

На правах рукописи

АКИМОВ ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ**

05.13.18 – "Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург 2007

Работа выполнена на кафедре "Системный анализ и управление"
Государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет"

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор, В.Н. Козлов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, чл.-корр. РАН
профессор П.А. Бутырин

доктор физ.-мат. наук,
профессор А.Н. Чувирев

доктор технических наук,
профессор С.М. Устинов

Ведущая организация: Казанский государственный технический универси-
тет им. А.Н. Туполева

Защита состоится 29 марта 2007 г. в _____ на заседании дис-
сертационного совета Д 212.229.14 при Государственном образовательном
учреждении "Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет" по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
29, телефон (812) 550-41-83.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библио-
теке Санкт-Петербургского государственного политехнического универси-
тета.

Автореферат разослан «28» февраля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Э.А. Кудряшов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Композиционные материалы широко используются в современной промышленности, поскольку они обладают уникальными упругими и прочностными свойствами. В авиационной промышленности из таких материалов изготавливаются лонжероны лопастей вертолетов и ветроэнов, детали корпусов, целые корпуса и другие элементы.

Управление процессом полимеризации связано с разработкой теплофизических математических моделей. Основные трудности при создании таких моделей возникают из-за необходимости учета:

- многослойности конструкций с различными теплофизическими свойствами;
- фазовых переходов при полимеризации, которые описываются моделями Стефана;
- многостадийности процесса нагрева.

На предприятиях для производства лонжеронов лопастей применяются пресс-формы. Пресс-форма состоит из двух плит – нижней и верхней, внутрь которой укладываются композиционные материалы и под воздействием температуры и давления происходит полимеризация. Для процесса полимеризации необходим режим равномерного прогрева и удержания температуры на определенном уровне с последующим плавным охлаждением. Качество изготовления изделия напрямую зависит от интенсивности нагрева, времени нагрева и равномерности нагрева всех участков лонжерона лопастей.

На предприятиях, где изготавливаются лонжероны лопастей, отсутствует программное регулирование и поддержание температуры. Датчики используются только для регистрации информации о ходе технологического процесса. Балансировка пресс-формы по тепловому режиму осуществляется оператором. Поэтому качество изделий зависит от его опыта, квалификации и других субъективных факторов.

Для получения изделия высокой прочности необходима комплексная автоматизация технологического процесса изготовления многослойных изделий методом полимеризации в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП). Для этого требуются:

- разработка комплекса математических моделей теплофизических процессов на различных стадиях процессов;
- теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов в установках АВТП, где изготавливаются изделия методом полимеризации на базе разработанных моделей;
- разработка алгоритмов и программного обеспечения управления теплофизическими процессами на основе исследований;
- разработка новых установок (приборов) для системы автоматического

- управления технологическим процессом полимеризации;
- исследование влияний температуры, времени, скорости прогрева и давления на качество изготавливаемых материалов;
 - исследование готовых изделий на надежность, долговечность и прогнозирование.

Таким образом, проблема построения математических моделей теплофизических процессов, разработка оптимальных алгоритмов и программ управления теплофизическими процессами, разработка методики выявления в ходе технологического процесса изготовления источников процесса деградации, выявление влияния температуры, времени, скорости прогрева и давления на качество изготавливаемых материалов, разработка новых установок (приборов) для управления технологическим процессом при изготовления многослойных изделий из композиционных материалов актуальна с практической и научной точек зрения.

Цель работы – разработка и исследование комплекса математических моделей для решения задач теплообмена в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП), разработка систем управления теплофизическими процессами в таких условиях для получения качественных, надёжных изделий из композиционных материалов и разработка рекомендаций для улучшения технологии.

Основные задачи исследований:

1. Выявление физико-химических факторов, определяющих температурные поля в процессе полимеризации композиционных материалов, и их учет в математических моделях и задачах.
2. Постановка и решение математических задач, описывающих температурные поля в процессе полимеризации в установках АВТП с учетом фазовых переходов и многостадийности.
3. Разработка конечно-разностных схем и выполнение расчетов пространственно-временных распределений температурных полей в установках АВТП.
4. Анализ вклада различных процессов в температурные поля в установках АВТП и разработка алгоритмов и программ управления теплофизическими процессами, разработка новых установок (приборов) для систем автоматического управления на всех этапах изготовления изделий.
5. Разработка методики для выявления в ходе технологического процесса изготовления источников процесса деградации.
6. Выявление влияния температуры, времени, скорости прогрева и давления на качество изготавливаемого материала.
7. Разработка рекомендаций для управления процессом полимеризации в установках АВТП.

Практическая ценность работы заключается в том, что созданы новые модели и методы расчета температурных полей в установках АВТП для

получения композиционных материалов. На основе произведенных расчетов разработаны алгоритмы и программы управления теплофизическими процессами в установках АВТП, разработан многопозиционный регулятор температуры для системы автоматического управления на всех этапах изготовления изделий, разработана методика для выявления в ходе технологического процесса изготовления источников процесса деградации, которые влияют на надёжность и долговечность изделий в процессе их эксплуатации, исследованы и выявлены влияние температуры, времени, скорости прогрева и давления на качество изготавливаемых материалов, исследованы на надёжность и долговечность готовых изделий. Полученные результаты доведены до уровня инженерных методик и используются для совершенствования процессов изготовления многослойных изделий в Кумертауском авиационном производственном объединении со значительным экономическим эффектом. Экономический эффект создается как за счет сокращения затрат на обработку путем исключения штамповки и резки, так и за счет сокращения брака при изготовлении лонжеронов лопастей вертолетов.

Научная новизна. В данной работе впервые рассмотрен новый класс задач и математических моделей, описывающих тепловые поля в многослойных конструкциях с учетом фазовых переходов и многостадийности процессов применительно к условиям получения изделий методом полимеризации композиционных материалов. На основе аналитических решений и конечно-разностных схем осуществлены расчеты пространственно-временных зависимостей тепловых полей в многослойных конструкциях с конкретными теплофизическими свойствами и изучен вклад различных факторов, определяющих температурные поля в таких условиях.

Разработаны алгоритмы и программы управления теплофизическими процессами в установках АВТП при изготовлении многослойных изделий из композиционных материалов методом полимеризации, разработан новый прибор многопозиционный регулятор температуры для системы автоматического управления. Разработана методика для выявления в ходе технологического процесса изготовления источников процесса деградации, которые влияют на надёжность и долговечность изделий в процессе их эксплуатации. Исследованы и выявлены влияние температуры, времени, скорости прогрева и давления на качество изготавливаемых материалов. Проведены исследования готовых изделий на надёжность, долговечность и проведено прогнозирование.

Достоверность результатов, полученных в ходе исследований, определяется тем, что в основу положены уравнения тепло и массопереноса, полученные на основе проверенных законов сохранения, а также сопоставлениями результатов теоретических и экспериментальных исследований, показавшими удовлетворительное согласие теории и эксперимента. Опубли-

кованные ранее в печати теоретические и экспериментальные результаты хорошо согласуются с описанной в данной работе теорией и могут быть представлены как ее частные случаи.

На защиту выносятся:

1. Доказательство адекватности математических моделей температурных полей, возникающих в процессе полимеризации, экспериментально измеренным температурам в установках АВТП при изготовлении многослойных изделий и конструкций.
2. Новые математические модели и аналитические методы решения задач теплообмена в многослойных конструкциях с изменяющимся агрегатным состоянием, полученные на основе метода изотермических поверхностей.
3. Анализ влияния различных процессов, определяющих температурные поля в процессе полимеризации, на основе конечно-разностных расчетов.
4. На основе исследований разработка оптимальных алгоритмов и программ управления теплофизическими процессами на всех этапах изготовления изделий.
5. Разработка многопозиционного регулятора температуры для системы автоматического управления технологическим процессом полимеризации.
6. Разработка методики для выявления в ходе технологического процесса изготовления источников процесса деградации, которые влияют на надёжность и долговечность изделий в процессе их эксплуатации.
7. Выявление влияний температуры, времени, скорости прогрева и давления на качество изготавливаемых материалов.
8. Рекомендации по управлению процессом изготовления многослойных конструкций из композиционных материалов методом полимеризации и улучшению качества изделий.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 4-ой Уральской региональной конференции «Функционально-дифференциальные уравнения и их приложения» (г. Уфа, 1989 г.); пятой конференции молодых ученых «Исследования по механике, физике, механике и процессам управления» (г. Уфа, 1987 г.); пятом всесоюзном научно-техническом симпозиуме «Проблемные вопросы автоматизации производства» (г. Тула, 1991 г.); научной конференции «Вопросы проектирования информационных и кибернетических систем» (г. Уфа, 1991 г.); третьей всесоюзной конференции «Надежность дискретных устройств» (г. Ташкент, 1977 г.); всесоюзной научно-технической конференции «Автоматизация технологической подготовки производства и управления технологическими процессами в приборостроении» (г. Москва, 1980 г.); на всероссийской научной конференции «Физика конденсированного состояния» (г. Стерлита-

мак, 1997 г.); на республиканской научно – практической конференции «Проблемы интеграции науки, образования и производства южного региона Республики Башкортостан» (г.Салават, 2001г.), на V- ой Российской научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (г.Оренбург, 2001г.), а также на научном семинаре кафедры теоретической физики Стерлитамакского госпединститута под руководством член-корр. д.ф.-м. наук, проф. Шагапова В.Ш. и д.т.н., проф. Филиппова А.И.; на научном семинаре кафедры прикладной физики БашГУ под руководством член-корр. проф. Саяхова Ф.Л. и член-корр., проф. Халикова Г.А.

