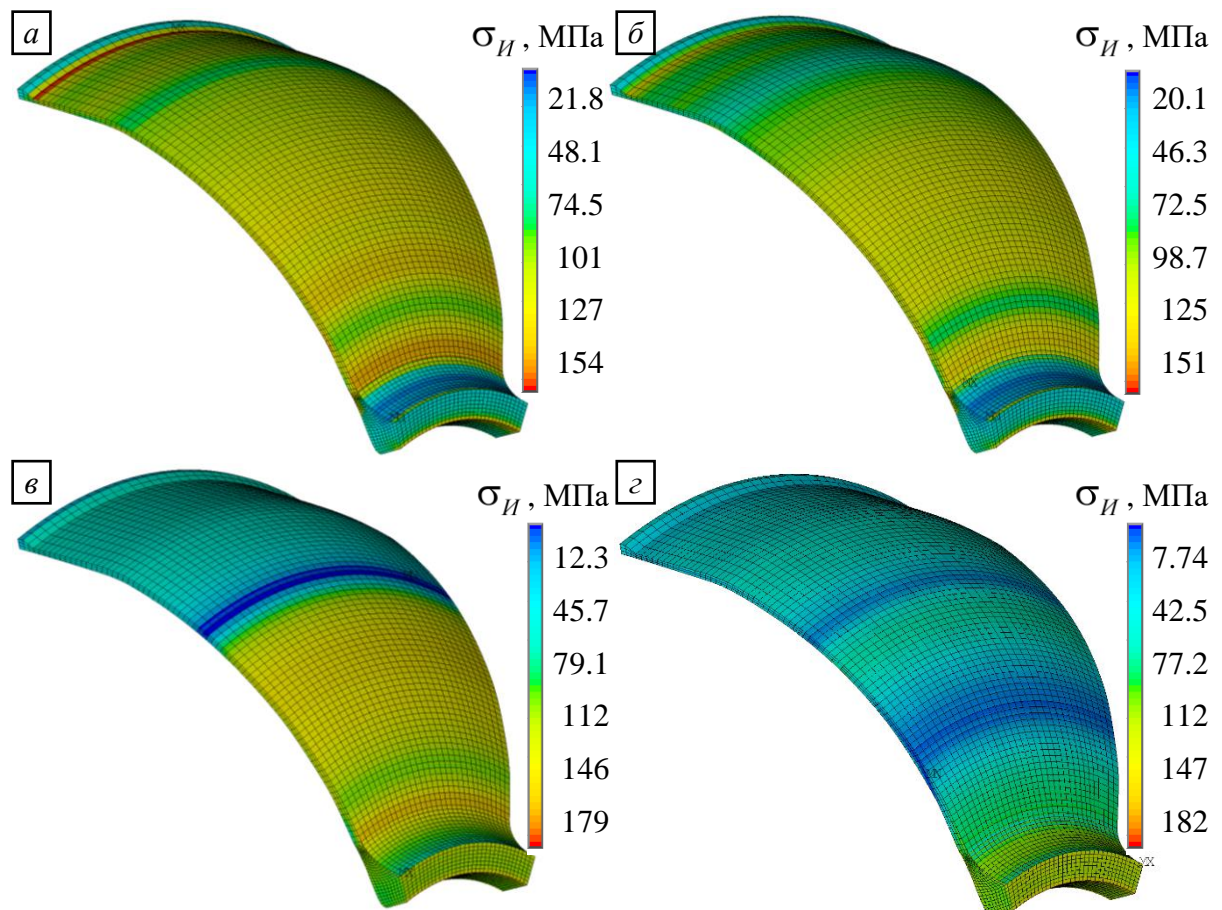


Рисунок 5.16 – Интенсивности напряжений донного участка оболочки:
a – время **I**; *б* – время **II**; *в* – время **III**; *з* – время **IV**

В начальный момент времени (рисунок 5.16, *a*) максимальные напряжения носят локальный характер и расположены в зоне перехода армирования оболочки

с цилиндрического участка на донный. В данной зоне на уровне конечно-элементной модели происходит резкое изменение механических характеристик материала оболочки, что может быть косвенной причиной локального максимума. К окончанию намотки минимальные и максимальные напряжения локализовались в зоне полюсного отверстия. К окончанию процесса термообработки зона минимальных напряжений сместилась к точке равнопрочности оболочки, которой соответствует угол армирования $\pi/4$. К окончанию процесса изготовления зоны локальных экстремумов смазываются. Максимальные остаточные напряжения сосредоточены около полюсного отверстия и достигают 297 МПа. Для полноты картины об остаточном напряженно-деформированном состоянии донного участка на рисунке 5.17 рассмотрены распределения компонент тензора напряжений в сферической системе координат.

