

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Пермского национального

исследовательского

политехнического университета,

наук, доцент

Швейкин А.И.

2023 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Термовязкоупругое поведение крупногабаритного
намоточного изделия в процессе изготовления» выполнена на кафедре
«Вычислительная математика, механика и биомеханика».

В период подготовки диссертации соискатель Сахабутдинова Ляйсан
Рамилевна работала в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет» на кафедре
«Вычислительная математика, механика и биомеханика» в должностях
ведущего инженера и старшего преподавателя.

В 2014 году Сахабутдинова Ляйсан Рамилевна окончила с отличием
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки

«Прикладная механика». В 2020 году окончила аспирантуру очной формы обучения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермского национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.06.01 Математика и механика, специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» » (период обучения с «01» октября 2014 по «30» сентября 2020 г.).

Научный руководитель – доктор технических наук Сметанников Олег Юрьевич, работает профессором кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО ПНИПУ.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

Все отраженные в диссертации результаты получены Л.Р. Сахабутдиновой лично или с ее непосредственным участием. Соискатель принимал непосредственное участие в формулировании систем граничных и начальных условий, проведении серии вычислительных экспериментов. Личным вкладом автора является разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ на их основе, реализация численных экспериментов, обработка и визуализация. Анализ результатов выполнялся совместно с научным руководителем О.Ю. Сметанниковым и другими коллегами. Интерпретация результатов и подготовка публикаций выполнена совместно с соавторами.

2. Научная новизна диссертационного исследования

В рамках работы предложена 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. Впервые предложена и реализована средствами ANSYS Mechanical APDL термовязкоупругая модель полимерного

композиционного материала, сочетающая анизотропное упругое поведение среды с одним независимым вязкоупругим оператором. 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. 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. 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.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных 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.

4. Теоретическая и практическая значимость

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).

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Сахабутдиновой Ляйсан Рамилевны опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий и приравненных к ним, из них 2 – в изданиях, индексированных в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работ по теме диссертации. Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, и в базы цитирования Web of Science, Scopus:

1. 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. (вклад автора 9/9 с.). **(ВАК)**

Отражены результаты численного прогнозирования эволюции температурных полей крупногабаритной намоточной конструкции в процессе изготовления. В среде конечно-элементного анализа ANSYS Mechanical APDL создан трехмерный аналог конструкции и решена задача теплопроводности. Верификация полученного численного решения подтверждена результатами термометрии реальной конструкции. Получено решение задачи нестационарной теплопроводности на этапе полимеризации оболочки.

2. 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 (вклад автора 6/16 с.). (**Web of Science, Scopus, BAK**)

В работе представлены результаты моделирования основных этапов технологического процесса производства крупногабаритной оболочки методом непрерывной намотки, описана физическая модель из пакета ANSYS Mechanical APDL для имитации термомеханического поведения материалов оправки и оболочки, получены параметры выбранной модели. Автор принимал личное участие в формулировании систем граничных и начальных условий, проведении серии вычислительных экспериментов, диссертанту принадлежат обработка и представлении результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем О.Ю. Сметанниковым.

3. ANSYS simulation of the thermomechanical behavior of a large-sized composite mandrel with consideration of viscoelasticity / O.Y. Smetannikov, L. Sakhabutdinova, G. Plyinykh // Aerospace. – 2022. – Vol. 9. – №3. – Art.117. (вклад автора 2/5 с.). (**Web of Science, Scopus**)

В работе рассматривается моделирование технологического процесса изготовления крупногабаритной оболочки с учетом термомеханического поведения и вязкоупругости композитной оправки. Представлены результаты экспериментальной идентификации параметров вязкоупругости исследуемого материала. Описан предложенный численный алгоритм адаптации экспериментальных данных для пакета конечно-элементного анализа ANSYS Mechanical APDL. Автор принимал личное участие в формулировании систем граничных и начальных условий, проведении серии вычислительных экспериментов, диссертанту принадлежат обработка и представлении результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем О.Ю. Сметанниковым.

4. 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. (вклад автора 7/15 с.) (**BAK**)

В работе рассмотрены ключевые этапы разработки комплексной методики для прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «песчано-полимерная оправка - пластиковая оболочка» в процессе термообработки с адаптацией экспериментально определенных вязкоупругих характеристик компонентов в САЕ пакете ANSYS Mechanical APDL. Автор принимал личное участие в формулировании систем граничных и начальных условий, проведении серии вычислительных экспериментов, диссертанту принадлежат обработка и представлении результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем О.Ю. Сметанниковым.

5. 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. (вклад автора 1/3 с.) (ВАК)

В работе рассмотрена разработка численных моделей композиционных материалов с учетом их вязкоупругих свойств для дальнейшего моделирования технологического процесса изготовления силовой оболочки баллона высокого давления. Получены вязкоупругие характеристики материала оправки. Описаны подходы к численному определению вязкоупругих характеристик слоев оболочки и получению эффективных характеристик силовой оболочки для дальнейшего моделирования технологического процесса изготовления. Постановка задачи, численное моделирование и обработка результатов выполнены совместно с научным руководителем О.Ю. Сметанниковым.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683405 Российская Федерация. Автоматизация прогнозирования эффективных вязкоупругих свойств слоистого композита: № 2022683467: заявл. 05.12.2022: опубл. 05.12.2022 / Г.В. Ильиных, **Л.Р. Сахабутдинова**, О.Ю. Сметанников (вклад автора 30/100 %)

Программа предназначена для выполнения автоматизированного расчёта полного набора эффективных вязкоупругих свойств слоистого композита в САЕ пакете ANSYS Mechanical APDL. Программа может применяться при моделировании конструкций, частью которых являются однослойные однонаправленные композиты, а также состоящие из них многослойные пакеты с различными углами укладки. Автором выполнена разработка структуры программы, подготовка модулей построения геометрии, построения конечно-элементной сетки, программирование модулей решения задачи квазистатической термомеханики и учёта натяжения оболочки в процессе намотки.