Публикации. По теме диссертации опубликованы более 50 работ, в том числе 4 монографии.

Структура и объем работы.

В первой главе диссертационной работы приведен краткий обзор литературы по теплообмену и управлению теплофизическими процессами при изготовлении многослойных изделий из композиционных материалов с изменяющимся агрегатным состоянием. Дан анализ проблем, возникающих при изготовлении таких изделий.

Обоснована проблема и поставлены задачи исследований теплообмена в установках АВТП при изготовлении многослойных изделий из композиционных материалов.

Во второй главе даны математические постановки задач, описывающих теплофизические процессы при изготовлении изделий на установках АВТП. Процесс изготовления изделия по особенностям теплофизических процессов представлен в виде трех этапов. На первом этапе изготовления осуществляется нагрев изделия до режима полимеризации. На втором этапе осуществляется процесс полимеризации многослойных конструкций. На третьем этапе происходит процесс охлаждения изделия до температуры окружающей среды. На всех трех этапах предъявляются жесткие требования на скорости изменения температуры, давления в технологическом мешке и температурному режиму среды.

Третья глава посвящена численным методам решения задач теплообмена в многослойных конструкциях с фазовыми переходами. Рассмотрены: метод сеток, метод переменных направлений и дробных шагов. Описаны алгоритмы расчетов распределения температуры по узлам слоев изделия.

Четвертая глава посвящена влиянию технологического процесса изготовления на эксплуатационные характеристики изделий.

Проведен анализ объекта исследования. Рассмотрен технологический процесс изготовления изделия. Приведены описания экспериментальной установки, методика эксперимента, испытания на растяжения, на изгиб, на ударную вязкость и проведен контроль крутки изделия. Описаны результа-

ты экспериментальных исследований. На основе экспериментальных данных исследованы на надежность, долговечность и выявлены влияния погрешностей управления на эксплуатационные характеристики изделия.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию температурных полей в теплообменных установках для получения многослойных конструкций из композиционных материалов, когда между слоями происходит изменение агрегатного состояния материала – полимеризация. Путем сопоставления с экспериментальными данными проверена достоверность выбранной математической модели. Проведенные экспериментальные исследования и расчеты тепломассообмена в многослойных конструкциях из композиционного материала показали удовлетворительное согласие с теоретическими данными.

Шестая глава посвящена исследованию и разработке алгоритмов и программ управления теплофизическими процессами при изготовлении многослойных изделий из композиционных материалов методом полимеризации.

Процесс изготовления – один из наиболее существенных факторов, от которого зависит успешное применение композиционных материалов в изделиях различных типов. Особая значимость процесса изготовления определяется следующими причинами:

- необходимостью изготовления основного конструкционного материала (предварительно пропитанной ленты или однослойных листов) из исходных однонаправленных или тканевых полотен,
- трудностями при переработке некоторых компонентов, влияющих на свойства получаемых изделий. Это – хрупкость, отсутствие эластичности и т.д.,
- чрезвычайной важностью строгого контроля процесса для достижения монолитности и постоянства свойств продукции,
- высокими требованиями к соединяемым и контактируемым поверхностям.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, приложения, содержит 345 страниц машинописного текста, в том числе 24 таблицы и 64 рисунка, список литературы содержит 172 ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Проблема тепломассообмена в различных средах имеет большое практическое значение для современного производства. Знание механизма переноса теплоты и массы дает возможность изменять технологический процесс производства, повышать мощность работы теплоэнергетических установок, создавать новые эффективные способы производства материалов и изделий. Особенно остро стоят такие проблемы в машиностроительной промышленности, где создаются многослойные конструкции из композиционного материала в установках автоматического ведения технологического процесса. Возросшие требования к качеству таких изделий, их ресурсу, выдвигают задачу повышения точности параметров технологического процесса изготовления, что вызывает необходимость учета большого количества взаимосвязей и возмущающих воздействий. Для соблюдения технологических требований изготовления качественных изделий возникает необходимость дальнейшего развития методов исследований и решения многослойных задач из композиционного материала с изменяющимся агрегатным состоянием и физико-химической природы материала. В большинстве случаев такие задачи решаются при помощи увеличения количества измерительных датчиков. Но этот путь мало эффективен и экономически не выгоден в случаях изделий больших и сложных конструкций, причем установить датчики внутри объекта зачастую практически невозможно. Это обуславливает необходимость точного расчета температурных полей в многослойных конструкциях из композиционного материала в установках автоматического ведения технологического процесса. Технология получения композиционных материалов состоит в следующем. Стеклоткань пропитывается специальными связующими материалами. Многослойная конструкция из пропитанной стеклоткани, которой придана требуемая форма, подвергается специальной температурной обработке. В результате процесса полимеризации получается изделие, которое по своим прочностным свойствам превосходит некоторые параметры металлических изделий. При этом не требуется дорогостоящая обработка (штамповка, резание и т.д.). В качестве основного оборудования для полимеризации используется пресс-форма с электроподогревом. Процесс полимеризации определяется термическими условиями, создаваемыми специальными нагревателями. Основным технологическим элементом таких установок, таким образом являются нагреватели, определяющие теплофизические процессы в пресс-формах.

1. Геометрия узла установки для получения композиционных материалов

На рис. 1 приведена обобщенная геометрия узла для получения компози-

ционных материалов. Пространство между матрицей-нагревателем (1), выполненной из теплопроводящего материала, и технологическим мешком (2) заполняется многослойной стеклотканью, пропитанной связующими жидкими материалами (3). Полимеризация компонента осуществляется за счет нагревания его по заданному температурному режиму, описанному ниже.

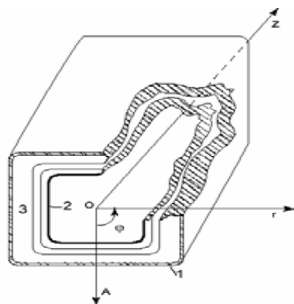


Рис. 1. Геометрия узла установки для получения композиционных материалов в разрезе: 1– нагреватель-матрица, 2– технологический мешок, 3– многослойный композиционный материал (число слоев $k \approx 60$).

2. Температурный режим в установках автоматического ведения технологического процесса

На рисунке 2 приведен обобщенный график зависимости температуры от времени, наиболее часто реализующийся в установках АВТП. Температурный процесс полимеризации разделяется на III этапа.

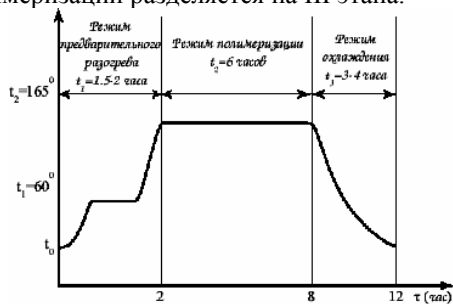


Рис. 2. Обобщенный экспериментальный график зависимости температуры от времени в установках АВТП: t_0 – начальная температура, t_1 – температура предварительного разогрева, t_2 – температура режима нагревания, τ – время.

На **первом этапе** (1,5-2 ч.) происходит повышение температуры изделия от температуры среды до температуры полимеризации под действием источников тепла с одновременным повышением давления в технологическом мешке до 9-10 кг/см². При достижении температуры 60° скорость изменения температуры понижается до нуля, и в течении 30 минут поддерживается постоянная температура (предварительный разогрев). В этот период происходит размягчение, уплотнение полимеризующейся массы, удаление воздушных пузырей и излишней влаги.

На **втором этапе** (6 ч.) образуется фронт полимеризации, который продвигается внутрь конструкции до технологического мешка. Процесс полимеризации сопровождается выделением тепла фазового перехода, так что для поддержания заданной температуры необходимы специальные управляющие устройства.

На **третьем этапе** (3-4 ч.) происходит охлаждение готового изделия до температуры среды.