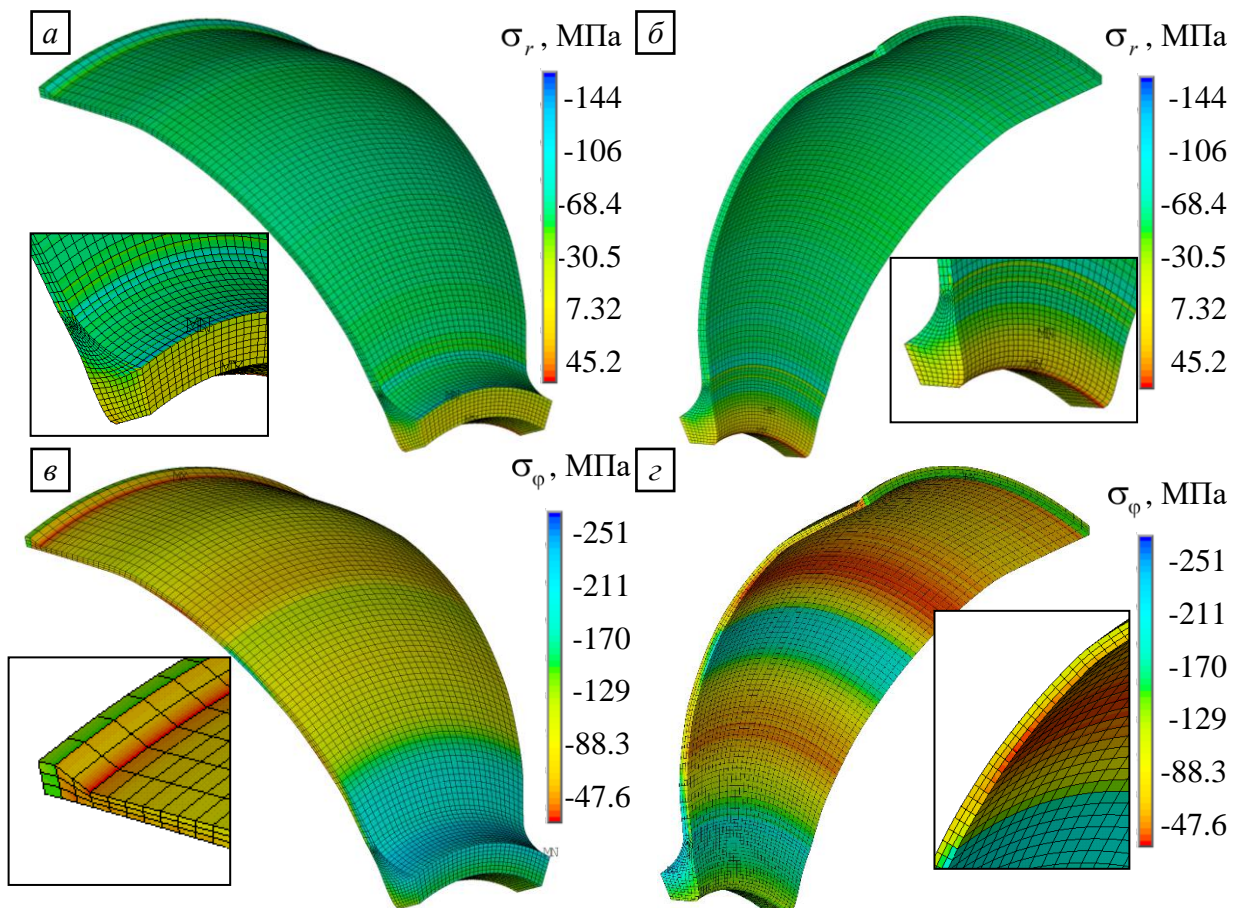


Рисунок 5.17 – Остаточные напряжения донного участка оболочки

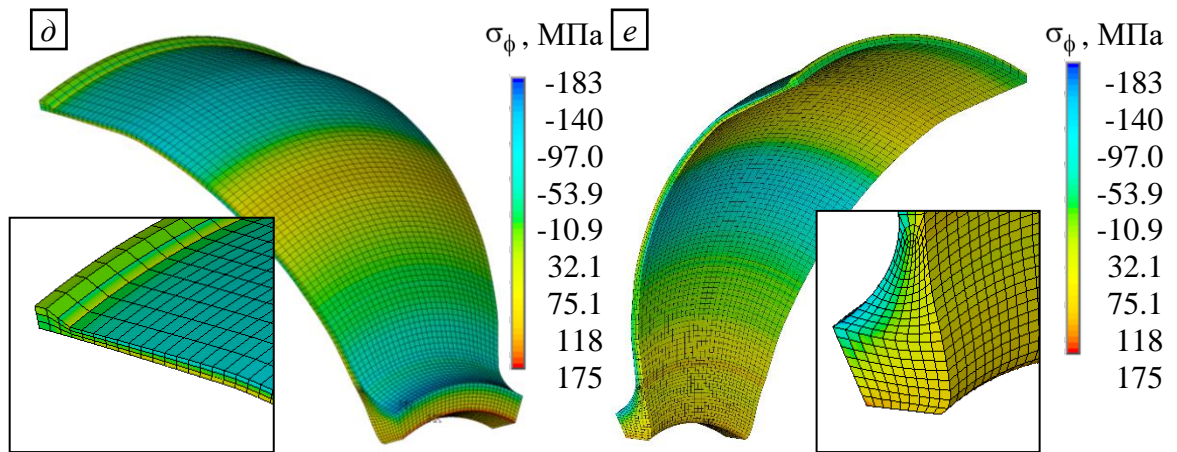


Рисунок 5.17 – Остаточные напряжения донного участка оболочки (окончание):
a, в, д – вид снаружи; *б, г, e* – вид изнутри

Представленные ранее результаты решения квазистатической задачи об отыскании напряженно-деформированного состояния не отражают в достаточной степени временные зависимости деформационных параметров. Для анализа поведения конструкции в процессе изготовления получены зависимости интенсивностей напряжений в основных элементах конструкции. На рисунке 5.18 представлены зависимости осредненных по объему и максимальных значений интенсивностей напряжений в секциях формообразующей оправки.

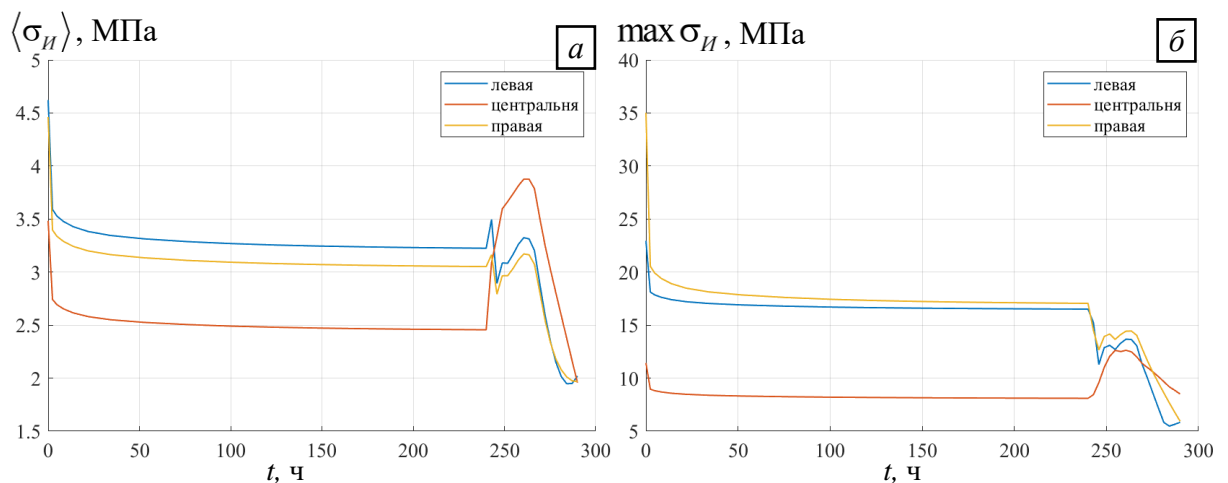


Рисунок 5.18 – Зависимости интенсивностей напряжений от времени в оправке:
a – осредненные по объему значения; *б* – максимальные значения

На этапе намотки характер изменения напряжений в секциях оправок идентичен, при этом уровень напряжений в донных секциях выше, чем на цилиндрическом участке. В процессе термообработки в оправке по мере нагрева повышаются напряжения, затем к окончанию выдержки достигают максимальной величины, после чего начинают планомерно снижаться. В центральной секции

характер изменения напряжений ожидаем и идентичен результатам тестовой задачи, рассмотренной в главе 3. На донных участках на этапе нагрева происходит резкое снижение уровня напряжений, затем постепенное увеличение до окончания этапа выдержки. Отличие характера изменения напряжений на донных участках можно связать с тем, что данные участки подвергаются дополнительному термосиловому взаимодействию со стороны технологической оснастки.

Для анализа поведения наматываемой оболочки в процессе изготовления построены временные зависимости интенсивностей напряжений, осредненных по объему. На рисунке 5.19 представлены полученные зависимости для донных и цилиндрического участков, для удобства анализа графики разделены на этапы намотки и термообработки.

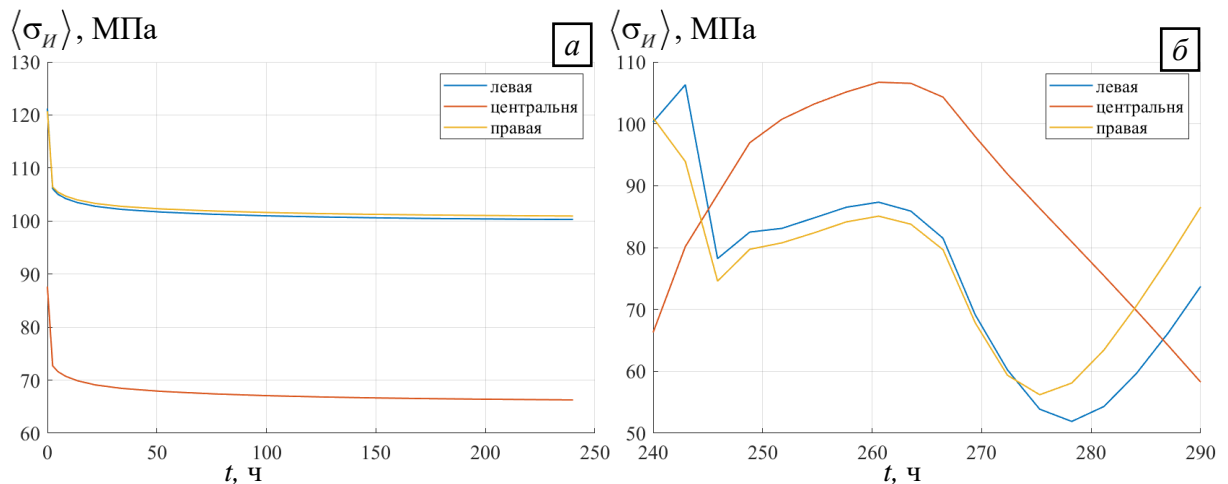


Рисунок 5.19 – Зависимости интенсивностей напряжений от времени в оболочке:
a – этап намотки; *б* – этап термообработки

На этапе намотки (рисунок 5.17, *a*) поведение напряжений в оболочке идентично результатам, полученным для оправки, что говорит о совместности их деформирования. На этапе термообработки напряжения центрального участка оболочки растут по мере нагревания и достигают максимального значения к окончанию выдержки, после чего снижаются при охлаждении конструкции. На донных участках установлено, что напряжения при нагреве снижаются, на этапе выдержки возрастают, затем снижаются до момента, соответствующего точке стеклования связующего, после чего начинают вновь повышаться. Повышение напряжений можно связать с особенностями поведения технологической оснастки,

которая на этапе охлаждения начинает возвращаться в начальное положение (см. рисунок 5.5). Как следствие, на донных участках начинает реализовываться дополнительная изгибная нагрузка, вызванная тем, что оболочка сжимается из-за снижения температуры, при этом зоны полюсных отверстий, жестко связанные с оснасткой, начинают растягиваться. Таким образом, сочетание внешних и внутренних термосиловых факторов приводит к возрастанию средних напряжений в оболочке на этапе охлаждения.

Основным параметром для оценки взаимодействия между формообразующей оправкой и наматываемой оболочкой является величина контактного давления на внешней поверхности оправки. Помимо пространственного распределения радиальных напряжений (см. рисунок 5.13) построены временные зависимости давления на поверхности оправки, представленные на рисунке 5.20. Для вычисления величины давления реализован алгоритм, который сначала суммирует с противоположным знаком значения радиальных напряжений в узлах, лежащих на внешней поверхности оправки. Затем полученная сумма делится на площадь внешней поверхности. Как было установлено ранее, поведение оправки и оболочки отличается на донных и цилиндрических участках, поэтому для удобства получены зависимости осредненного давления для трех участков, на рисунке 5.20 представлены на двух диаграммах, разбитых по времени технологических этапов.

