

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Паульзен Анны Евгеньевны

«Математическое моделирование термомеханических процессов в мягких оболочках из тканых полимерных материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации. Возрастающая потребность использования тканых полимерных материалов в устройствах индивидуальной защиты и в средствах защиты технических объектов от ударного воздействия требует совершенствования методов исследования их защитных свойств. Большое значение имеет оценка энергопоглощения слоистых материалов, которая обеспечивается за счет необратимой деформации ткани и трения слоёв ткани и нитей.

Поглощение энергии зависит от характеристик материала, часть из которых не поддается надежному измерению. Приближенные оценки энергопоглощения могут быть получены косвенным тепловым методом, основанным на регистрации температурных полей. Для повышения информативности такого метода требуется предварительный компьютерный расчет температурных полей и их согласование с данными натурального эксперимента. Такое согласование осуществляется при варьировании параметров полимерного тканого материала, прямое измерение которых невозможно. Поэтому в компьютерном расчете должна реализовываться адекватная математическая модель, учитывающая особенности протекания физических процессов в ткани при ударе.

В научной литературе были рассмотрены приближенные математические модели для описания термомеханических процессов, возникающих в ткани при ударе. Однако выявленные в них недостатки требуют усовершенствования как модели, так и алгоритмов расчёта и программного обеспечения.

В силу вышесказанного тема диссертационного исследования, направленная на решение задачи расчетно-экспериментальной оценки динамических температурных полей, обусловленных поглощением энергии тканым материалом при ударе, является актуальной.

Содержание работы. Диссертация изложена на 216 страницах и состоит из введения, четырёх глав, заключения и пяти приложений. Работа включает 2 таблицы и 65 рисунков. Список литературы состоит из 121 наименования.

Во введении обосновывается актуальность исследования термомеханических процессов в полимерных тканых материалах методами математического моделирования при ударе. Сформулированы цель и задачи исследования, излагается краткое содержание работы.

Глава 1 содержит обзор методов математического моделирования процессов взаимодействия слоистых тканых материалов с поражающим жестким элементом. Обосновывается выбор модели энергопоглощения на основе эффекта повышения температуры тканого материала при поглощении энергии удара.

В главе 2 описана разработанная модель термомеханических процессов в ткани при соударении с поражающим элементом. В модели выделяются две стадии соударения: волновая и оболочечная. Рассматриваются процессы начального уплотнения и последующего деформирования многослойного пакета. Такое разделение по стадиям необходимо для обоснованной постановки начальных условий для оболочечной стадии. Оболочечная стадия заключается в описании движения слоистого пакета как объединения переносного движения пакета в целом и относительного движения нитей вдоль искривленной поверхности. Для описания многослойного пакета введены три структурных уровня: пакет в целом, уровень слоя и уровень отдельных нитей. Уровень нитей связывается с уровнем слоя путем осреднения физико-механических характеристик двух семейств нитей с учетом их объемного содержания в слое. Уровень слоя связывается с уровнем пакета в целом с помощью кинематических гипотез, применение которых позволяет уменьшить число переменных в решаемой задаче. Для моделирования растяжения нитей использована модель упругопластического деформирования, позволяющая отразить эффекты гистерезиса в реальном материале. Разрешающие уравнения движения тканого пакета по форме являются уравнениями движения оболочки и включают функции переносных и относительных перемещений. Сформулирована начально-краевая задача, позволяющая определять деформации и температуру ткани.

Глава 3 посвящена построению разностных схем, позволяющих решать уравнения движения на волновой и оболочечной стадиях. Для начальной стадии уплотнения построена неявная разностная схема, результатом расчета по которой являются скорости и перемещения в зоне контакта с поражающим элементом. Эти скорости и перемещения принимаются за начальные условия на оболочечной стадии.

Дискретизация уравнений движения на оболочечной стадии выполнена на основе метода конечных элементов. Для аппроксимации перемещений лицевой поверхности в переносном движении использовались эрмитовы сплайны, а для относительных перемещений нитей лагранжевы сплайны. Выполнен анализ требований к гладкости аппроксимирующих функций, устраняющей сингулярность решения. Для вычисления коэффициентов уравнений движения системы с конечным числом степеней свободы применено уравнение Лагранжа 2-го рода. Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений решается неявной разностной схемой по времени. Блочное представление системы уравнений позволило применить метод расщепления по процессам в переносном и относительном движении. Для разностных уравнений получены асимптотические оценки порядка сходимости.