На каждом из этапов определены скорости возрастания температуры и соответствующие температурные режимы и параметры давления.

Своеобразие теплофизических процессов на каждом из этапов создает необходимость использования различных математических моделей.

В связи с этим была исследована зависимость изменения температуры во времени в многослойном композиционном материале.

На рис. 3 показана зависимость изменения температуры во времени в многослойном композиционном материале.

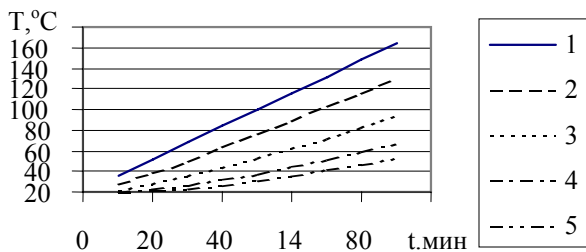


Рис. 3. Зависимость изменения температуры во времени в многослойном композиционном материале: 1 - однослойный материал, 2-4 двухслойный материал, 5 - тринадцатислойный материал. (2- в первом узле, 3 - во втором узле, 3 и 5 - в третьем узле).

Видно, что в однослойном материале температура со временем растет линейно. В двухслойном материале эта зависимость соблюдается только в первом узле, слегка начинает нарушаться во втором и третьем узлах. Нарушение от линейности существенно проявляется в многослойных конст-

рукциях. Это видно из сравнения кривых 4 и 5. Однако с увеличением количества слоев эта неравномерность изменения температуры во времени во внутренних слоях проявляется слабее, что следует из рис. 4.

Как видно из рис. 5. изменения температуры по толщине материалов неравномерные. Эта закономерность наиболее проявляется вблизи нагревателей, причем для двухслойных материалов она распространяется на всю толщину, а в многослойных образцах - только вблизи нагревателей.

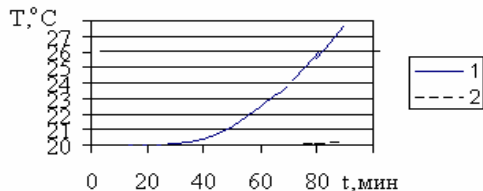


Рис. 4. Зависимость изменения температуры во времени в восьмом узле многослойного композиционного материала: 1 – двухслойный материал, 2– тринадцатислойный материал.

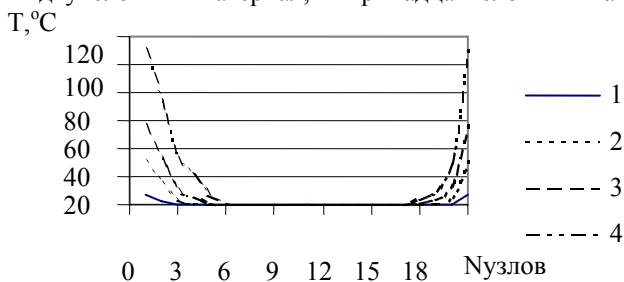


Рис. 5. Изменения температуры по толщине многослойного композиционного материала (13 слоев) при различных временах: 1 – 10 мин, 2- 30 мин, 3 – 50 мин, 4 – 90 мин.

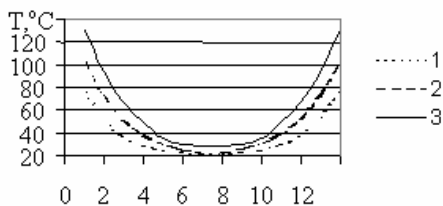


Рис. 6. Изменения температуры по толщине двухслойного материала при различных временах: 1 – 90 мин, 2- 70 мин, 3 – 50 мин.

Таким образом, проведенные расчетные исследования показывают, что температура в многослойных материалах изменяется неравномерно как во времени, так и по толщине. Эти особенности могут существенно влиять на прочностные свойства композиционных материалов. Поэтому возникает задача контроля за изменением температуры в материале. Для этого необходимо разработать систему контроля за процессом изготовления композиционного материала методом полимеризации.

3. Математическая постановка задач тепломассообмена в установках АВТП и их аналитические решения.

На первом этапе математическая модель процессов в цилиндрической системе координат для многослойной конструкции, изображенной на рис. 1 имеет вид:

$$\frac{1}{a_k} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_k(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{b_k} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial r} + f_k(r, \tau); \quad (1)$$

$$\frac{1}{c_k} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 m_k(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial r} + h_k(r, \tau); \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u_k(r, \tau)}{\partial \tau^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_k(r, \tau)}{\partial r} - \frac{u_k(r, \tau)}{r^2} = \frac{k(1 + \mu)}{1 - \mu} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r}, \quad (3)$$

$$R_{k-1}(\varphi) < r < R_k(\varphi) \text{ для } k=1, 2, \dots, n,$$

при начальных условиях

$$t_k(r, 0) = t_0; \quad (4)$$

$$m_k(r, 0) = m_0; \quad (5)$$

$$u_k(r, 0) = 0; \quad (6)$$

и при граничных условиях

$$t_n(R_n(\varphi), \tau) + \frac{\lambda_n}{\alpha_n} \frac{\partial t_n(R_n(\varphi), \tau)}{\partial n} = P_n(\varphi, \tau); \quad (7)$$

$$m_n(R_n(\varphi), \tau) + \frac{\chi_n}{\beta_n} \frac{\partial m_n(R_n(\varphi), \tau)}{\partial n} = 0; \quad (8)$$

$$U_n(R_n(\varphi), \tau) = U_0; \quad (9)$$

$$t_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau) = t_k(R_{k-1}(\varphi), \tau); \quad (10)$$

$$m_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau) = m_k(R_{k-1}(\varphi), \tau); \kappa = 2, \dots, n; \quad (11)$$

$$U_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau) = U_k(R_{k-1}(\varphi), \tau); \quad (12)$$

$$t_1(R_0(\varphi), \tau) - \frac{\lambda_1}{\alpha_1} \frac{\partial t_1(R_0(\varphi), \tau)}{\partial n} = P_0(\varphi, \tau); \quad (13)$$

$$m_2(R_1(\varphi), \tau) - \frac{\chi_2}{\beta_2} \frac{\partial m_2(R_1(\varphi), \tau)}{\partial n} = 0; \quad (14)$$

$$U_1(R_0(\varphi), \tau) = U_0; \quad (15)$$

$$\lambda_{k-1} \frac{\partial t_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial n} = \lambda_k \frac{\partial t_k(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial n}; \quad (16)$$

$$\mathfrak{a}_{k-1} \frac{\partial m_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial n} = \mathfrak{a}_k \frac{\partial m_k(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial n}; \quad (17)$$

где a_k, λ_k, α_k - коэффициенты температуропроводности, теплопроводности и теплопередачи, соответственно, $c_k, \mathfrak{a}_k, \beta_k$ - коэффициенты проводности потенциала массы, массопередачи и массоотдачи; W - доля жидкого состояния рассматриваемой среды (при затвердевании вещества); γ - плотность этой части среды; σ - скрытая теплота кристаллизации; τ - время; x - пространственная координата; t_k - температура области $D_{k,\tau}$, $k = 1, 2$; m_k - объёмная концентрация k -ого компонента; u_k - поле скоростей или деформации.

Отметим, что в задаче (1)-(17) описываются взаимосвязанные процессы тепло- и массообмена. Уравнение теплопроводности (1) содержит наряду с источниками тепла $f(r, \tau)$ слагаемые, обусловленные тепловыделениями за счет градиента m_k и дополнено соответствующими уравнениям (2) и (3),

где μ - безразмерный коэффициент, характеризующий свойства термонапряжений.