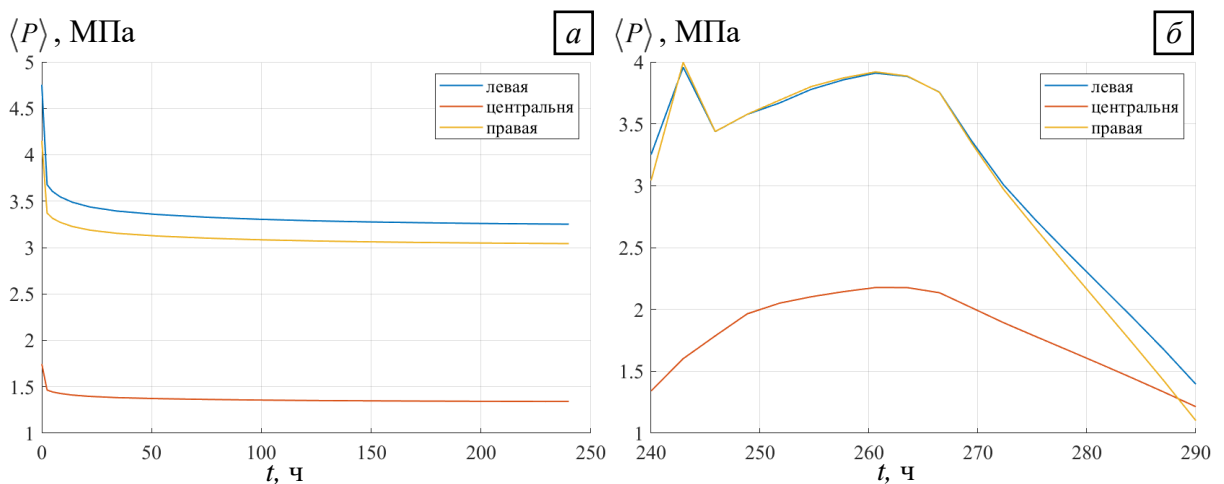


Рисунок 5.20 – Зависимость давления на поверхности оправки от времени:
 a – этап намотки; b – этап термообработки

На этапе намотки аналогично напряжениям наблюдается снижение величины давления со стороны оболочки на поверхность оправки. При нагревании конструкции реализуется повышение давления за счет расширения оправки и сжатия со стороны оболочки. На донных участках осредненное давление достигает 4 МПа, на цилиндрической – 2,2 МПа. По мере охлаждения конструкции контактное давление снижается на всех участках до уровня 1 МПа. Скачок давления на донных участках на интервале времени 240–245 часов повторяет скачок интенсивностей напряжений в оболочке и оправке, как отмечено выше, и может быть следствием сложного термосилового воздействия со стороны технологической оснастки.

5.3. Анализ влияния входных параметров на напряженно-деформированное состояние конструкции

Решенная квазистатическая задача механики учитывает, помимо сложной геометрии и особенностей нагружения исследуемой конструкции, также нелинейное термовязкоупругое поведение двух видов материалов. Проведено исследование влияния начальных параметров на напряженно-деформированное состояние конструкции. В качестве начальных параметров выбраны:

- сила натяжения армирующих лент F_0 ;
- сила в прижимной оснастке F_3 ;
- максимальная температура при термообработке T_{\max} ;
- время выдержки при максимальной температуре $t_{T_{\max}}$.

Для анализа было проведено 6 вычислительных экспериментов при значениях параметров, приведенных в таблице 5.1.

Таблица 5.1. – Параметры вычислительных экспериментов

Номер экс.	F_0 , Н	F_3 , Н	T_{\max} , °С	$t_{T_{\max}}$, Ч
1	F_0	$4 \cdot F_3$	T_{\max}	$t_{T_{\max}}$
2	F_0	$F_3/7$	T_{\max}	$t_{T_{\max}}$
3	$0,9 \cdot F_0$	F_3	T_{\max}	$t_{T_{\max}}$

Номер экс.	F_0 , Н	F_3 , Н	T_{\max} , °С	$t_{T_{\max}}$, Ч
4	$1,1 \cdot F_0$	F_3	T_{\max}	$t_{T_{\max}}$
5	F_0	F_3	$T_{\max} - 10$	$t_{T_{\max}}$
6	F_0	F_3	T_{\max}	$t_{T_{\max}} - 8$

Сравнение полученных результатов проводилось по распределениям минимальных и максимальных интенсивностей напряжений в секциях формообразующей оправки. Проведено сравнение распределения осредненных интенсивностей напряжений в оболочке и давления на поверхности оправки. На всех приведенных ниже рисунках графики под номером «1» соответствуют решению при начальных значениях параметров, графики под номерами «2»–«7» – результаты вычислительных экспериментов 1–6 соответственно. На рисунке 5.21 представлены зависимости минимальных и максимальных значений интенсивностей напряжений в крайних секциях оправки на этапе термообработки.

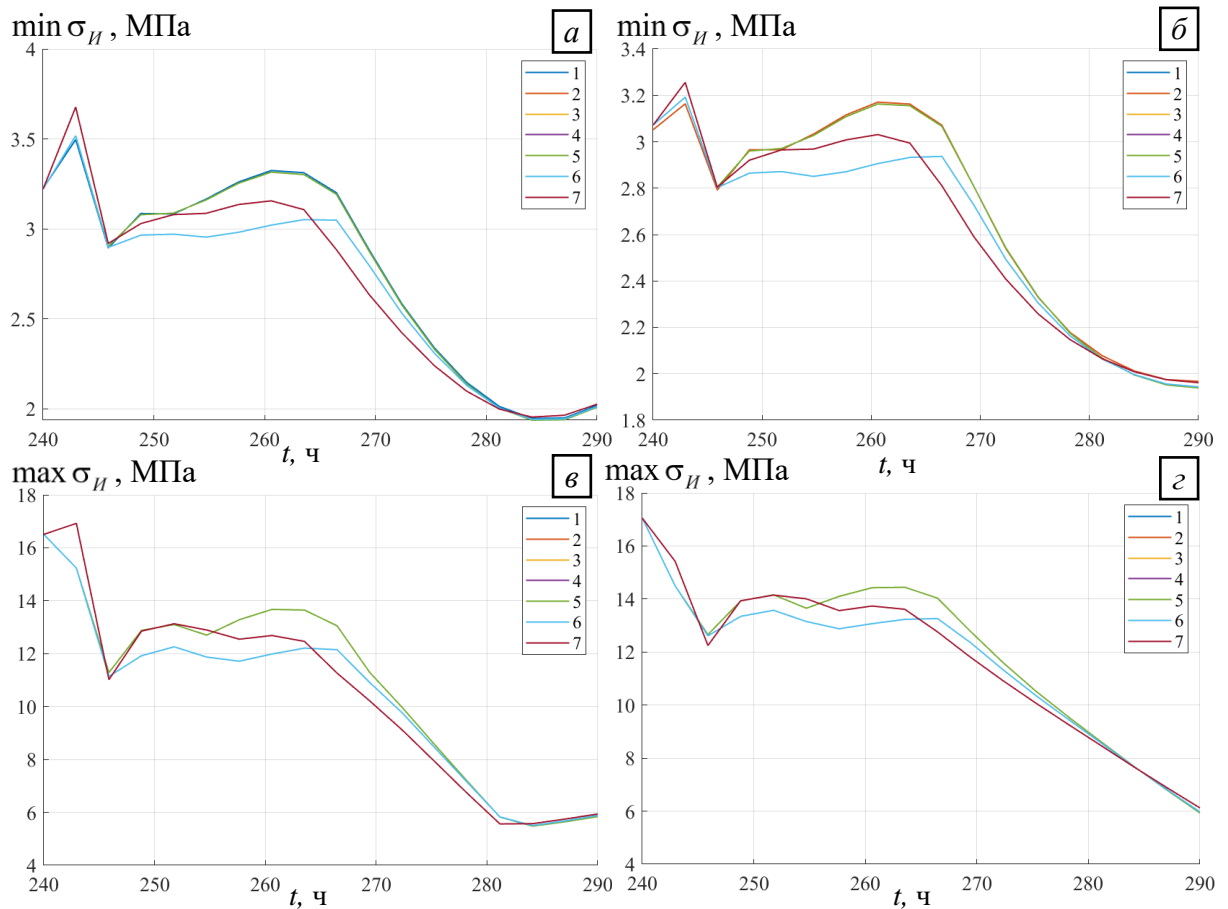


Рисунок 5.21 – Зависимости интенсивностей напряжений от времени в оправке:
а, в – левая секция; б, г – правая секция

Общий характер изменения рассматриваемых величин на донных участках оправки идентичен для всех расчетных случаев. Результаты вычислительных экспериментов 1–4 полностью повторяют результаты, полученные первоначально. Результаты экспериментов 5–6 незначительно отчисляются по значениям напряжений.

На рисунке 5.22 представлены полученные зависимости интенсивностей напряжений в центральной секции оправки на этапе термообработки.