В главе 4 описан программный комплекс и приведены результаты исследования математической модели на тестовых примерах.

Расчетная часть программного комплекса реализует численную схему с расщеплением. Модуль подготовки исходных данных адаптирован для задания многослойных тканых пакетов с произвольной схемой армирования в каждом слое. Разработана программа визуализации результатов расчета динамического деформирования.

Для исследования математической модели были решены контрольные примеры, в которых изменялись параметры поражающего элемента и свойства тканого пакета. Оценен фактический порядок аппроксимации разностных уравнений. Проанализированы результаты натурального и вычислительного эксперимента и сделан вывод, что количественное согласование результатов может быть достигнуто путем подбора настроечных параметров модели (коэффициентов вязкости).

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены сведения об использовании результатов диссертации, разработанные функционально-объектные схемы и интерфейсы разработанных функциональных классов на языке C++.

Оценка научной новизны, достоверности результатов и практической значимости результатов.

Наиболее существенным результатом диссертации является разработка и обоснование новой математической модели механических и тепловых процессов в многослойной полимерной ткани при ударе твердым поражающим элементом.

Следующие результаты работы обладают **научной новизной**:

1) в математической модели деформирования тканого многослойного образца при соударении с жестким воздействующим объектом и тепловыделения в материале устранена сингулярность решения в начальный момент времени и в точке ударного воздействия за счёт корректной постановки начальных условий и представления многослойного пакета как моментной оболочки;

2) усовершенствован алгоритм расчета деформаций, напряжений и температурных полей на оболочечной стадии деформирования путем расщепления неявной разностной схемы по процессам в переносном и относительном движении;

3) разработан комплекс программ, реализующий разработанный алгоритм вычисления динамических напряжений, деформаций, поглощённой энергии и температур.

Эти результаты являются **значимыми** для комплексного расчётно-экспериментального исследования ударных процессов в мягких оболочках из ткани при проектировании средств защиты и позволяют получать расчетную оценку энергопоглощения в зависимости от выбора конструктивных параметров.

Практическая ценность диссертации состоит в возможности использования разработанных математических моделей, постановок краевых задач, алгоритмов численного решения и комплекса программ при оценке энергопоглощения в тканых полимерных материалах. Практическая значимость подтверждается использованием результатов диссертации при выполнении научно-исследовательских работ.

Степень обоснованности выводов и рекомендаций. Достоверность новых научных результатов (выводов) обеспечивается применением автором апробированных методов и постановок задач механики деформируемого твердого тела, исследованием сходимости алгоритмов численного решения, и подтверждается согласованием результатов расчётов с данными, полученными экспериментально.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты, полученные в диссертации, могут представить интерес для организаций и предприятий, занимающихся проектированием конструкций из тканых полимерных материалов, в том числе: АО «ЦНИИ специального машиностроения», АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва, ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Не указаны пределы варьирования настроечных параметров и их рекомендуемые значения.
2. Остаётся неясным, используются ли в вычислительных программах современные технологии параллельного программирования.
3. В работе не рассматривается возможности удара в направлении, не совпадающем с нормалью к тканому пакету.
4. Приводятся оценки доли поглощенной энергии слоистым пакетом, при этом не рассматривается доля энергии, которая расходуется на нагрев и деформирование ударника.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают научную и практическую значимость результатов, полученных в диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация Паульзен Анны Евгеньевны «Математическое моделирование термомеханических процессов в мягких оболочках из тканых полимерных материалов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной научной задачи расчётно-экспериментальной оценки динамических температурных полей, обусловленных поглощением энергии поражающего элемента многослойным тканым материалом.

Диссертация по области исследования соответствует паспорту специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: п.3 (Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий); п.4 (Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента); п. 5 (Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента).

Работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Содержание автореферата даёт достаточно полное представление о содержании диссертации.

По теме диссертации соискателем опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 2 статьи в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Диссертация соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 11.09.2021), для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Автор работы Паульзен А.Е. заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой компьютерного моделирования
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»,
доктор технических наук (01.02.04 - Механика
деформируемого твердого тела), профессор

Лопатин Александр Витальевич

«7» декабря 2021г.

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

адрес: 660037, Красноярский край, город Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», д. 31

e-mail: info@sibsau.ru, официальный сайт организации: www.sibsau.ru

тел. организации: 8 (391) 264-00-14

Я, Лопатин Александр Витальевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

*Отзыв поступил
в совет 12.01.2022*

*С отзывом ознакомлен
12.01.2022г.*