На втором этапе теплофизические процессы описываются математической моделью в виде семейства начально-граничных задач:

$$\frac{1}{a_k} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_k(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r} + \frac{1}{b_k} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial r} + f_k(r, \tau); \quad (21)$$

$$\frac{1}{c_k} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 m_k(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial r} + h_k(r, \tau); \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 u_k(r, \tau)}{\partial \tau^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_k(r, \tau)}{\partial r} - \frac{u_k(r, \tau)}{r^2} = \frac{k(1+\beta)}{1-\beta} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r}, \quad (23)$$

где

$$\frac{1}{b_k} \frac{\partial m_k(r, \tau)}{\partial r} + f_k(r, \tau) = \zeta(r, \tau);$$

$$t_k = t_{k,1}; m_k = m_{k,1}; u_k = u_{k,1} = u_r;$$

$$R_{k-1}(\varphi) < r < R_k(\varphi) \quad \text{для } k=1, 2, \dots, j, \dots, n;$$

$R_0(\varphi) < r < \xi(\varphi, \tau)$ при $l=I, \xi(\varphi, \tau) < r < R_n(\varphi)$ при $l=II$,
при начальных условиях

$$t_k(r, 0) = t_0; \quad (24)$$

$$m_k(r, 0) = m_0; \quad (25)$$

$$u_k(r, 0) = 0; \quad (26)$$

и при граничных условиях

$$t_n(R_n(\varphi), \tau) + \frac{\lambda_n}{\alpha_n} \frac{\partial t_n(R_n(\varphi), \tau)}{\partial r} = P_n(\varphi, \tau); \quad (27)$$

$$m_n(R_n(\varphi), \tau) + \frac{\beta_n}{\beta_n} \frac{\partial m_n(R_n(\varphi), \tau)}{\partial r} = 0; \quad (28)$$

$$U_n(R_n(\varphi), \tau) = U_0; \quad (29)$$

$$t_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau) = t_k(R_k(\varphi), \tau) = P_{k-1}(\varphi, \tau); \quad (30)$$

$$m_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau) = m_k(R_k(\varphi), \tau) = Q_{k-1}(\varphi, \tau); \quad \kappa = 2, \dots, n; \quad (31)$$

$$U_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau) = U_k(R_k(\varphi), \tau); \quad (32)$$

$$t_1(R_0(\varphi), \tau) - \frac{\lambda_1}{\alpha_1} \frac{\partial t_1(R_0(\varphi), \tau)}{\partial r} = P_0(\varphi, \tau); \quad (33)$$

$$m_2(R_1(\varphi), \tau) - \frac{\beta_2}{\beta_2} \frac{\partial m_2(R_1(\varphi), \tau)}{\partial r} = 0; \quad (34)$$

$$U_1(R_0(\varphi), \tau) = U_0; \quad (35)$$

$$t_I(\xi(\varphi, \tau), \tau) = t_{II}(\xi(\varphi, \tau), \tau) = t_{kp}; \quad (36)$$

$$m_I(\xi(\varphi, \tau), \tau) = m_{II}(\xi(\varphi, \tau), \tau) = m_{kp}; \quad (37)$$

$$U_I(\xi(\varphi, \tau), \tau) = U_{II}(\xi(\varphi, \tau), \tau); \quad (38)$$

$$t_{II}(a\xi(\varphi, \tau), \tau) = t_0; \quad (39)$$

$$m_{II}(a\xi(\varphi, \tau), \tau) = m_0; \quad (40)$$

$$U_{II}(a\xi(\varphi, \tau), \tau) = 0; \quad (41)$$

$$\lambda_{k-1} \frac{\partial t_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial r} = \lambda_k \frac{\partial t_k(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial r}; \quad (42)$$

$$\alpha_{k-1} \frac{\partial m_{k-1}(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial r} = \partial \ell_k \frac{\partial m_k(R_{k-1}(\varphi), \tau)}{\partial r}; \quad (43)$$

при $R_k(\varphi) \neq \xi(\varphi, \tau)$;

$$\lambda_I \frac{\partial t_I(\xi(\varphi, \tau), \tau)}{\partial r} - \lambda_{II} \frac{\partial t_{II}(\xi(\varphi, \tau), \tau)}{\partial r} = \sigma \frac{d\xi(\varphi, \tau)}{d\tau}; \quad (44)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_I \left[\frac{\partial m_I(\xi(\varphi, \tau), \tau)}{\partial r} + \tilde{A} \delta \frac{\partial t_I(\xi(\varphi, \tau), \tau)}{\partial r} \right] - \\ & - \alpha_{II} \left[\frac{\partial m_{II}(\xi(\varphi, \tau), \tau)}{\partial r} + \tilde{A} \delta \frac{\partial t_{II}(\xi(\varphi, \tau), \tau)}{\partial r} \right] = g; \end{aligned} \quad (45)$$

При решении этой задачи использован метод изотермических поверхностей (ИП). Метод изотермических поверхностей позволяет исследовать процесс распространения тепла и массы вещества в их взаимосвязи, как по одномерной, так и по многомерной схеме, в средах с изменяющимся состоянием при наличии нестационарных сопряжении. Идею метода проиллюстрируем на примере следующей двухслойной задачи.

Найти функции $t_k(x, \tau)$ и $\xi(\tau)$, $k=1,2$ такие, что

$$L[t_k(x, \tau)] = 0, k = 1,2; \quad (46)$$

$x \in D_{1,\tau} = \{0 < x < \xi_1(\tau)\}$ при $k=1$, $x \in D_{2,\tau} = \{\xi_1(\tau) < x < \xi_2(\tau)\}$ при $k=2$
 $0 < \tau < T; 0 < \xi_1(\tau) < x$;

$$t_k(x, 0) = \varphi(x), k = 1,2, \quad (47)$$

$$t_1(0, \tau) = f(x), \quad (48)$$

$$t_k(\xi_1(\tau), \tau) = 0, k = 1,2; \tau > 0; \quad (49)$$

$$t_2(\xi_2(\tau), \tau) = \psi(\tau); \quad (50)$$

$$1[\xi_1(\tau)] = 0, \quad (51)$$

где

$$L[t_k(x, \tau)] = \frac{\partial t_k(x, \tau)}{\partial \tau} - a_k \frac{\partial^2 t_k(x, \tau)}{\partial x^2};$$

$$1[\xi_1(\tau)] = \lambda_1 \frac{\partial t_1(\xi_1(\tau), \tau)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial t_2(\xi_1(\tau), \tau)}{\partial x} - \sigma \gamma w \frac{d\xi_1(\tau)}{d\tau}; \xi_1(+0) \neq 0.$$

Сущность метода изотермических поверхностей состоит в замене истинного распределения температуры $t_{k,\tau}(x)$ внутри каждой области $D_{k,\tau}$ нестационарным при фиксированных положениях границы $S_{i,\tau} : \xi_{i,n} = \xi_i(\tau_n)$, $n = 1, 2, 3, \dots$. Фиксируя произвольно положения границы $S_{i,\tau} : \xi_i = \xi_{i,n}$, заменяем область непрерывного изменения этой границы дискретным множеством $\{\xi_{i,n}\}$, представляющим возрастающую и ограниченную сверху последовательность. В областях $D_{i,\tau_n} = \{0 < x < \xi_{i,n}\}$ находим нестационарное распределение температур $t_{k,n}(x, \tau)$ и, используя их, функцию непрерывного аргумента $\tau = \tau(\xi_i)$ заменяем функцией дискретного аргумента $\tau_n = \tau(\xi_{i,n})$.

Благодаря этому в непрерывном спектре собственных значений задачи выделяется дискретный спектр. Это позволяет отобрать и нормировать минимальную систему собственных функций в непрерывном спектре в соответствующих областях. Решения $t_{k,n}(x, \tau)$ получаются в виде [17]:

$$t_{i,n}(x, \tau) = t_0(1 - y_{i,n}) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m\pi} \quad (52)$$

$$\left\{ \Delta t_1 \sin[m\pi(y_{i,n} - 1)] - t_0 \sin m\pi y_{i,n} \right\} \exp[-(m\pi)^2 F_{o_{i,n}}]$$

$$t_{2,n}(x, \tau_n) = t_0 \left\{ \frac{y_{i,n} - 1}{a - 1} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m\pi} \sin \left[m\pi \frac{(y_{i,n} - 1)}{a - 1} \right] \exp[-(m\pi)^2 F_{o_{i,n}}] \right\}; \quad (53)$$

На основании сопоставления расчетов по полученным решениям двухслойной задачи методом изотермических поверхностей и решение классической задачи Стефана показано, что расхождение между ними не превышает одного процента. Это сопоставление послужило основанием для использования метода изотермических поверхностей для исследования второго этапа технологического процесса полимеризации на установках АВТП.

Постановка задачи по радиальной схеме в цилиндрической системе координат для **третьего этапа** процесса имеет вид:

$$\frac{1}{a_k} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t_k(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r} + f_k(r, \tau); \quad (57)$$

$$\frac{\partial^2 U_k(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_k(r, \tau)}{\partial r} - \frac{U_k(r, \tau)}{r^2} = \frac{k(1 + \mu)}{1 - \mu} \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r}; \quad (58)$$

$$k = 1, R_0(\varphi) < r < R_1(\varphi); k = 2, R_1(\varphi) < r < R_2(\varphi); \quad (59)$$

$$t_k(r, 0) = t_0; \quad (60)$$

$$u_k(r, 0) = U_0; \quad (61)$$

$$t_2(R_2, \tau) + \frac{\lambda_2}{\alpha_2} \frac{\partial t_2(R_2, \tau)}{\partial r} = P_2(\tau); \quad (62)$$

$$U_2(R_2, \tau) = U_0; \quad (63)$$

$$t_2(R_1, \tau) = t_1(R_1, \tau) = P_1(\tau); \quad (64)$$

$$U_2(R_1, \tau) = U_1(R_1, \tau); \quad (65)$$

$$t_1(R_0, \tau) - \frac{\lambda_1}{\alpha_1} \frac{\partial t_1(R_0, \tau)}{\partial r} = P_0(\tau); \quad (66)$$

$$U_1(R_0, \tau) = U_0; \quad (67)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2(R_1, \tau)}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial t_1(R_1, \tau)}{\partial r}; \quad (68)$$

Поставленная задача третьего этапа решена классическим методом преобразования Фурье [17]. Расчеты осуществлены также конечно-разностным методом.