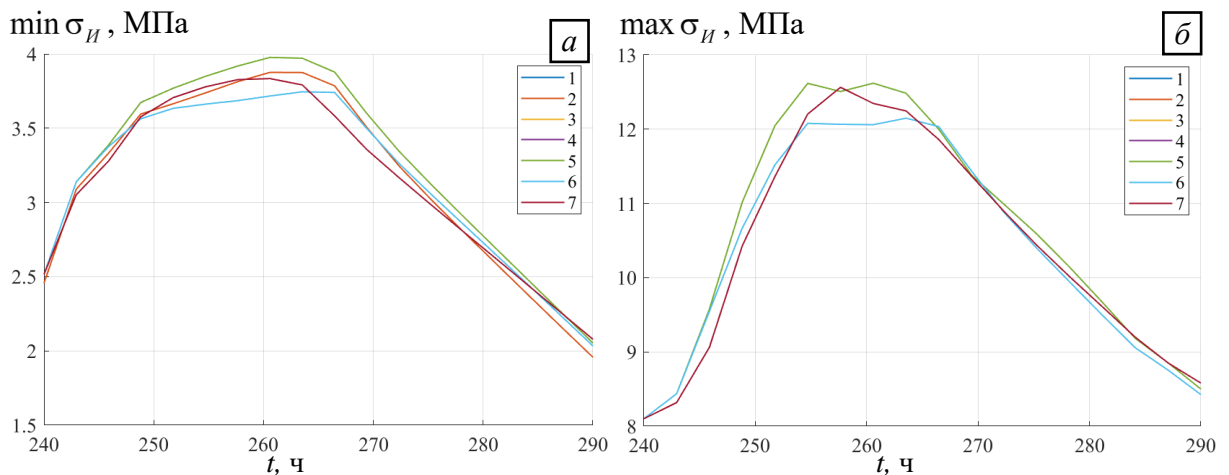


Рисунок 5.22 – Зависимости интенсивностей напряжений от времени в центральной секции оправки: *a* – минимальные значения; *б* – максимальные значения

Характер изменения напряжений идентичен для всех расчетных случаев, незначительные отличия наблюдаются в экспериментах 5–6. Таким образом, установлено, что изменение силовых параметров в конструкции в пределах $\pm 10\%$ не приводит к изменению значений напряжений в оправке, изменение режима термообработки в сторону снижения максимальной температуры или уменьшения времени выдержки приводит к незначительным изменениям полученных значений напряжений в формообразующей оправке.

Для анализа влияния начальных параметров на напряженно-деформированное состояние наматываемой оболочки построены зависимости осредненных интенсивностей напряжений от времени, представленные на рисунке 5.23. Полученные данные приведены для двух этапов производства и для удобства интерпретации разнесены по участкам оболочки.

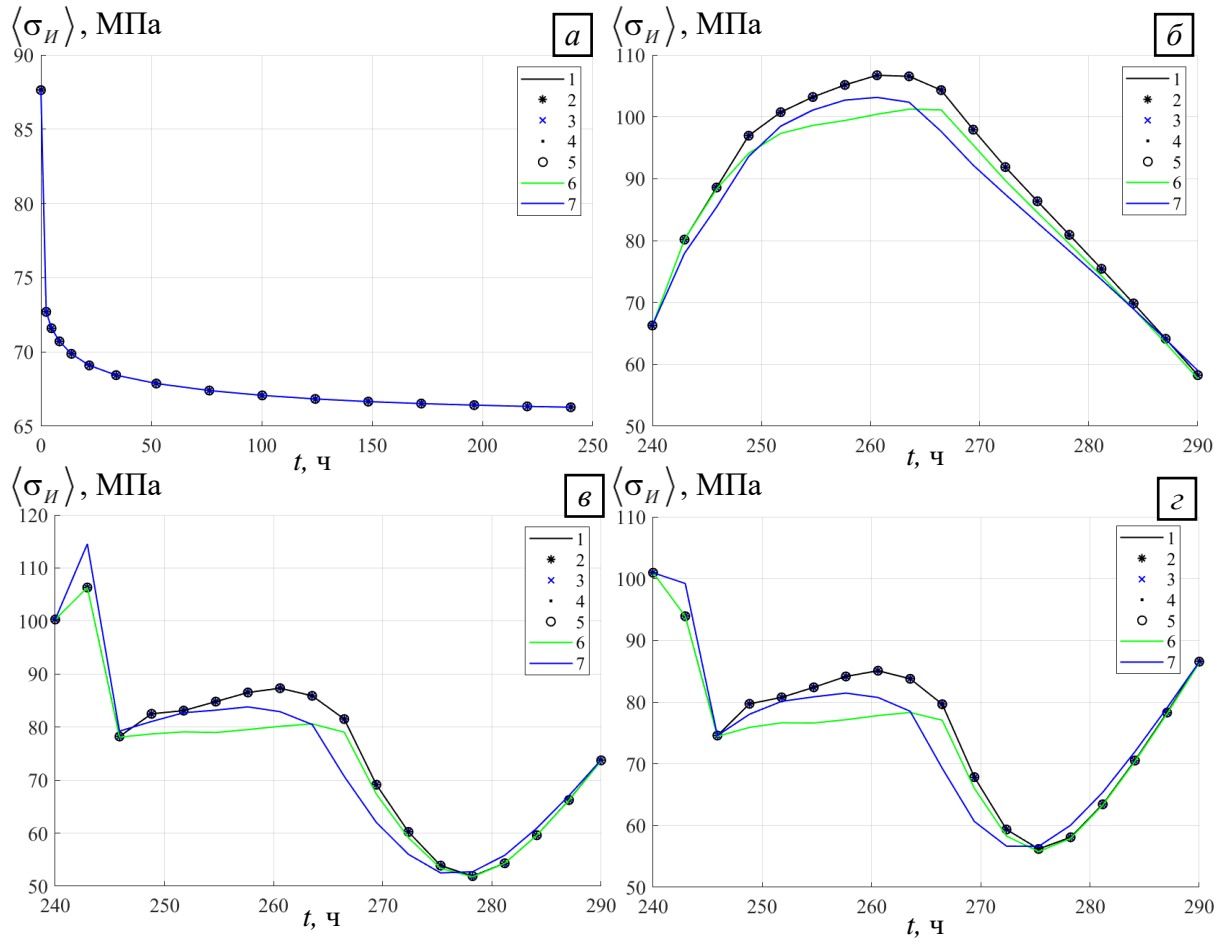


Рисунок 5.23 – Зависимости интенсивностей напряжений от времени в оболочке: *а* – этап намотки; *б* – центральная; *в* – левая; *г* – правая секции на этапе термообработки

Общий характер изменения рассматриваемой величины идентичен для всех расчетных случаев. На этапе намотки значения напряжений полостью совпали для всех расчетных случаев. Результаты вычислительных экспериментов 1–4 полностью повторяют результаты, полученные при начальных параметрах. Результаты экспериментов 5, 6 незначительно отчисляются по значениям напряжений. Отмечено, что снижение максимальной температуры или времени выдержки позволило снизить уровень напряжений в оболочке в процессе термообработки, при этом не оказывает влияния на характер их изменения.

Для анализа совместного поведения формообразующей оправки с наматываемой оболочкой построены диаграммы зависимости давления на внешней поверхности оправки от времени, представленные на рисунке 5.24.