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 (вклад автора 30/100 %)

Программа предназначена для моделирования процесса изготовления сосудов высокого давления из высокопрочных армирующих материалов методом непрерывной мокрой намотки в пакете прикладного моделирования ANSYS Mechanical APDL. Автором выполнена 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.

Прочие публикации

8. Анализ напряженно-деформированного состояния крупногабаритного намоточного изделия в процессе изготовления / О.Ю. Сметанников, **Л.Р. Сахабутдинова** // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов: в 4 т., Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года / Министерство науки и высшего образования РФ; Российская академия наук; Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Том 3. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2023. – С. 177-178.

9. О подходе к численному моделированию эволюции НДС крупногабаритной оправки в процессе изготовления / **Л.Р. Сахабутдинова** // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых, Новосибирск, 14–17 марта 2022 года. – Новосибирск: Издательство Параллель, 2022. – С. 119-120.

10. Идентификация термовязкоупругих характеристик композиционной смеси в Ansys Mechanical APDL / О.Ю. Сметанников, **Л.Р. Сахабутдинова**, Г.В. Ильиных [и др.] // Математическое моделирование в естественных науках. – 2021. – Т. 1. – С. 241-243.

11. О подходе к численному моделированию термоусадки в системе «оболочка - оправка» / О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных, **Л.Р. Сахабутдинова** // Математическое моделирование в естественных науках: Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции, Пермь, 07–09 октября 2020 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 110.

12. Исследование влияния моделей поведения композиционного материала на НДС конструкции / О.Ю. Сметанников, **Л.Р. Сахабутдинова** // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), Алушта, 06–13 сентября 2020 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 342-343.

13. Численная модель процесса изготовления крупногабаритного композиционного изделия с учетом вязкоупругих свойств / **Л.Р. Сахабутдинова**, О.Ю. Сметанников // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии : Тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых, Новосибирск - Шерегеш, 15–22 марта 2019 года / Под редакцией В.В. Козлова. – Новосибирск - Шерегеш: Издательство Параллель, 2019. – С. 149-150.

14. Моделирование термовязкоупруго поведения крупногабаритного изделия в процессе термообработки / О.Ю. Сметанников, **Л.Р. Сахабутдинова** // Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019) : Материалы конференции, Алушта, 24–31 мая 2019 года. – Алушта: Московский

авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 348-350.

15. О подходах к конечно-элементному моделированию термовязкоупругого поведения конструкции из композиционных материалов / Л.Р. Сахабутдинова, О.Ю. Сметанников // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред : Сборник тезисов 9-й всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН, Москва, 19–21 ноября 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Сам Полиграфист", 2019. – С. 79-80.

16. Численный анализ термовязкоупругого поведения композиционного изделия с учетом когезионного взаимодействия / Л.Р. Сахабутдинова, О.Ю. Сметанников // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов. В 4-х томах, Уфа, 19–24 августа 2019 года. Том 3. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. – С. 184-185.

17. Особенности конечно-элементного моделирования термовязкоупругого поведения конструкции из композиционных материалов / Л.Р. Сахабутдинова, О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2019. – Т. 2. – С. 177-179.

18. Разработка численных моделей материалов для описания термомеханического поведения силовой оболочки / О.Ю. Сметанников, Л.Р. Сахабутдинова // Математическое моделирование в естественных науках. – 2018. – Т. 1. – С. 278-281.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертация «Термовязкоупругое поведение крупногабаритного намоточного изделия в процессе изготовления» Сахабутдиновой Ляйсан Рамилевны соответствует паспорту специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела» по техническим наукам.

7. Соответствие диссертационной работы п.14 «Положения о присуждении ученых степеней»: автор корректно ссылается на источники и авторов заимствованных материалов, а также работы, опубликованные в соавторстве и лично.

Диссертация Сахабутдиновой Ляйсан Рамилевны отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Термовязкоупругое поведение крупногабаритного намоточного изделия в процессе изготовления» Сахабутдиновой Ляйсан Рамилевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела».

Заключение принято на заседании кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика».

Присутствовало на заседании 30 чел. Результаты голосования: «за» – 30 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0, протокол № 1 от «31» августа 2023 г.

Столбов Валерий Юрьевич, д.т.н., профессор
Заведующий кафедрой «Вычислительная математика,
механика и биомеханика» ФГАОУ ВО «Пермский
национальный исследовательский политехнический
университет»

Куликов Роман Георгиевич, к.ф.-м.н., доцент
ученый секретарь кафедры «Вычислительная
математика, механика и биомеханика» ФГАОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»