4. Экспериментальное исследование тепломассообмена в установке автоматического ведения технологического процесса и сопоставление теории и эксперимента

Общая схема экспериментальной установки состоит из следующих основных устройств (рис. 7). При проведении экспериментов в экспериментальной установке использовались два типа выпрямительных устройств, ВАК-3200/48УЧ и ТЕ-800/48УЧ. На одну пресс-форму использовался 1 выпрямитель ВАК-3200/48 или два выпрямителя ТЕ-800/48, что давало возможность раздельной регулировки верхнего и нижнего нагревательного элемента.

В устройство управления тиристорами входят следующие блоки: блок защиты, блок сигнализации, блок импульсного регулирования, блок им-

пульсно-фазового управления, блок выходных усилителей.

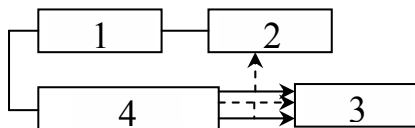


Рис. 7. Общая схема экспериментальной установки:

1-Выпрямительное устройство-источник питания, 2-Устройство управления источником питания, 3-Измерительно-регистрирующее устройство, 4-Исполнительное устройство.

На рис. 8 иллюстрируются функциональные связи устройства управления тиристорами с внешними элементами.

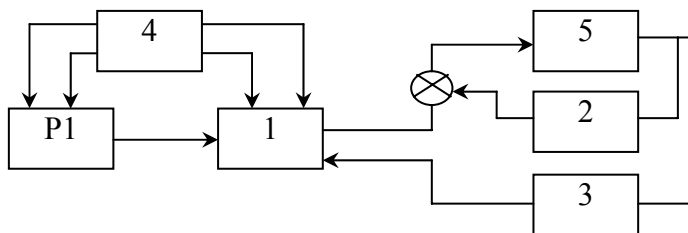


Рис. 8. Функциональная схема управления тиристорами:

1-устройство управления тиристорами, 2-датчик тока, 3- устройство контроля и сигнализации, 4- пульт дистанционного управления, 5- блок тириستоров, P 1 - регулятор напряжения.

Методика эксперимента. Пресс-форма для прессования изделия состоит из двух плит: верхней и нижней. Нижняя плита стационарная, верхняя плита открывающаяся относительно нижней. В нижней и верхней плите выполнены ручки, повторяющие наружный контур изделия в закрытом состоянии. Наборы листов из композиционного материала собраны в пакеты и, предварительно опрессованные, укладываются при открытой верхней плите в нижний ручей совместно с резиновой пресс-камерой (технологическим мешком). Затем закрывают при помощи спец-ключей верхнюю плиту, совмещая плоскость разъема нижней плиты с верхней. После выполнения операций закладки пакетов изделия в пресс-форму и подготовки к работе, пресс-форма включается на обогрев, выводится на заданный температурный режим, параллельно включается система, обеспечивающая давление в резиновой пресскамере. Давление поддерживается при помощи редуктора с периодическим визуальным наблюдением за манометром-самописцем и дублирующим манометром типа МТ, установленным в магистрали, подведенной к пресс-форме. Нагружение пресскамеры сжатым воздухом произ-

водится плавно.

После завершения прессования (полимеризации) изделия пресс-форма раскрывается при помощи спец-ключей. Предварительно перед раскрытием обязательно сбрасывается давление с пресскамеры через клапан.

Снятие характеристик проводилось в 3-х вариантах.

В пустой пресс-форме – с контролем температуры в теле пресс-формы. При закладке препарированного изделия баз давления – с контролем температуры в теле пресс-формы и изделия. При закладке изделия с подачей давления в камеру прессования - контролем температуры в теле пресс-формы и изделия.

В первом и третьем случаях контроль температуры производится в 10 точках, во втором случае контроль производится по 22-м точкам. Кроме того проводилось снятие характеристик пресс-форм при реакции на единичное воздействие определенной мощности, распределение температуры по длине пресс-формы без внешних воздействий со стороны оператора.

Снятие характеристик проводилось в автоматическом режиме и позволило проследить реакцию пресс-форм при отработке переходных процессов.

Мощность, необходимая для поддержания температурного режима, сильно зависит от степени теплоизоляции пресс-формы, температуры окружающего воздуха и скорости движения воздуха. Распределение температуры по длине пресс-формы также зависит от этих параметров, а так же от положения нагревательных элементов, их изоляции и точности геометрической формы. При снятии характеристик скорость движения диаграммной ленты была 60 и 180 мм/час, скорость регистрации 4 и 12 рег/мин.

Описание результатов экспериментальных исследований и сопоставление теоретической и экспериментальной кривых

Зависимость температуры от времени может быть исследована двумя способами:

- аналитически – через математические зависимости и формулы, что в ряде случаев приближенно позволяет описать объект управления (ОУ), иногда из-за сложности ОУ это способ невозможно применить;
- по экспериментальным данным с помощью экспериментальной переходной характеристики, которая представляет собой график, построенный по данным динамического процесса на ОУ.

Представленная в настоящей работе экспериментальная переходная характеристика (рис. 9) получена при воздействии на пресс-форму лонжерона лопасти единичного ступенчатого воздействия и представляет изменения температуры во времени.

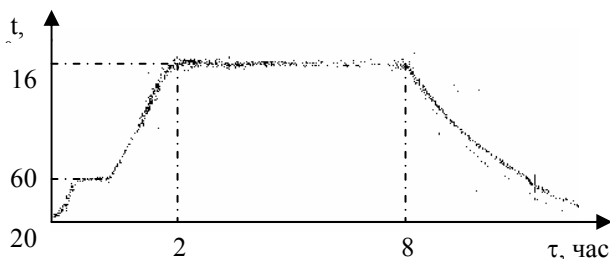


Рис. 9. Экспериментальная циклограмма процесса полимеризации

Анализируя режим предварительного разгона на участке разгона, определяем, что в данном случае ОУ аппроксимируется последовательным соединением звена запаздывания с передаточной функцией $W''(p) = e^{-\tau p}$ и апериодического звена первого порядка - $W'(p) = \frac{k_0}{1 + T_0 p}$.

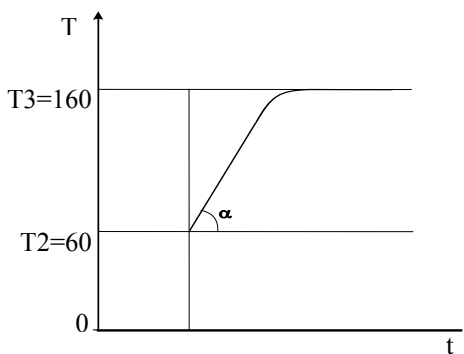


Рис. 10. Циклограмма режима нагрева:

T2 – температура предварительного разогрева,

T3 – температура полимеризации.

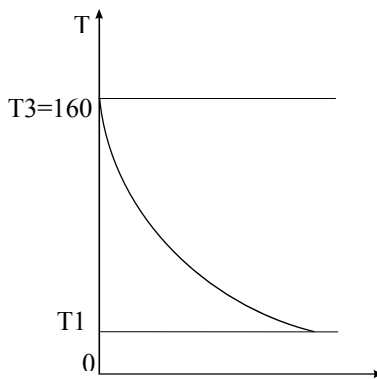


Рис. 11. Типовая циклограмма режима охлаждения:

T1 – температура окружающей среды,

T3 – температура полимеризации.

Результаты эксперимента для определения параметров этих звеньев представлены в приложении в табл.1. Рассмотрим режим нагрева. Температура полимеризации T2=160-170°C по техпроцессу. Время экспозиции 6 часов. Темп нагрева –1,5-2 градуса в минуту. Участок циклограммы, со-

ответствующий данному режиму, может быть представлен интегрирующим звеном, где выходная величина равна интегралу по времени от входной

величины $y(t) = k \int_0^t x(\tau) d\tau + y_0$, а передаточная функция звена имеет

вид $W(p) = k/p$.