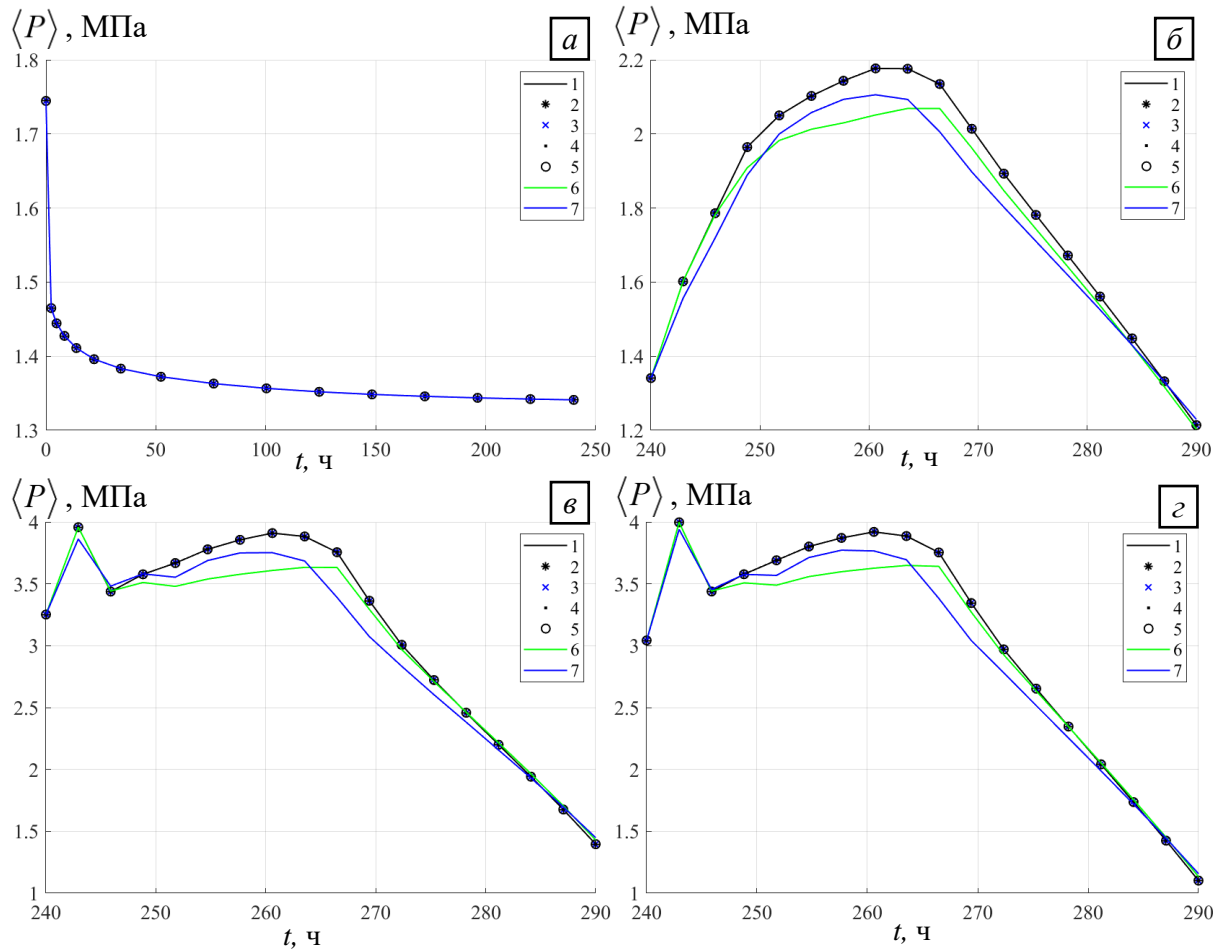


Рисунок 5.24 – Зависимости давления на поверхности оправки от времени:
 а – этап намотки; б – центральная; в – левая; г – правая секции на этапе термообработки

Закономерности влияния начальных параметров на контактное давление на поверхности оправки полностью повторяют ранее установленные факты для зависимостей 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, которые могут быть допущены на производстве в силу тех или иных причин, не может оказать существенного влияния на эволюцию напряженно-деформированного состояния намоточной конструкции в процессе изготовления.

Выводы по главе

Представлены и интерпретированы результаты решения задачи нестационарной теплопроводности и квазистатической задачи механики.

Рассмотрены зависимости температур в элементах конструкции от времени в процессе термообработки. Проанализированы распределения температуры в конструкции в основные моменты времени, на их основе установлено, что элементы конструкции прогреваются равномерно, без резких перепадов в пространстве и по времени. Можно утверждать, что рассмотренный режим термообработки не требует корректировок или внесения существенных изменений.

Проведена оценка перемещений вдоль сборочного вала элементов конструкции. Дана интерпретация изменениям перемещений на протяжении технологического процесса. Подтвержден предполагаемый принцип деформационного поведения конструкции. Кроме перемещений, проведен анализ распределения интенсивностей напряжений в формообразующей оправке и наматываемой оболочке относительно пределов прочности. Установлено, что в процессе изготовления напряжения в основном объеме материалов на протяжении всего процесса изготовления не превышают пределов прочности. Выявлены локальные зоны формообразующей оправки, где значения напряжений превышают предел прочности материала, однако эти зоны соответствуют геометрическим концентраторам напряжений и не влияют на общую жесткость конструкции.

Детальный анализ напряженно-деформированного состояния оболочки и полученные впервые распределения радиальных напряжений на поверхности оправки позволили установить, что на донных участках в зонах ниже точки равнопрочности реализуется локальный изгиб, вызванный одновременным сжатием со стороны цилиндрического участка оболочки и смещением скользящих опор секций оправки к начальному положению. Данный локальный изгиб может стать причиной отслоения оболочки от формообразующей оправки, а также способствовать процессу появления и роста расслоений в материале оболочки. Результаты вычислительных экспериментов указывают на то, что изменение основных параметров технологического процесса не поможет снизить вероятность возникновения дефектов на донных участках оболочки. Одним из путей решения обнаруженной проблемы может быть изменение геометрии формообразующей оправки в зоне полюсных отверстий, но для подтверждения данной гипотезы

необходимы дополнительные исследования и согласования возможных изменений с возможностями производителя формообразующих оправок.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

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. Pyinykh // 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.
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 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «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 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
8. Kim, C. Development of lightweight fiber-reinforced composite pins for heavy load long pitch roller chains / C. Kim, J. Song // Composite Structures. – 2020. – Vol. 236. – A. 111839.
9. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) / К.И. Донецкий, Д.В. Быстрикова, Р.Ю. Караваев, П.Н. Тимошков // Труды ВИАМ. – 2020. – №3 (87). – С. 82–93.

10. Ali T. Sebaey Design of Oil and Gas Composite Pipes for Energy Production / T. Ali // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 162. – P. 146–155.
11. All-composite flanges for anisogrid lattice-core sandwich panels to bear stretching load / Changliang Lai, Yang Hu, Qing Zheng, Hualin Fan // *Composites Communications*. – 2020. – Vol. 19. – P. 189–193.
12. Sebaey, T.A. Design of Oil and Gas Composite Pipes for Energy Production / T.A. Sebaey // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 162. – P. 146–155.
13. All-composite flanges for anisogrid lattice-core sandwich panels to bear stretching load / Lai, C.; Hu, Y.; Zheng, Q.; Fan, H. // *Compos. Commun.* – 2020. – Vol.19. – P. 189–193.
14. Воробей, В.В. Основы технологии и проектирования корпусов ракетных двигателей / В.В. Воробей, В.Б. Маркин – Новосибирск: Наука, 2003. – 164с.
15. Комков, М.А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения: учеб. пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 [1] с.
16. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев – М.: Машиностроение, 1988. – 272с.
17. Аношкин, А.Н. Теория и технология намотки конструкций из полимерных композиционных материалов / А.Н. Аношкин – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 118 с.
18. Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures / Yuxia Bai, Jin Liu, Yujun Cui, Xiao Shi, Zezhuo Song, Changqing Qi // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 290. – A.123237.
19. Оправка для изготовления крупногабаритных корпусов из полимерных композиционных материалов [Текст]: пат. 2686932 Рос. Федерация: МПК В 29 С 53/82
20. Оправка для изготовления намоткой тонкостенных цилиндрических оболочек из полимерных композиционных материалов [Текст]: пат. 2675574 Рос. Федерация: МПК В 29 С 53/82
21. Зуев, А.С. Изготовление оправок методом намотки для изделий из композиционных материалов / А.С. Зуев // *Вестник машиностроения*. – 2016. – №4. – С. 36–37.
22. Зуев, А.С. Анализ особенностей изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки. Формообразующие оправки / А.С. Зуев, А.Ю. Емашев, Г.И. Шайдурова // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2018. – № 3. – С. 4–13.
23. Зуев, А.С. Оптимизация процесса разрушения песчано-полимерных формообразующих оправок / А.С. Зуев, А.В. Лепешкин // *Вестник машиностроения*. – 2019. – №1. – С. 61–62.
24. Особенности разработки средств технологического оснащения для производства изделий из полимерно-композиционных материалов методом намотки / Г.И. Шайдурова, А.С. Зуев, А.Ю. Емашев, В.Е. Антипин // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – Пермь: ПНИПУ, 2014. № 36. – С. 64–76.

25. Шилина, Е.В. Обзор и анализ формообразующих оправок для изготовления композитных корпусов ракетных двигателей твердого топлива методом «мокрой» намотки / Е.В. Шилина, С.А. Шилин // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2016. – Вып. 4. – С. 114–122.
26. Комков, М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учеб.пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 [1] с.
27. Влияние технологических условий намотки на свойства полимерных композиционных материалов / В.А. Авдеев, В.А. Иванов, В.М. Манаков, Д.В. Отмахов, С.П. Захарычев // Вестник ТОГУ. Технические науки. – 2010. – № 1(16). – С. 55–64.
28. Малкин, А.Я. Химическое формование полимеров/ А.Я. Малкин, В.П. Бегишев. – М.: Химия, 1991. 540с.
29. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures / M.R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, K.D. Potter // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2006. – Vol. 37. – No. 4. – P. 522–529.
30. The role of mandrel rotation speed on morphology and mechanical properties of polyethylene pipes produced by rotational shear/ H.Yang, X.Luo, K.Shen, Y.Yuan, Q. Fu, X. Gao, L. Jiang// Polymer. – 2019. – Vol.184. – A.121915.
31. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов/ И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. – Москва: Москва, 1977. – 144 с.
32. Vakhrushev, A. V. Modeling of interaction nanoparticles with cracks on the surface of solids / A. V. Vakhrushev // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 26. – P. 256–262.
33. Турусов, Р.А. Численные и экспериментальные исследования монолитности толстостенной анизотропной оболочки / М. Мемарианфард, Р.А. Турусов, Х. Мемарианфард // Вестник МГСУ. – 2016. – № 7. – С. 36–45.
34. Технологические особенности изготовления толстостенного органопластика методом намотки / С.А. Гусев, В.В. Соколов, О.И. Сидоров, Г.В. Линкина, В.Ю. Гусев // Пластические массы. – 2016. –№9-10. – С. 57–60.
35. Analysis and control of the compaction force in the composite prepreg tape winding process for rocket motor nozzles / X. He, Y. Shi, C. Kang, T. Yu // Chinese Journal of Aeronautics. – 2016. – № 7. – С. 1–10.
36. Бахарев, С.П. К вопросу о температурных напряжениях, возникающих в процессе термообработки цилиндрических оболочек из стеклопластиков / С.П. Бахарев, М.А. Миркин // Механика полимеров. – 1978. – № 6. – С. 1118–1121.
37. Варушкин, Е.М. Исследование температурных остаточных напряжений и деформаций в толстостенных намоточных изделиях из армированных пластиков / Е.М. Варушкин // Механика полимеров. – 1971. – № 6. – С. 1040–1046.
38. Моделирование процесса полимеризации толстостенной композитной конструкции / В.В. Дубров, И.Г. Самощенко, Г.Н. Тоискин, М.Б. Флек,

- С.Н. Шевцов // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. – 2010. – Т.6, № 107. – С. 222–232.
39. Томашевский, В.Т. Влияние неоднородности охлаждения на технологические температурные напряжения в толстостенных цилиндрических оболочках из армированных полимеров / В.Т. Томашевский, В.Н. Наумов, В.Н. Шалыгин // Полимерные материалы в машиностроении. – Пермь, 1977. – С. 10–17.
40. Козлов, В.Н. Зависимость механических свойств композиционных материалов от температурного режима полимеризации / В.Н. Козлов, А.И. Акимов, М.А. Фатыхов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. – № 1(149). – С. 83–89.
41. Kardomatears, G.A. Thermoelastic stresses in a filament-wound orthotropic composite elliptic cylinder due to a uniform temperature change/ G.A. Kardomatears // Int. J. Solids and Struct. – 1990. – Vol.26(5–6) – P. 527–537.
42. Thermal Residual Stresses in Single-sided Bonded Composite Patching / Z. Wang, J. Xiao, D. Jiang, J. Zeng, F. Yang // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2009 – Vol. 28. – No. 5. – P. 587–599.
43. Effect of temperature and particle weight fraction on mechanical and micromechanical properties of sand-polyethylene terephthalate composites: A laboratory and discrete element method study / J.A. Mohandesi, A. Refahi, E.S. Meresht, S. Berenji // Compos. Part B Eng. – 2011. – Vol. 42. – P. 1461–1467.
44. Работнов, Ю.Н. Об одном способе предотвращения трещин при термообработке толстостенных оболочек из стеклопластика / Ю.Н. Работнов, В.С. Екельчик // Механика полимеров. – 1975. – № 6. – С. 1095–1098.
45. Зиновьев, Р.С. Использование температурного поля в качестве управляющего фактора для снижения остаточных напряжений в намоточной конструкции из армированного реактопласта / Р.С. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 127–134.
46. Дмитриев, О.С. Влияние режимов термообработки на геометрические и механические характеристики углепластиковых трубчатых элементов / О.С. Дмитриев, И.В. Малков // Вестник ТГТУ. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 427–438.
47. Экспериментальные исследования компенсационного способа снижения напряжений в намоточных конструкциях из полимерных композиционных материалов / Р.С. Зиновьев, Ю.А. Мережко, С.Б. Сапожников, Ю.М. Хищенко // Композитный мир. – 2020. – № 4(91). – С. 54–57.
48. The role of mandrel rotation speed on morphology and mechanical properties of polyethylene pipes produced by rotational shear / Hao Yang, Xiehuai Luo, Kaizhi Shen, Yi Yuan, Qiang Fu, Xueqin Gao, Long Jiang // Polymer. – 2019. – Vol. 184. – A. 121915.
49. Крегер, А.Ф. Применение методов усреднения для определения вязкоупругих свойств пространственно армированных композитов / А.Ф. Крегер, Г.А. Тетерс // Механика композитных материалов. – 1979. – № 4. – С. 617–624.
50. Васильев, В.В. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ.ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512с.

51. Алфутов, Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов // М.: Машиностроение, 1984.
52. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий // М.: Наука, 1977.
53. Антонов, В.И. Начальные напряжения в анизотропном неоднородном цилиндре, образованном намоткой / В.И. Антонов // Вестник МГСУ. – 2010. – №4. – С. 28–33.
54. Воробей, В.В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, С.В. Евстратов // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16, № 1. – С. 61–72.
55. Кутьин, А.Ю. Моделирование процесса намотки композитных цилиндрических оболочек / А.Ю. Кутьин, Г.П. Арясов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т.20. №2. – С. 283–289.
56. Устинова, Е.С. Моделирование намотки композитных конструкций / Е.С. Устинова // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2018. – №3. – С. 27–33.
57. Русаков, И.Ю. Основы конструирования и расчета элементов оборудования отрасли: учебное пособие / И.Ю. Русаков, В.Л. Софронов. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – 271 с.
58. Буланов, И.М. Сосуды давления из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов / И.М. Буланов, В.И. Смыслов, М.А. Комков и др. М.: ЦНИИ информации, 1985. – С. 155–158.
59. Тарнопольский, Ю.М. Программированная намотка стеклопластиков / Ю.М. Тарнопольский, Г.Г. Портнов // Механика полимеров. – 1970. – №1. – С. 48–53.
60. Generation of filament-winding paths for complex axisymmetric shapes based on the principal stress field / J. Fu, J. Yun, Y. Jung, D. Lee // Compos. Struct. – 2017. – Vol. 161. – P. 330–339.
61. Zhang, B. Design of filament-wound composite elbows based on non-geodesic trajectories / B. Zhang, H. Xu, L. Zu, D. Li, B. Zi, B. Zhang // Compos. Struct. – 2018. – Vol. 189. – P. 635–640.
62. Design and analysis of filament-wound composite pressure vessels based on non-geodesic winding / Lei Zu, Hui Xu, Huabi Wang, Bing Zhang, Bin Zi // Composite Structures. – 2019. – Vol. 207. – P. 41–52.
63. Харинова, Ю.Ю. Методика прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки: дис. ...к-та тех. наук. – Ижевск, 2017.
64. Битюков, Ю.И. Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: дис. ...к-та тех. наук. – Москва, 2010.
65. Болотин, В. В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Москва, 1980. – 375 с.

66. Победря, Б.Е. Механика композиционных материалов / Б.Е. Победря. – М.: Издательство Московского университета, 1984.
67. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. – М.: Издательство «Мир», 1982.
68. Chen, Z. Multi-level modeling of woven glass/epoxy composite for multilayer printed circuit board applications / Z. Chen, F. Yang, S.A. Meguid // International Journal of Solids and Structures. – 2014. – Vol. 51. – No. 21–22. – P. 3679–3688.
69. Шушков, А.А. Методы определения механических свойств наноструктур / А.А. Шушков, А.В. Вахрушев // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 57–71.
70. McWilliams, B. Multi scale modeling and characterization of in elastic deformation mechanisms in continuous fiber and 2D woven fabric reinforced metal matrix composites / B. McWilliams, J. Dibelka, C.F. Yen // Materials Science & Engineering A. – 2014. – Vol. 618. – P. 142–152.
71. Бабушкин, А.В. Экспериментальное исследование и моделирование свойств композиционных материалов в условиях сложных термомеханических воздействий / А.В. Бабушкин, Д.С. Лобанов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 1984–1986
72. Моделирование вязкоупругих характеристик слоисто-волокнистых полимерных композиционных материалов / Ю.И. Димитриенко, Е.А. Губарева, С.В. Сборщиков, Н.Н. Федонюк // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2014. – № 11. – С. 748–770.
73. Куимова, Е.В. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами / Е.В. Куимова, Н.А. Труфанов // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2009. – №4(70). – С. 129–148.
74. Новацкий, В. Вопросы термоупругости / В. Новацкий. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 364 с.
75. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. М.: Мир, 1975. – 872 с.
76. Механические свойства композиционных армированных материалов на основе полимерной матрицы / А.А. Сахаров, А.Е. Верховский, К.Г. Гаджиев, Д.С. Писарев, С.А. Стародубцева, В.И. Чугунов // Научно-практические исследования. – 2019. – №8-1 (23). – С. 139–141.
77. Соловьев, А.Н. Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования / А.Н. Соловьев, Е.Н. Зиборов, С.Н. Шевцов // Наука юга России (Вестник южного научного центра). – 2016. – Т. 12, №2. – С. 3–10.
78. Янковский, А.П. Определение термоупругих характеристик пространственно армированных волокнистых сред при общей анизотропии материалов компонент композиции. 1. Структурная модель / А.П. Янковский // Механика композитных материалов. – 2010. – Т. 46. – № 5. – С. 663–678.
79. Голуб, В.П. Нестационарная ползучесть линейных вязкоупругих материалов при одноосном растяжении и сжатии / В.П. Голуб, Я.В. Павлюк, П.В. Фернати // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – Вып.43. – С.40–49.