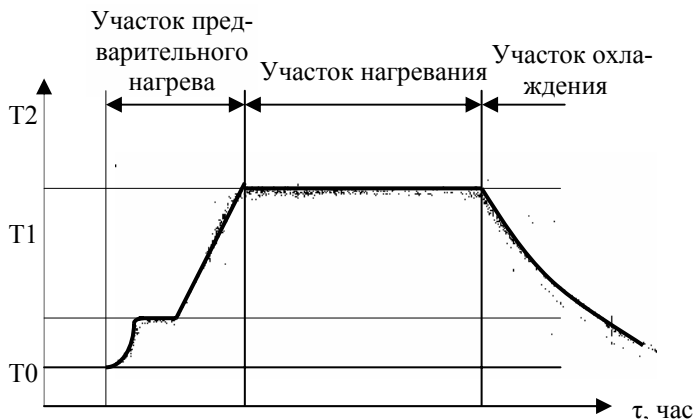


Рис. 12. Типовая циклограмма процесса полимеризации:

T_0 – температура окружающей среды,

T_1 – температура предварительного разогрева,

T_2 – температура полимеризации.

Параметр k определяется по результатам анализа соответствующих циклограмм, которые приведены в приложении в табл.2.

Рассмотрим режим охлаждения. В соответствии с техпроцессом охлаждение осуществляется естественным способом без подвода дополнительного потока воздуха. Темп охлаждения не должен превышать 2 градуса в минуту. На этом участке ОУ представлен инерционным звеном.

Дифференциальному уравнению имеет вид:

$$T \frac{dy}{dx} + y = k_1 x, \text{ передаточная функция : } W(p) = k_1 / (Tp + 1).$$

Для определения k и T использовались результаты обработки циклограммы охлаждения, представленные в приложении В в табл.3. Данные рис.12 позволяют сравнивать теоретическую и экспериментальную зависимости температуры (обозначены точками). Расчеты осуществлялись на основе аналитических зависимостей и конечно-разностными методами. Из рисунка видно, что различие между теоретической кривой и экспериментальными точками невелико; оно не превышает 5%. Такое сопоставление

свидетельствует о достоверности выбранной математической модели процесса тепломассообмена в установках АВТП

5. Влияние технологического процесса изготовления на эксплуатационные характеристики изделий

Испытание **на растяжение** является наиболее универсальным по сравнению с другими видами испытаний, так как оно позволяет определять механические свойства материала на всех стадиях его деформации (от упругой деформации до разрушения). При растяжении образцов определяют следующие механические характеристики материала:

-предел пропорциональности; предел упругости; модуль упругости; предел текучести; временное сопротивление; относительное равномерное удлинение; относительное удлинение после разрыва; относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

Для испытания на растяжение использовалась универсальная машина модели Р-2 фирмы «Риле» (США). Эта машина мощностью 294 кН предназначена для растяжения, сжатия, изгиба.

На рис. 13 приведена зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения, соответствующая скорости нагрева $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Из представленной зависимости, используя вышеописанную методику, были определены такие параметры композиционного материала как предел пропорциональности, равный 640 МПа, предел текучести – 750 Мпа, предел прочности – 760 МПа.

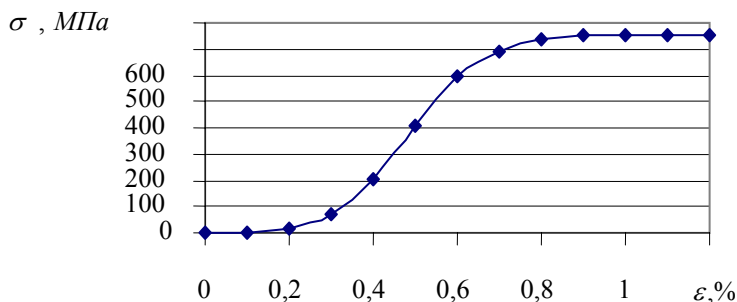


Рис. 13. Зависимость предела прочности композиционного материала от относительной длины растяжения

Аналогичные исследования были проведены при различных комбинациях скорости нагрева и охлаждения композиционного материала. В частности, скорости нагрева и охлаждения изменялись от 1 до $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. На

рис. 14 приведена зависимость предела прочности материала от этих параметров.

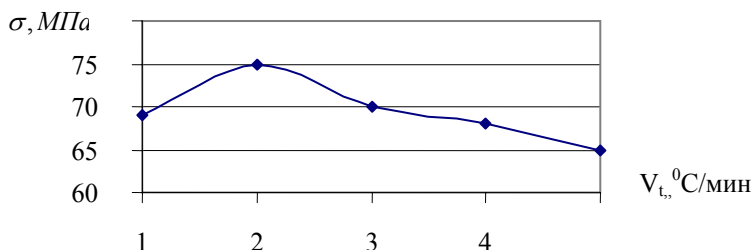


Рис. 14. Зависимость предела прочности материала от скорости нагрева и охлаждения композиционного материала

Как видно из данных рисунка, предел прочности материала наибольшая при скоростях нагрева и охлаждения, равных $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Проводилась статистическая обработка результатов механических испытаний на растяжение лонжерона лопастей вертолётов и расчет показателей надежности. По результатам статистической обработки механических испытаний на растяжение по длине и по статистическим данным эксплуатации изделий, интенсивность отказов составляет $\lambda = 25 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$.

Вероятность безотказной работы (надежность) за период времени (0.3000) часов, равна:

$$P(3000) = 1 - F(3000) = e^{-25 \cdot 10^{-6} \cdot 3000} \approx 0.923, \text{ т.е. составляет } 92.3\%.$$

Кроме того, вероятность безотказной работы максимальна при условии, что скорости нагрева и охлаждения равны $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Это следует из рис. 15.

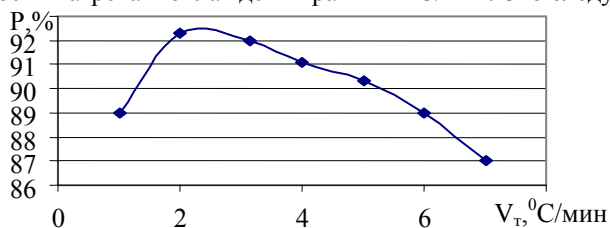


Рис. 15. Зависимость вероятности безотказной работы от скорости нагрева и охлаждения композиционного материала

Методика испытания *межслоевого сдвига* распространяются на слоистые композиционные материалы на полимерной матрице, типа угле -, боро -, стеклопластиков.

Результаты экспериментальных исследований представлены в прило-

жении В (табл. 2.). По этим представленным данным исследовались зависимости пределов прочности и текучести материалов от режима нагрева и охлаждения, которые приведены на рис. 16 и 17.

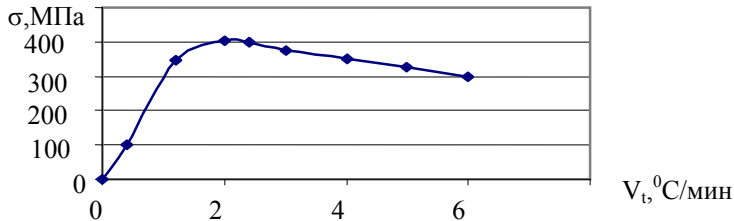


Рис. 16. Зависимость предела прочности композиционного материала от скорости нагрева и охлаждения

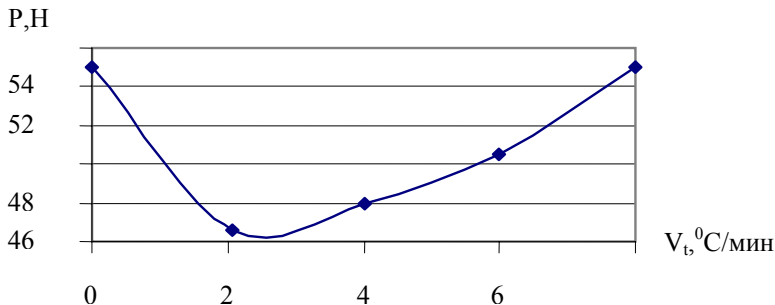


Рис. 17. Зависимость предела текучести композиционного материала от скорости нагрева и охлаждения

Как видно из этих рисунков, благоприятными режимами технологического процесса изготовления композиционного материала являются скорости нагрева и охлаждения, равные 2 °C/мин.

Исследования композиционных материалов на **ударную вязкость**.

Статистические испытания не всегда воспроизводят реальные условия нагружения деталей. Важное значение имеет определение механических характеристик в условиях, близких к реальным, когда под действием определенных факторов материалы переходят в хрупкое состояние. Малое сопротивление материалов быстродействующим динамическим (ударным) нагрузкам опасно для работы оборудования и механизмов. В связи с этим во многих технических условиях на изготовление различных изделий предусмотрены динамические испытания материалов – испытания на ударный изгиб (определение ударной вязкости). Для проведения ударных испытаний применяют специальные машины – копры КМ-30.