80. Бабушкин, А.В. Испытания на растяжение однонаправленного высоконаполненного стеклопластика при нормальных и повышенных температурах / А.В. Бабушкин, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, №7. – С. 57–59.
81. Закономерности и модели термомеханического динамического поведения вязкоупругих композитных материалов в условиях сложного напряженного состояния / С.В. Словигов, А.С. Янкин, В.Э. Вильдеман, А.В. Бабушкин, А.В. Ильиных, Д.С. Лобанов // Вестник Пермского научного центра. – 2017. – № 3. – С. 59–62.
82. Сендецки, Дж. Механика композиционных материалов / Дж. Сендецки. – М.: Мир, 1978.
83. Ильюшин, А.А. Основы математической теории термовязко-упругости / А.А. Ильюшин, Б.Е. Победря. – Изд-во «Наука», 1970.
84. Колтунов, М.А. Ползучесть и релаксация / М.А. Колтунов – М.: Высшая школа, 1978.
85. Пестренин, В.М. Применение аппроксимаций в задачах линейной теории вязкоупругости анизотропного тела / В.М. Пестренин, И.В. Пестренина // Механика композитных материалов. – 1988. – №3. – С.462–467.
86. Светашков, А.А. Определение эффективных характеристик неоднородных вязкоупругих тел / А.А. Светашков // Вычислительные технологии. – 2001. – Т.6(1). – С. 52–64.
87. Светашков, А.А. Применение энергетического метода к определению эффективных по времени модулей линейной вязкоупругости / А.А. Светашков, Н.А. Куприянов // Физическая мезамеханика. – 2010. – №13(3). – С.69–73.
88. Методы прикладной вязкоупругости / А.А. Адамов, В.П. Матвеев, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков. – Екатеринбург, 2003.
89. Коваленко, А.Д. О методе переменных модулей в задачах линейной наследственной упругости / А.Д. Коваленко, А.А. Кильчинский // Прикладная механика. – 1970. – Т.6. – №12. – С. 27–34.
90. Павлов, М.С. Модифицированная формулировка итерационного алгоритма решения задач линейной вязкоупругости на основе разделения временных и пространственных переменных / М.С. Павлов, А.А. Светашков, Н.А. Куприянов // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – №61. – С. 82–94.
91. Плуме, Э.З. Сравнительный анализ ползучести однонаправленных композитов, армированных волокнами различного типа / Э.З. Плуме // Механика композитных материалов. – 1985. – №3. – С.431–436.
92. Плумэ, Э.З. Длительная ползучесть органостеклопластика / Э.З. Плумэ, Р.Д. Максимов // Механика композитных материалов. – 2001. – Т.37, №4. – С. 435–450.
93. Янковский, А.П. Моделирование линейно-термовязкоупругого поведения композитов с пространственной структурой армирования / А.П. Янковский // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – №2. – С. 3–14.

94. Куликов, Р.Г. Применение итерационного метода к решению задачи деформирования однонаправленного композиционного материала с нелинейно-вязкоупругим связующим / Р.Г. Куликов, Н.А. Труфанов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4. – № 2. – С. 61–71.
95. Воронцов, Г.В. Определение остаточных напряжений в оболочках, получаемых методом намотки из композиционных материалов / Г.В. Воронцов // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2006. – №2. – С. 19–24.
96. Воронцов, А.Н. Исследование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках, подкрепленных шпангоутами / А.Н. Воронцов // Тр. Моск. энергет. Ин-та. Динамика и прочность машин. – 1976. – Вып.280. – С. 56–61.
97. Воронцов, А.Н. Расчет технологических напряжений в намоточных изделиях из композиционных материалов / А.Н. Воронцов, В.Б. Антохонов // Тр. Моск. энергет. Ин-та. Механика материалов и конструкций. – 1980. – Вып.459. – С. 52–56.
98. Воронцов, Г.В. Силовая намотка и остаточные напряжения в цилиндрических намоточных изделиях из композиционных материалов / Г.В. Воронцов // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2009. – №6. – С. 40–43.
99. Данг, М.Х. Анализ и синтез процесса намотки композиционного баллона в рамках концепции управления жизненным циклом продукции / М.Х. Данг, С.С. Гаврюшин, В.И. Семисалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 7. – С. 12–17.
100. Данг, Х.М. Анализ напряженно-деформированного состояния композиционного баллона с учетом ограничений, наложенных на этапах проектирования и изготовления / Х.М. Данг, С.С. Гаврюшин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – №11. – С. 63–68.
101. Влияние натяжения армирующего материала на остаточные напряжения при намотке цилиндрических оболочек / Ю.В. Василевич, К.А. Горелый, В.М. Сахоненко, С.Н. Иванов // Актуальные вопросы машиноведения. – 2015. – №4. – С. 194–196.
102. Афанасьев, Ю.А. Экстремальные температурные поля при термообработке цилиндров из армированных композитных материалов / Ю.А. Афанасьева // Механика композитных материалов. – 1981. – № 5. – С. 855–863.
103. Болотин, В.В. Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях из композитов на протяжении всего процесса изготовления / В.В. Болотин, А.Н. Воронцов, Г.Х. Мурзаханов // Механика композитных материалов. – 1980. – № 3. – С. 500–508.
104. Бугаков, И.И. Расчет температурных напряжений в нагреваемых элементах конструкций из полимеров и композитов / И.И. Бугаков // Сб. НТО им. акад. А.Н. Крылова. – 1981. – Вып. 344. – С. 60–70.
105. Варушкин, Е.М. Исследование температурных остаточных напряжений и деформаций в толстостенных намоточных изделиях из армированных пластиков / Е.М. Варушкин // Механика полимеров. – 1971. – № 6. – С. 1040–1046.

106. Киричок, И.Ф. О термонапряженном состоянии вязкоупругих тел с зависящими от неустановившейся температуры свойствами / И.Ф. Киричок, В.Г. Карнаухов // Проблемы прочности. – 1977. – №6. – С. 85–88.
107. Бахарев, С.П. К вопросу о температурных напряжениях, возникающих в процессе термообработки цилиндрических оболочек из стеклопластиков / С.П. Бахарев, М.А. Миркин // Механика полимеров. – 1978. – № 6. – С. 1118–1121.
108. Определение остаточных напряжений при изготовлении колец из стеклопластиков / В.Л. Бидерман, И.П. Димитриенко, В.И. Поляков, Н.А. Сухова // Механика полимеров. – 1969. – № 5. – С. 892–898.
109. Болотин, В.В. Образование остаточных напряжений в изделиях из слоистых и волокнистых композитов в процессе отверждения / В.В. Болотин, А.Н. Воронцов // Механика полимеров. – 1976. – № 5. – С. 780–795.
110. Научные основы и методы управления технологическими процессами переработки полимерных композитных материалов в изделия машиностроения / И.Ф. Образцов, В.Т. Томашевский, В.Н. Шалыгин, В.С. Яковлев – М.: НИИСтали, 2001. – 428 с.
111. Мемарианфард, Х. Двухуровневый метод в механике толстостенных намоточных оболочек из армированных полимеров (при их создании и эксплуатации): дис. ...к-та тех. наук. – Москва, 2017.
112. Тугов, В.В. Разработка математических моделей теплопередачи в многослойных конструкциях / В.В. Тугов, И.А. Акимов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 8-2. – С. 320–324.
113. Об одном методе решения нестационарных задач теплопроводности для многослойных конструкций / В.А. Кудинов, В.В. Дикоп, С.А. Назаренко, Е.В. Стефанюк // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 2. – С. 24–28.
114. Янковский, А.П. Численно-аналитическое моделирование процессов теплопроводности в пространственно армированных композитах при интенсивном тепловом воздействии / А.П. Янковский // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т. 3. – № 11. – С. 500–516.
115. Немировский, Ю.В. Теплопроводность конструкционного элемента космического аппарата в виде многослойного цилиндра / Ю.В. Немировский, А.С. Мозгова // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2017. – №1 (31). – С.49–54.
116. Зарубин, В.С. Теплопроводность композита, армированного волокнами / В.С. Зарубин, Г.Н. Кувыркин, И.Ю. Савельева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – №5. – С. 75–81.
117. Моделирование процесса полимеризации толстостенной композитной конструкции / В.В. Дубров, И.Г. Самощенко, Г.Н. Тоискин, М.Б. Флек, С.Н. Шевцов // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. – 2010. – Т.6, № 107. – С. 222–232.
118. Завьялова, Т.Г. Определяющие соотношения для вязкоупругого тела в условиях кристаллизации / Т.Г. Завьялова, Н.А. Труфанов // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, №4. – С. 78–87.