На рис. 18 иллюстрируется зависимость ударной вязкости от объемной концентрации содержания наполнителей в композиционном материале.

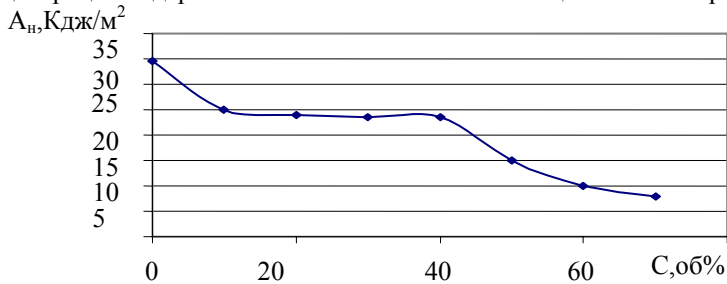


Рис. 18. Результаты испытаний на ударную вязкость

По результатам статистической обработки механических испытаний на ударную вязкость по длине и по статистическим данным эксплуатации изделий, рассчитана интенсивность отказов, она составляет $\lambda = 40 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$.

Вероятность безотказной работы (надежность) за период времени (0.3000) часов, определяется равенством:

$$P(3000) = 1 - F(3000) = e^{-40 \cdot 10^{-6} \cdot 3000} \approx 0.887, \text{ т.е. составляет } 88.7\%.$$

Приведенные зависимости параметров надежности от видов испытаний композиционных материалов показывают, что вероятность безотказной работы изделий существенно меньше 100%. Отсюда возникает необходимость совершенствования технологии изготовления композиционных материалов в установках АВТП методом полимеризации.

Основные результаты и выводы по работе

1. Разработаны и исследованы методом теории подобия математические модели процесса теплообмена в многослойных конструкциях из композиционного материала с изменяющимся агрегатным состоянием.

2. Для исследования процесса теплообмена в многослойных конструкциях из композиционного материала впервые использован метод изотермических поверхностей.

3. Применение метода изотермических поверхностей к решению задач теплообмена в многослойных областях из композиционных материалов позволило получить аналитические решения задачи в форме, удобной для реализации в инженерных расчетах.

4. Проведены расчеты и экспериментальные исследования процесса теплообмена в многослойных конструкциях из композиционного материала в установках АВТП.

5. Сравнение результатов численных расчетов по аналитическим формулам с результатами экспериментального исследования в многослойных конструкциях из композиционного материала в установках АВТП показало их удовлетворительное соответствие.

6. Разработаны методы и программы расчета теплообмена в многослойных конструкциях из композиционного материала в установках АВТП. Составлены таблицы и графики температур в узлах слоев изделия в зависимости от времени.

7. С помощью разработанных в работе методов проведено исследование установок (теплообменников) АВТП, позволившее уточнить его теплопередающие параметры.

8. Исследовано влияние погрешностей изготовления композиционных материалов на их эксплуатационные характеристики.

9. Проведен анализ надежности из композиционных материалов на уровне ИПД, контроль надежности изделий по показателю “интенсивность отказов” и по показателю “средняя наработка на отказ”.

10. Исследована и показана необходимость оптимизации теплофизических процессов при изготовлении многослойных изделий из композиционных материалов методом полимеризации.

11. Разработан новый многопозиционный регулятор температуры, который позволяет управлять процессом полимеризации по программе, а также подключить персональный компьютер.

12. Разработана методика для выявления в ходе технологического процесса изготовления источников процесса деградации, которые влияют на надёжность и долговечность изделий в процессе их эксплуатации.

13. Исследованы и выявлены влияние температуры, времени и скорости прогрева и давления на качество изготавливаемых материалов.

14. Проведено моделирование процесса полимеризации лонжерона лопасти вертолета с использованием экспериментальных данных.

15. Разработана функциональная схема и алгоритм управления процессом полимеризации.

16. Проведено исследование на прогнозирование изделий из композиционных материалов на надёжность и долговечность с точки зрения физики отказов.

17. Рассчитана экономическая эффективность от внедрения результатов диссертационной работы.

18. Автором диссертационной работы предложена система автоматизированного управления процессом передачи тепла при изготовлении композиционных материалов, обеспечивающая правильный подвод и поддержание температуры на всех участках поверхности изделия.

19. Разработанные и развитые в работе аналитические и численные методы исследования процессов теплообмена в многослойных конструкциях

из композиционного материала в установках АВТП представляет интерес для инженерной практики расчета и проектирования теплообменных установок различного назначения.

Публикации по теме диссертации

1. *Акимов И.А., Козлов В.Н.* Аналитическое решение задач тепломассообмена в многослойных конструкциях для моделирования процесса изготовления композиционных материалов с фазовыми переходами. // Известия международной академии наук высшей школы. - 2006.- №3(37).- С.214-227.

2. *Акимов И.А., Козлов В.Н.* Аналитическое решение задач тепломассообмена в многослойных конструкциях на первом этапе изготовления композиционных материалов без учета фазовых переходов. // Известия международной академии наук высшей школы. - 2006.- №3(37).- С.212-215.

3. *Акимов И.А., Козлов В.Н.* Моделирование тепломассообмена в многослойных конструкциях при изготовлении композиционных материалов с фазовыми переходами. // Известия вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. - 2006.- Приложение №11.

4. *Акимов И.А., Козлов В.Н.* Математические модели тепломассообмена в многослойных конструкциях на этапе изготовления композиционных материалов без учета фазовых переходов. // Известия вузов. Сев. - Кавк. регион. Техн. науки. - 2007.- №2.

5. *Акимов И.А., Фатыхов М.А., Еникеев Т. И.* Экспериментальное исследование теплопереноса в установках автоматического ведения технологического процесса полимеризации композиционных материалов. // Вестник ОГУ. Естественные и техн. науки. - 2006. - №5. - С.259-263.

6. *Фатыхов М.А., Акимов И.А., Еникеев Т. И.* Механические свойства композиционных материалов в зависимости от температурного режима их изготовления. // Вестник ОГУ. Естественные и техн. науки. - 2006. - №2. - Т.2. - С.87-92.

7. *Акимов И.А.* Математическое моделирование задач тепломассообмена в многослойных конструкциях на первом этапе изготовления композиционных материалов. // Кибернетика и информатика. Сборн. науч. трудов к 50 летию Секции кибернетики Дома ученых им. М. Горького РАН. - Санкт-Петербург: изд-во политехн. ун-та. - 2006. - С.254-258.

8. *Акимов И.А., Козлов В.Н.* Математическое моделирование тепломассообмена в многослойных конструкциях при изготовлении композиционных материалов с фазовыми переходами. // Кибернетика и информатика. Сборн. науч. трудов к 50 летию Секции кибернетики Дома ученых им. М. Горького РАН. - Санкт-Петербург: изд-во политехн. ун-та. - 2006. - С.259-272.

9. *Рахимов Ф. С., Акимов И.А.* Уточнение уравнения граничных многообразий в общей задаче трех тел. // Вестник УГАТУ. - 2006. - Том 8. - №2(18). С.158-160.

10. *Тюков Н.И., Акимов И.А., Акимов А.И.* Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов изготовления изделий из композиционных материалов. (Монография –рекомендована к изданию Уфимским научным центром РАН) //Монография.- Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2003-с.216.

11. *Тюков Н.И., Акимов И.А., Акимов А.И.* Методология проектирования и автоматизации теплофизических процессов(монография)// Монография. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2001.- С.144.

12. *Акимов И.А., Акимов А.И., Фатыхов М.А.* Экспериментальное исследование теплообмена в установке автоматического ведения технологического процесса полимеризации композиционных материалов. // Статья. – Кишинёв:жур.АН Молдавии “Электронная обработка материалов”,№5 2003. -с. (47-51).

13. *Акимов И.А., Акимов А.И., Фатыхов М.А.* Анализ процесса полимеризации многослойных конструкций из композиционных материалов в электрическом поле методом теории подобия.// Статья. – Кишинёв: жур. АН Молдавии “Электронная обработка материалов”,№4 2003, - с. (47-51).

14. *Акимов И.А.* Решение одной многослойной задачи переноса тепла с подвижными границами.// 4-я Уральская региональная науч.-тех. конф. - Уфа: Изд-во Уфимского авиационного ин-та, 1989. -С.198.

15. *Акимов И.А., Зайнуллин Р.Г.* Решение одной сопряженной задачи теплообмена методом интегральных преобразований.// Уфимск. авиационный ин-т. - Уфа. 1991. - 5 с. - Деп. в ВИНТИ, -№1308 -В91, -1991.

16. *Акимов И.А., Зайнуллин Р.Г., Шафеев М.Н.* Решение одной двухслойной задачи теплообмена со свободными границами.// Уфимск. авиационный ин-т. - Уфа, 1991. - 7с. - Деп. в ВИНТИ. -№1309-В91,-1991.

17. *Шафеев М.Н., Акимов И.А.* Применение теории подобия к исследованию нестационарных процессов замораживания дисперсных материалов.// Уфимск. авиационный ин-т. – Уфа, 1991. - 14 с. -Деп. в ВИНТИ, - №485 - В91. - 1991.

18. *Акимов И.А., Зайнуллин Р.Г., Шафеев М.Н.* Решение одной задачи переноса тепла при наличии движущихся границ.// Уфимск. авиационный ин-т. - Уфа, 1991. - 4 с. - Деп. в ВИНТИ, №1307 -В91. - 1991.

19. *Тюков Н.И., Грачева Л.Н., Акимов И.А., Акимов А.И.* Разработка функциональной схемы и алгоритма управления процессом полимеризации.// Проблемы прикладной теплофизики: Межвуз. сб. научн. трудов. - Стерлитамак: Изд-во Стерлитамакского пед. ин-та, 1999. -С 50-55.

20. Тюков Н.И., Грачева Л.Н., Акимов И.А., Акимов А.И. Получение математической модели процесса полимеризации лонжерона лопасти по экспериментальным данным. // Проблемы прикладной теплофизики: Межвуз. сб. научн. трудов. - Стерлитамак: Изд-во Стерлитамакского пед. ин-та, 1999. - С. 55-58.

21. Акимов И.А., Тюков Н.И., Акимов А.И. Решение одной многослойной задачи теплообмена с изменяющимся агрегатным состоянием. // Проблемы прикладной теплофизики: Межвуз. сб. научн. трудов. – Стерлитамак: Изд-во Стерлитамакского пед. ин-та, 1999. -С. 58-68.

22. Ширяев Е.В., Акимов И.А., Акимов А.И. Особенности системы автоматического регулирования паровых трубчатых сушилок углебрикетной фабрики. // Проблемы прикладной теплофизики: Межвуз. сб. научн. трудов. – Стерлитамак: Изд-во Стерлитамакского пед. ин-та, 1999 -С. 88-93.

23. Акимов И.А., Сулейманов Н.Т., Надыров Р.Г. Исследование надежности волоконно-оптической цифровой обработки информации методом Монте-Карло //Материалы III-ей Всесоюзной научной конференции “Надежность дискретных устройств”.- Ташкент: Изд. АН УзССР по комплексной проблеме “Кибернетика”, 1977. - С. 10-14.

24. Акимов И.А., Тюков Н.И. Математическая модель процесса полимеризации изделий из стеклопластика для ведения автоматического управления//Межвузовский научный сборник “Вопросы проектирования информационных и кибернетических систем”.- Уфа: Изд. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 1992.- С. 71-76.

25. Акимов И.А., Тюков Н.И., Грачева Л.Н., Акимов А.И. Построение математической модели процесса полимеризации лонжерона лопасти, с использованием экспериментальных данных.// Межвузовский сборник научных трудов “Проблемы прикладной теплофизики”. – Стерлитамак: Изд. Стерл. гос. пед. инс-та, 2000. – С.4-14.

26. Акимов И.А., Тюков Н.И., Грачева Л.Н., Акимов А.И. Разработка функциональной схемы и алгоритма управления процессом полимеризации //Межвузовский сборник научных трудов “Проблемы прикладной теплофизики”. – Стерлитамак: Изд. Стерл. гос. пед. инс-та, 2000. – С.15-23.

27. Акимов И.А., Акимов А.И., Тюков Н.И. Математическая модель процесса изготовления изделий из композиционных материалов в результате полимеризации // Труды Стерлитамакского филиала Академии наук РБ. Серия “Физико-математические и технические науки”. Выпуск 2. – Уфа: Изд. “Гилем”, 2001.-С.6-9.

28. Акимов И.А., Акимов А.И., Инчин А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования технологического процесса изготовления изделий из композиционных материалов.// Препринт.-Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2003.-38с.

29. *Акимов И.А., Акимов А.И., Грачёва Л.Н.* Математико-статистический контроль качества изделий из композиционных материалов, получаемых методом полимеризации. // V Российская научно-техническая конференция “Прогрессивных технологий в транспортных системах” Изд. Оренбургского государственного университета, 2001.- С.9.

30. *Акимов И.А., Тюков Н.И., Грачева Л.Н., Акимов А.И.* Программное обеспечение АСУТП полимеризации лонжерона лопасти. // V Российская научно-техническая конференция “Прогрессивных технологий в транспортных системах” Изд. Оренбургского государственного университета, 2001.- С.3.

31. *Акимов И.А., Новиков Н.И.* Опыт применения математического моделирования в подготовке производства. // V Российская научно-техническая конференция “Прогрессивные технологии в транспортных системах” Изд. Оренбургского государственного университета, 2001.- С.3.

32. *Акимов И.А., Новиков Н.И.* Совершенствование процессов принятия решений при сопровождении технологических процессов изготовления деталей. // V Российская научно-техническая конференция “Прогрессивных технологий в транспортных системах” Изд. Оренбургского государственного университета, 2001.- С.3.

33. *Акимов И.А., Акимов А.И., Шаров В.Н.* Некоторые методы численного решения задач тепломассообмена в многослойных конструкциях, изготавливаемых методом полимеризации// Статья. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.- С.35.

34. *Акимов И.А., Акимов А.И., Шаров В.Н.* Влияние технологического процесса изготовления изделий из композиционных материалов на их эксплуатационные характеристики// Статья. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.- С.26.

35. *Акимов И.А., Акимов А.И.* Экспериментальное исследование тепломассообмена в установке автоматического ведения технологического процесса и сопоставление теории эксперимента// Статья. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.- С.44.

36. *Акимов И.А., Акимов А.И.* Разработка и исследование математической модели тепломассообмена в многослойных конструкциях, изготавливаемых методом полимеризации// Статья. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.- С.36.

37. *Акимов И.А.* Обобщенная математическая модель тепломассообмена в многослойных конструкциях, изготавливаемых методом полимеризации.// Статья. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.- С.24.

38. *Акимов И.А.* Поэтапное решение задач тепломассообмена в многослойных конструкциях, изготавливаемых методом полимеризации// Статья. – Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.- с.28.

39. *Фатыхов М.А., Акимов И.А., Акимов А.И.* Особенности и некоторые пути совершенствования систем автоматического регулирования паровых трубчатых сушилок углебрикетной фабрики. // Сборник научных статей физико-математического факультета БГПУ.-Уфа: изд. БГПУ, 2003.-с. (104-110).

40. *Акимов И.А., Акимов А.И.* Математическое описание теплофизических процессов полимеризации. // Санкт-Петербург. Изд.-во СПбГПУ. Формирование технологической политики инновационных наукоёмких технологий. Материалы научно-технической конференции и школы семинара.-2003.-с.(299-306).

41. *Акимов И.А.* Математическая постановка теплофизических задач при изготовлении композиционных материалов методом полимеризации. // Препринт .-Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.-с.19.

42. *Акимов И.А., Акимов А.И.* Применение метода изотермических поверхностей для решения задач тепломассообмена в многослойных конструкциях, изготавливаемых методом полимеризации. // Препринт .-Уфа: Редакционно-издательский центр Башгосуниверситета, 2002.-с.17.

43. *Рахимов Ф.С., Акимов И.А., Акимов А.И.* Граничные многообразия в задаче трех тел.// Монография.- Уфа: Гилем, 2004.-с. 131.

44. *Фатыхов М.А., Акимов И.А., Акимов А.И.* Особенности и некоторые пути совершенствования системы автоматического регулирования паровых трубчатых сушилок углебрикетной фабрики.// Статья, -Уфа: Сборник научных статей физико-математического факультета БГПУ, 2003.- с. 104-110.

45. *Акимов И.А.* Система измерения температур в многослойных конструкциях из композиционного материала методом сканирования. // Статья. – Салават. – 1997. – с.44-46.

46. *Акимов А.И., Шаров В.Н., Акимов И.А.* Технологические признаки испытания изделий из композиционных материалов, получаемых методом полимеризации. // Препринт. – Уфа: РИО Баш. ГУ. – 2002. – 24с.

47. *Акимов А.И., Шаров В.Н., Акимов И.А.* Методы контроля надежности изделий по параметрам технологического процесса их изготовления. // Препринт. – Уфа: РИО Баш. ГУ. – 2002. – 18с.