119. Куликова, Т.Г. Численное решение краевой задачи термомеханики для кристаллизирующегося вязкоупругого полимера / Т.Г. Куликова, Н.А. Труфанов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1, №2. – С. 38–52.
120. Сметанников, О.Ю. Модель вязкоупругого термомеханического поведения волокнистого композита и ее экспериментальная идентификация / О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 4. – С. 51–72.
121. Суходоева, А.А. Совместное деформирование оправки и композиционной оболочки при силовой намотке / А.А. Суходоева // Вестник ПГТУ. Вычислительная математика и механика. – 2000. – С. 52–55.
122. Суходоева, А.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния и оценка прочности оправок для намотки композиционных оболочек: дис. ...к-та тех. наук. – Пермь, 2000.
123. Труфанов, Н.А. Расчет намоточных вязкоупругих конструкций из полимерных композиционных материалов: Дис. ...докт.техн.наук: 01.02.04. – Пермь, 1991.
124. Труфанов, Н.А. Расчет пространственного напряженно-деформированного состояния формообразующей конструкции / Н.А. Труфанов, Н.В. Шакиров // Численное моделирование статического и динамического деформирования конструкций. – 1990. – С. 42–45.
125. Устройство для определения давлений на оправку // Патент СССР № SU308977A1. 1971. Бюл. №22. / Волков Р.А., Маркелов Н.С., Митрофанов С.А., Панфилов Н.А., Парфенов Т.П.
126. Kardomatears, G.A. Thermoelastic stresses in a filament-wound orthotropic composite elliptic cylinder due to a uniform temperature change / G.A. Kardomatears // Int. J. Solids and Struct. – 1990. – 26, № 5-6. – С. 527–537.
127. Арутюнян, Н. Х. Контактные задачи механики растущих тел / Н.Х. Арутюнян, А.В. Манжиров, В.Э. Наумов. – Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук «Издательство "Наука"», 1991. – 176 с.
128. Арутюнян, Н.Х. Контактные задачи теории ползучести / Н.Х. Арутюнян, А.В. Манжиров. – Ереван: Институт механики НАН Армении, 1999. – 320 с.
129. Манжиров, А.В. Математическая теория растущих тел: уравнения, задачи, приложения / А.В. Манжиров // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-4. – С. 1603–1605.
130. Кузнецов, С.И. Задача теплопроводности для растущего шара / С.И. Кузнецов, А.В. Манжиров, И. Федотов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 6. – С. 139–148.
131. Манжиров, А.В. Моделирование процессов наращивания цилиндрических тел на вращающейся оправке с учетом действия центробежных сил / А.В. Манжиров, Д.А. Паршин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2006. – № 6. – С. 149–166.
132. Манжиров, А.В. Моделирование процесса деформирования наращиваемых конических тел / А.В. Манжиров, Д.А. Паршин // Вестник Самарского

- государственного университета. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4(54). – С. 290–303.
133. Дац, Е.П. Расчет накопленной остаточной деформации в процессе <нагрева-охлаждения> упругопластического шара / Е.П. Дац, С.Н. Мокрин, Е.В. Мурашкин // Вестник Чувашия государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2012. – № 4(14). – С. 123–132.
134. Температурные напряжения в упругопластической трубе в зависимости от выбора условия пластичности / Е.П. Дац, Е.В. Мурашкин, А.В. Ткачева, Г.А. Щербатюк // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2018. – № 1. – С. 32–43.
135. Буренин, А.А. Об остаточных напряжениях в окрестности цилиндрического дефекта сплошности вязкоупругопластического материала / А.А. Буренин, Л.В. Ковтанюк, Е.В. Мурашкин // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 2(276). – С. 110–119.
136. Kugler, D. The effects of Mandrel material and tow tension on defects and compressive strength of hoop-wound, on-line consolidated, composite rings/ D. Kugler, T.J. Moon// Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. – 2002. – Vol.33. – P. 861–876.
137. Shape memory polymer S-shaped mandrel for composite air duct manufacturing / H. Du, L. Liu, J. Leng, H.-X. Peng, F. Scarpa, Y. Liu // Compos. Struct. – 2015. – Vol. 133. – P. 930–938.
138. Li, S. Numerical simulation and experimental studies of mandrel effect on flow-compaction behavior of CFRP hat-shaped structure during curing process / S. Li, L. Zhan, T. Chang // Arch. Civ. Mech. Eng. – 2018. – Vol.18. – P. 1386–1400.
139. Kordkheili, S.H. On the geometrically nonlinear analysis of sandwich shells with viscoelastic core: A layerwise dynamic finite element formulation / S.H. Kordkheili, R. Khorasani // Compos. Struct. – 2019. – Vol. 230. – A. 111388.
140. Исаков, Ю.А. Расчет контактных давлений при опрессовке канатом цилиндрической пластмассовой оболочки, подверженной действию нестационарного температурного поля / Ю.А. Исаков, А.А. Филипенко, В.Д. Протасов // Механика полимеров. – 1977. – № 2. – С. 220–224.
141. Поведение образцов песчано-полимерной композиции в условиях нормальной и повышенных температур при релаксации в области сжатия / А.А. Слетова, С.А. Сафронов, Д.С. Лобанов, О.Ю. Сметанников // Математическое моделирование в естественных науках. – 2018. – Т. 1. – С. 273–277.
142. Endo, V.T. Linear orthotropic viscoelasticity model for fiber reinforced thermoplastic material based on Prony series / V.T. Endo, J.C.D.C. Pereira // Mech. Time-Dependent Mater. – 2017. – Vol. 21. – P. 199–221.
143. Asymptotic and numerical homogenization methods applied to fibrous viscoelastic composites using Prony's series / J.A. Otero, R. Rodríguez-Ramos, R. Guinovart-Díaz, O.L. Cruz-González, F.J. Sabina, H. Berger, T. Böhlke // Acta Mech. – 2020. – Vol. 231. – P. 2761–2771.
144. Mauro, J.C. On the Prony series representation of stretched exponential relaxation / J.C. Mauro, Y.Z. Mauro // Phys. A Stat. Mech. Its Appl. – 2018. – Vol. 506. – P. 75–87.

145. Luo, R. Development of Prony series models based on continuous relaxation spectrums for relaxation moduli determined using creep tests / R. Luo, H. Lv, H. Liu // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – Vol. 168. – P. 758–770.
146. Сметанников, О.Ю. Модели механического поведения материалов и конструкций в технологических процессах с терморелаксационным переходом: 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сметанников Олег Юрьевич. – Пермь, 2010. – 413 с.
147. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.
148. Михеев, М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: «Энергия», 1977. – 333с.

615-62 of 3
23.03.2023г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора-
Директор направления РКТ
ПАО НПО «Искра»



С.А. Бондаренко
2023 г.

Акт

Научно-технической комиссии о реализации
научных Положений и выводов кандидатской диссертации
Сахабутдиновой Ляйсан Рамилевны

Научно-техническая комиссия ПАО НПО «Искра» в составе:

Председатель комиссии	
Зам. генерального директора – директор направления РКТ	С.А. Бондаренко
Члены комиссии	
Зам. главного конструктора РКТ (по маркетингу и НИР), к.т.н.	А.Ю. Лузенин
Главный химик, д.т.н.	Г.И. Шайдурова
Главный специалист	А.Б. Ознобишин

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Сахабутдиновой Ляйсан Рамилевны на тему: «Термовязкоупругое поведение крупногабаритного намоточного изделия в процессе изготовления» использованы в производственной деятельности при выполнении инвестиционного проекта в рамках темы «Оправка» и являются составной частью методики расчета напряженно-деформированного состояния композиционных оправок.

Результаты диссертационной работы соискателя Сахабутдиновой Л.Р. по указанной теме имеют научно–прикладное значение, содержат элементы новизны и представляют практическую значимость для ПАО НПО «Искра».

Акт подписали:

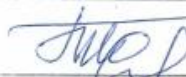
Члены комиссии

Зам. главного конструктора РКТ
(по маркетингу и НИР), к.т.н.



А.Ю. Лузенин

Главный химик, д.т.н.



Г.И. Шайдурова

Главный специалист



А.Б. Ознобишин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022683559

**Моделирование технологического процесса
производства композитной оболочки методом намотки**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)*

Авторы: *Ильиных Глеб Валентинович (RU), Сахабутдинова
Ляйсан Рамилевна (RU), Сметанников Олег Юрьевич
(RU)*

Заявка № 2022683588

Дата поступления 06 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 декабря 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 6Bb80077c14e1010a94e0bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрия Сергеевич**
Действителен с 06.12.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022683405

**Автоматизация прогнозирования эффективных
вязкоупругих свойств слоистого композита**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)*

Авторы: *Ильиных Глеб Валентинович (RU), Сахабутдинова
Ляйсан Рамилевна (RU), Сметанников Олег Юрьевич
(RU)*

Заявка № 2022683467

Дата поступления 05 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 декабря 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e14c40f0da94e1bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2015-2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов