

На правах рукописи

陈阳阳

Чэнь Янъян

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ  
ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель Малышева Галина Владленовна  
д.т.н., доцент, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции»

Официальные оппоненты: Комаров Валерий Андреевич,  
д.т.н., профессор,  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор кафедры «Конструкция и проектирование летательных аппаратов»

Бобин Константин Николаевич,  
к.т.н., доцент,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры самолето- и вертолетостроения

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань

Защита состоится 18 ноября 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», <https://mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ »

2021 г.

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



Денискина Антонина Робертовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные полимерные композиционные материалы применяются при производстве большого ассортимента деталей летательных аппаратов (ЛА). Качества и надежность этих деталей зависят от совершенства технологических процессов производства. При производстве деталей летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов технологическая операция отверждения полимерного связующего, является ответственным этапом, оказывающим существенное влияние на функциональные характеристики. Технологические погрешности в выборе тепловых режимов отверждения приводят к образованию дефектов, и, как следствие, к снижению прочности деталей.

Процесс отверждения полимерного связующего в силу большой энергоемкости и продолжительности относится к наиболее дорогостоящим технологическим операциям, особенно если производятся крупногабаритные детали ЛА. Таким образом, работа, ориентированная на оптимизацию технологических режимов отверждения при производстве деталей из полимерных композиционных материалов с улучшенным комплексом характеристик и низкой себестоимостью является актуальной и сложной научно-технической задачей.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Существенный вклад в идентификацию процессов теплообмена изделий из ПКМ внесли работы Бабаевского П.Г., Баринова Д.Я., Дмитриева О.С., Кепмана А.В., Просунцова П.В., Резника С.В., Сафронова Е.В., Малкова Г.В., Страхова В.Л., Тарасова И.В., и др. Cho K., Ding J., Flores J.D., Lakho D.A., Li Dongna, Lu L., Ishaq M., Yao D. и др. Однако, в своих работах они не учитывали влияние скорости процессов нагрева на общее количество выделяемого в процессе отверждения тепла и роль фазовых переходов. Вопросам создания современных методов оценки качества конструкции ЛА посвящены работы Бойцова Б.В., Малкина А.Я. и др. Исследование влияния масштабного фактора на кинетику теплообменных процессов рассмотрено в работах Дмитриева О.С., Хаскова М.А. и др. и установлено влияние толщины конструкции и теплофизических свойств армирующих материалов. Все это позволило разработать методику оптимизации технологии отверждения.

Однако в научной литературе отсутствует информация об экспериментальных методах оценки теплофизических свойств полимерных связующих в процессе их отверждения, нет методик теоретической оценки значений тепловых полей с учетом фазового состояния связующего и геометрических особенностей конструкции.

### **Цели и задачи исследования.**

**Цель** – совершенствование процесса производства деталей летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов за счет оптимизации технологических режимов отверждения полимерного связующего.

#### **Задачи:**

1. Исследование теплофизических характеристик связующих в зависимости от изменения их фазового состояния в процессе производства конструкций ЛА.

2. Установление связи между теплофизическими свойствами армирующих материалов и технологическими характеристиками режимов отверждения при производстве конструкций ЛА.

3. Исследование влияния температурно-временных режимов производства конструкций ЛА на кинетику процессов отверждения деталей из композиционных материалов.

4. Разработка методики оптимизации технологических решений при производстве конструкций ЛА для режимов отверждения деталей из композиционных материалов.

### **Научная новизна исследования.**

Впервые исследованы теплофизические характеристики полимерных связующих в процессе изменения их фазового состояния при разной степени конверсии.

Установлены причинно-следственные связи между теплофизическими характеристиками связующих, армирующих материалов и кинетикой процесса отверждения при производстве деталей летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Предложена и апробирована на опытных образцах новая методика отверждения полимерного связующего при производстве деталей летательных аппаратов из композиционных материалов, учитывающая масштабные факторы, кинетику нагрева и температурно-временные режимы гелеобразования при различных химических составах связующих.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

#### **Теоретическая значимость.**

Установлены закономерности изменения значений температурно-временных режимов гелеобразования в зависимости от химического состава связующих, кинетики их нагрева при производстве деталей ЛА.

Создана методика определения оптимальных технологических режимов с учетом требований по кинетике процесса отверждения на базе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований в области производства конструкций ЛА из композиционных материалов.

### **Практическая значимость.**

Разработана методика и определены теплофизические характеристики эпоксидных связующих при изменении их агрегатного состояния.

Разработана методика многокритериальной оптимизации режимов отверждения полимерного связующего при производстве деталей летательных аппаратов из композиционных материалов.

Теоретически и экспериментально обоснованы рекомендации по оптимизации режимов отверждения полимерного связующего в заготовках деталей летательных аппаратов из композиционных материалов (баллоны высокого давления, элементы силового набора крыла).

### **Методология и методы исследования.**

Предлагаемые методы и подходы базируются на результатах моделирования кинетики процесса отверждения конструкции из ПКМ. Для математического моделирования использовались программы Femap & NX Nastran и ESI PAM-RTM. Методологические основы исследований составляет аппарат теории оптимизации и математической статистики. Теплофизические свойства оценивались методом дифференциального сканирующего калориметра DSC 204 F1 Phoenix, методом лазерной вспышки на приборе LFA 457 MicroFlash®, методом динамомеханического анализа на приборе DMA 242 E Artemis и на приборе ИТ-С-400(ГОСТ 23630.1-79) и ИТ-λ-400(ГОСТ 23630.2-79). Для отверждения образцов использовалась лабораторная электрическая печь France Etuves серия XU112.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методики оценки температуры и времени гелеобразования.
2. Методики оценки теплофизических характеристик связующих в процессе их отверждения.
3. Результаты исследований теплофизических свойств композиционных материалов в зависимости от кинетики процессов нагрева.
4. Методика оптимизации технологического режима отверждения при производстве ПКМ.
5. Технологии производства деталей ЛА из композиционных материалов на этапе отверждения.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

**Достоверность научных положений и выводов** подтверждается использованием математических моделей, основанных на фундаментальных законах теплофизики, высоким уровнем метрологического обеспечения экспериментальных исследований, а также хорошим согласием теоретических и экспериментальных данных.

### **Апробация результатов.**

Основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: XXII Международной научной конференции «Перспектива-2018», г. Нальчик, 27-30 апреля 2018 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги», г. Москва, 24 мая 2018 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», г. Казань, 8-10 августа 2018 г.; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении», г. Севастополь, 10-14 сентября 2018 г. и 09-13 сентября 2019 г.; 3-й международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций», г. Москва, 23-25 октября 2018 г.; Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», г. Могилев, Беларусь, 25-26 октября 2018 г.; XIII и XIV Всероссийской инновационной молодежной научно-инженерной выставке «Политехника», г. Москва, 21-24 ноября 2018 г. и 19-22 ноября 2019 г.; XLIII и XLIV Академических чтений по космонавтике, г. Москва, 29 января-01 февраля 2019 г. и 28-31 января 2020 г.; Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Россия, г. Сочи, 25-29 марта 2019 г.; VII научной молодежной школы-конференции «Химия, физика биология: пути интеграции», г. Москва, 17-19 апреля 2019 г.; 1-м и 2-м международном форуме по композитам «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии», г. Москва, 05-08 декабря 2018 г. и 20-21 ноября 2019 г.; III Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии», г. Дзержинск, 11-13 сентября 2019 г.; VI Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», г. Москва, 26-27 ноября 2019 г.; Международной конференции «Advanced Materials & Demanding Applications» (онлайн), Рексем, Великобритания, 22-26 июня 2020 г.; Международном научно-техническом семинаре, посвященном 90-летию МАДИ, г. Москва, 21-22 октября, 2020 г..

### **Публикации**

Материалы диссертации отражены в 16 научных статьях, в том числе 3 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 8 – в изданиях, индексируемых SCOPUS.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация объемом 134 страницы состоит из введения, 4-х глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 149 наименований, включает 71 рисунок и 26 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, степень разработанности темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе,** на базе проведенного анализа научной информации, обосновывается важное научно-практическое значение решаемой задачи.

Рассматриваются свойства используемых ПКМ на основе эпоксидных связующих и технологии производства из них деталей ЛА из стекло- и углепластиков в России и КНР. Рассмотрены основные методы определения кинетических параметров процесса отверждения, методы моделирования и методы оптимизации процесса отверждения композитных конструкций.

Выявлены основные проблемы, возникающие в процессе моделирования и оптимизации кинетики процесса отверждения композитных конструкций из ПКМ.

**Вторая глава** посвящена оценке теплофизических характеристик эпоксидных связующих в процессе изменения их фазового состояния.

Значения температур и времени гелеобразования определяли с помощью динамомеханического анализатора марки DMA 242 E Artemis. В качестве объекта исследований использовали 2 типа связующих: эпокси-диановая смола ЭД-20 с отвердителем триэтилентетрамин (ТЭТА) и ЭД-20 с отвердителем изометилтетрагидрофталевый ангидрид (ИМТГФА). Полученные результаты исследований показаны на рисунках 1 и 2.

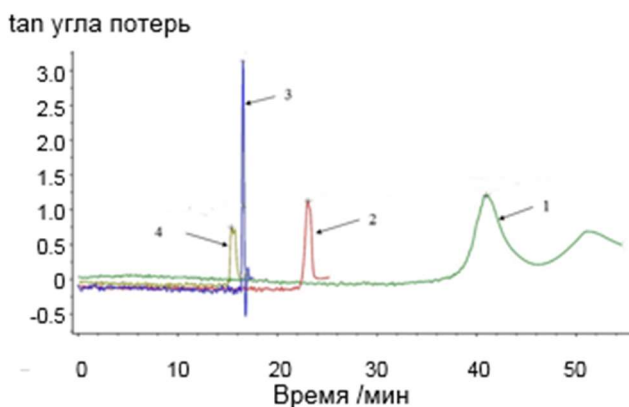


Рисунок 1 – Зависимости тангенса угла механических потерь от времени при разной скорости нагрева: 1°C/мин(1), 3°C/мин(2), 5°C/мин(3), 7°C/мин(4)

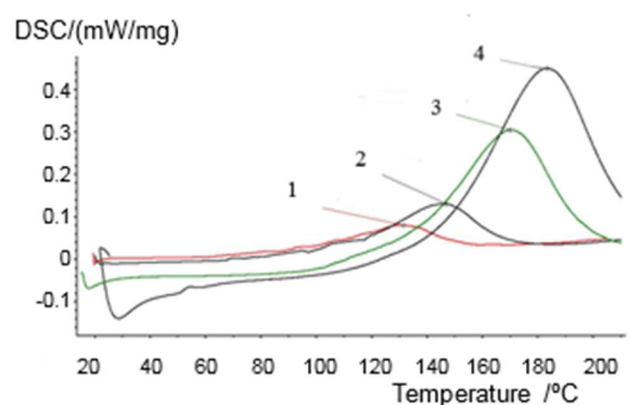


Рисунок 2 – Результаты ДСК при разной скорости нагрева: 1°C/мин(1), 2°C/мин(2), 3°C/мин(3), 5°C/мин(4)

Полученные результаты при анализе двух типов связующих показали, что они имеют общие закономерности и при повышении скорости нагрева, температура гелеобразования эпоксидного полимера увеличивается, а время начала

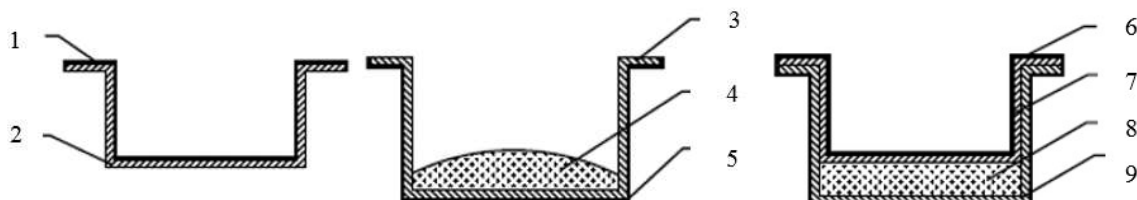
гелеобразования, наоборот, уменьшается.

Для исследования экзотермических эффектов связующих в процессе отверждения необходимо определить их кинетические характеристики, что было выполнено на основании результатов ДСК (рисунок 2), что позволило определить количество выделяемой теплоты в зависимости от кинетики процесса нагрева.

Для оценки теплоемкости также использовался метод ДСК. В качестве связующего использовался состав на основе смолы ЭД-20 и отвердителя ИМТГФА. Измерения проводили через каждые 30 мин после смешения исходных компонентов (таблица 1).

Таблица 1 – Теплоемкость и теплопроводность эпоксидного связующего

Степень отверждения, %	Теплоемкость, Дж/(кг·К)		Теплопроводность, Вт/(м·К)	
	Методом ДСК	ГОСТ 23630.1-79	Методом лазерной вспышки	ГОСТ 23630.2-79
0	1970	—	0,08	—
5	1970	—	0,08	—
15	1920	—	0,14	—
28	1820	—	0,2	—
75	1400	1291	0,22	0,22
87	1340	1230	0,25	0,22
100	1300	1226	0,27	0,22



1, 6 – графитовая смазка на поверхности крышки; 2, 7 – крышка; 3, 9 – тигель; 4, 8 – связующие; 5 – графитовая смазка на поверхности тигля

Рисунок 3 – Специальная оправка для определения теплопроводности

Для оценки теплопроводности использовался метод лазерной вспышки. Исследования проводили на установке лазерной вспышки марки LFA 457 MicroFlash - NETZSCH. Особенностью проведения данных испытаний являлось использование образца в жидком состоянии, что не позволяло выдержать требуемые размеры, т.к. используемый состав является оптически прозрачным материалом для излучения лазера и поэтому для определения характеристик теплопроводности эпоксидных связующих в зависимости от их агрегатного состояния, в работе была использована специальная оснастка (рисунок 3),



основными элементами которой являлись тигель и крышка, изготовленные из платинородиевого сплава ПР 10 с известными теплофизическими свойствами.

Анализ полученных результатов показывает (таблица 1), что в процессе отверждения, при изменении степени конверсии, происходит снижение теплоемкости. Для исследованного образца величина теплоемкости при изменении степени конверсии с 0 до 87% уменьшается на 32,2%. При изменении степени конверсии характеристики теплопроводности исследуемого состава эпоксидного связующего увеличиваются с 0,08 до 0,27 Вт/(м·К), т.е. более чем в 3 раза.

Для оценки точности полученных результатов, в работе использовался стандартный метод определения теплоемкости ГОСТ 23630.1-79 и метод определения теплопроводности ГОСТ 23630.2-79, с использованием прибора ИТ-С-400 и ИТ -λ-400. Анализ результатов, полученных при использовании двух методов показал, что они позволяют получить близкие значения теплоемкости и теплопроводности. Минимальное значение погрешности (менее 1%) получено при степени конверсии, равной 75%. Величина теплопроводности исследуемого состава эпоксидного материала составляет 0,22 Вт/(м·К). Полученные кинетические и теплофизические параметры были использованы в дальнейшей работе, при моделировании процесса отверждения конструкций из ПКМ.

**Третья глава** посвящена оптимизации технологии отверждения образцов полимерных и ПКМ на основе эпоксидных связующих.

Схемы типовых технологических процессов отверждения показаны на рис. 4. При изготовлении образцов в работе использованы одноступенчатые режим (рисунок 4, *а*), при изготовлении деталей ЛА – двухступенчатые (рисунок 4, *б*).

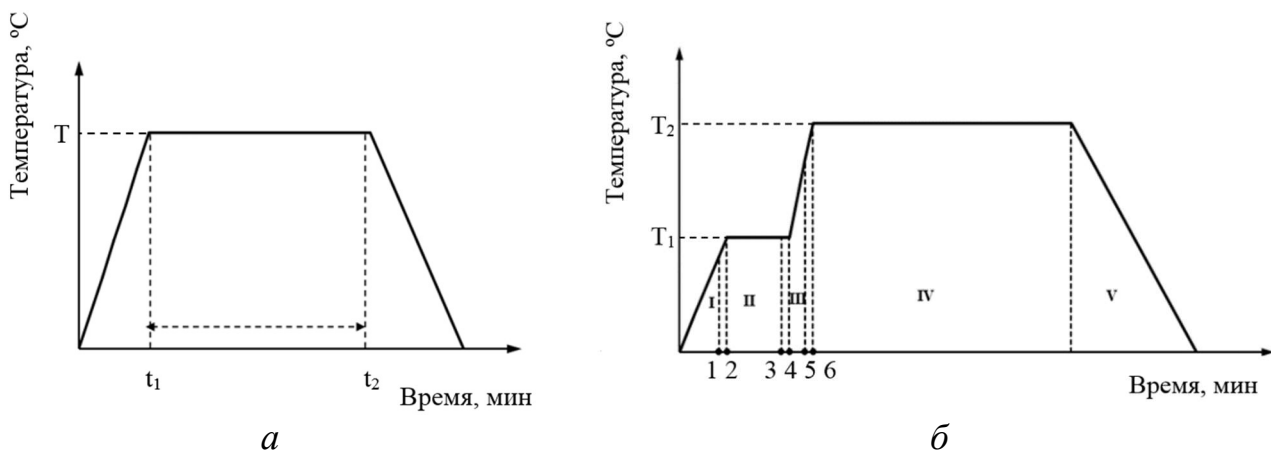
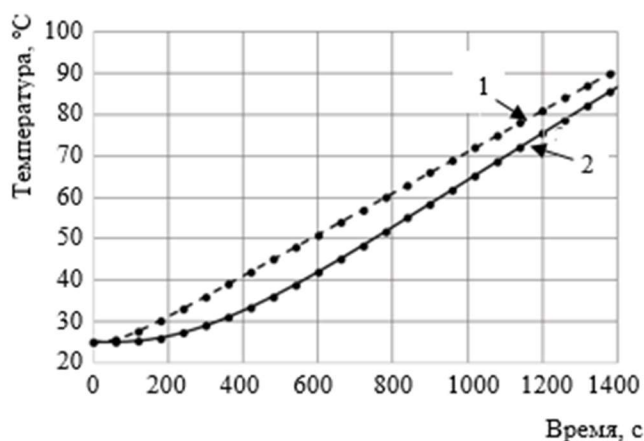


Рисунок 4 – Типовые режимы отверждения эпоксидных связующих  
*а* – одноступенчатый, *б* – двухступенчатый

Разработан алгоритм определения двухступенчатых режимов отверждения и принято допущение, что гелеобразование начинается в точке 2 (рисунок 4, *б*), заканчивается в точке 3. Независимо от свойств используемых материалов,

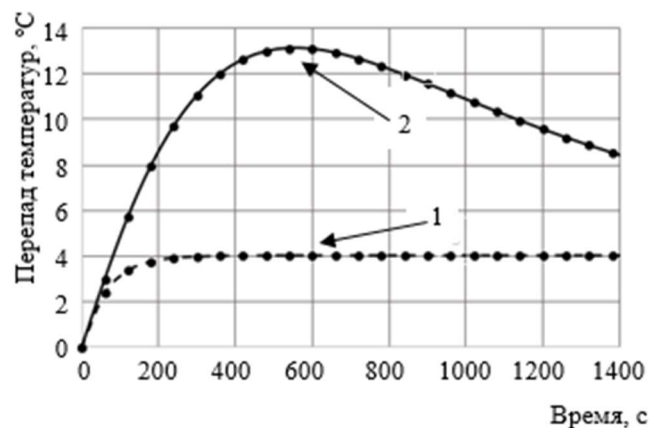
выдержка на II участке начинается после начала процесса гелеобразования и должна продолжаться до его полного завершения. В качестве критерия завершенности этих процессов предлагается использовать характеристики теплоемкости или теплопроводности. На рисунке 4, б точками 1-6 обозначены значения времени и температуры в которых необходимо проводить измерения теплофизических характеристик. Если выполняются условия, при которых значения теплопроводности  $\lambda_3 \approx \lambda_4$  и  $\lambda_5 \approx \lambda_6$  в точках, только в этом случае начинается выдержка на участках III и IV.

В работе исследовано влияние изменения агрегатного состояния связующих на точность определения температурного поля в процессе отверждения. Анализ влияния различных агрегатных состояний связующих на значения температурных полей для первого участка режима отверждения (рисунок 4, б) показан на рисунках 5 и 6.



1 – без учета изменения агрегатного состояния эпоксидного материала, 2 – с учетом изменения агрегатного состояния эпоксидного материала

Рисунок 5 – Зависимость температур в центре исследуемой модели от времени нагрева при скорости нагрева 3°C/мин



1 – без учета изменения агрегатного состояния эпоксидного материала, 2 – с учетом изменения агрегатного состояния эпоксидного материала

Рисунок 6 – Зависимость градиента температуры от времени в образце при скорости нагрева 3°C/мин

В результате расчетов установлено, что результаты моделирования температурного поля без учета изменения агрегатного состояния выше, чем аналогичные значения, полученные с учетом агрегатного состояния. При малых скоростях нагрева 3 °C/мин, погрешность температурного поля без учета и с учетом агрегатного состояния составляет 20%. При больших скоростях нагрева 7 °C/мин погрешность увеличивается до 26%. При повышении скорости нагрева имеет место увеличение погрешности определения температурных полей без учета и с учетом разного агрегатного состояния.

В работе проведена оценка влияния экзотермических эффектов на процесс отверждения стеклопластика и углепластика. Было проведено моделирование температурных полей стеклопластика и углепластика с учетом и без учета тепловыделения в процессе их отверждения при разных скоростях нагрева. Проведенное исследование относится к композиционному материалу размером 25x10x25 мм (рисунок 7, *а*). Режим отверждения – одноступенчатый (рисунок 4, *а*): Начальная температура – 25 °С, подъем температур до 180 °С при заданной скорости нагрева, потом выдержка. В качестве армирующего материала использована стеклоткань и углеткань, Теплоемкость углеродной и стеклянной ткани составляет соответственно 600 и 1265 Дж/(кг·К), теплопроводность углеродной и стеклянной ткани составляет соответственно 2 и 0,1 Вт/(м·К).

В результате проведенных исследований установлено, что экзотермические эффекты оказывают очень существенное влияние на величину градиентов температур по толщине образца и, как следствие, на степень отверждения (рисунок 7).

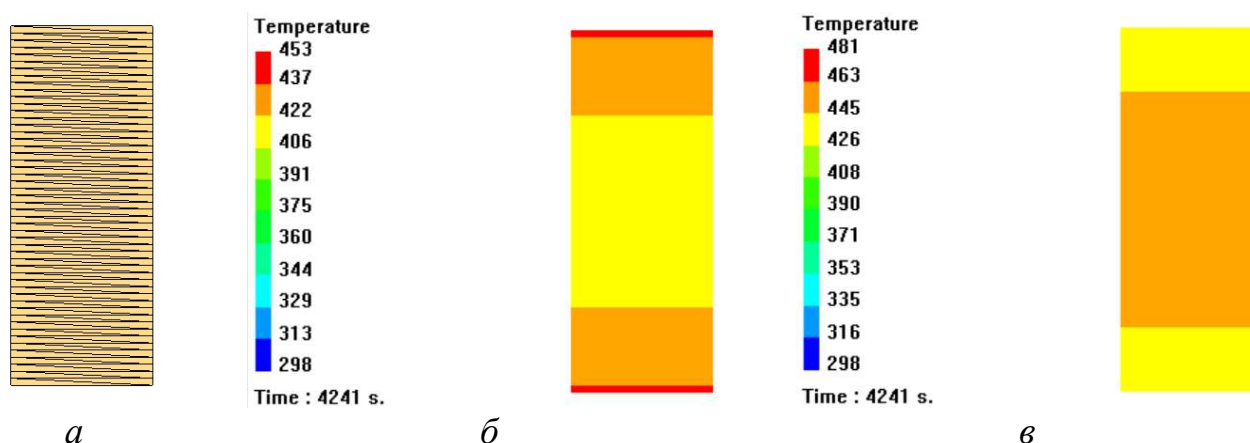


Рисунок 7 – Результаты моделирования температурного состояния стеклопластика  
*а* – при скорости нагрева 2 °С/мин, *б* – без учета тепловыделения, *в* – с учетом тепловыделения

В результате моделирования с учетом экзотермических эффектов установлено, что в начальный момент времени, значение температуры внутри стеклопластика ниже, чем на его поверхности. Далее, под влиянием экзотермических эффектов, температура внутри образца повышается и становится выше, чем на поверхности. Для всех исследованных скоростей нагрева установлены значения времени, при котором имеет место выравнивание температурных полей и степеней отверждения по объему образца.

В углепластике изменение температурного состояния и степени отверждения имеют такие же закономерности как для стеклопластика (рисунок 8), но из-за меньшего значения теплоемкости и большего значения коэффициента

теплопроводности углеродной ткани, температурное поле по объему углепластика существенно более равномерно, чем для стеклопластика, и как следствие, степень отверждения по объему углепластика распределяется равномернее, чем для стеклопластика.

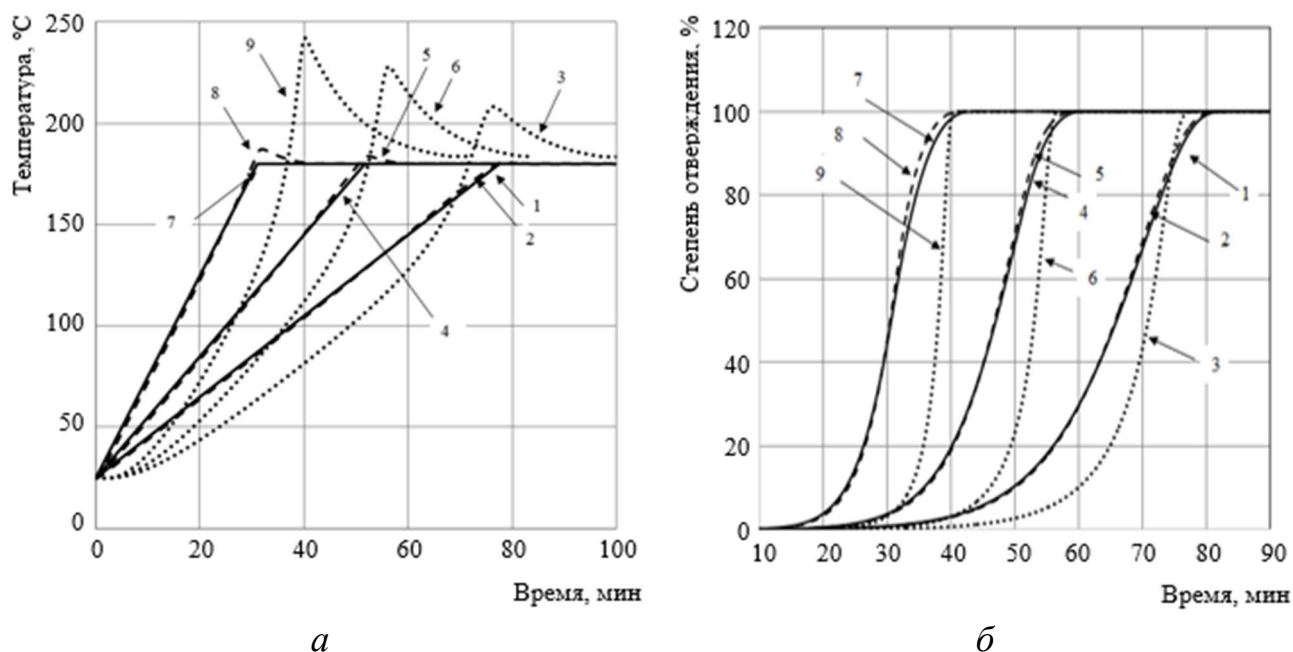


Рисунок 8 – Зависимость от времени для заданного режима отверждения на поверхности образца углепластика и стеклопластика при скоростях нагрева  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (1),  $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (4),  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (7), и в центре углепластика с учетом при скорости нагрева  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (2),  $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (5),  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (8) и в центре стеклопластика с учетом экзотермических эффектов при скорости нагрева  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (3),  $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (6),  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (9)

*a* – температуры, *б* – степени отверждения

В работе проведено моделирование значений градиентов температур по толщине образца эпоксидного материала и суммарной продолжительности его отверждения для двухступенчатого режима. В процессе моделирования использованы кинетические характеристики и экспериментальные результаты определения теплофизических свойств (таблица 1). Рассмотрен несколько скоростей нагрева:  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ;  $1^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ,  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ,  $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ;  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и их комбинация, всего 25 вариантов.

В результате проведенных исследований были установлены (для разных скоростей нагрева) средние значения градиентов температур в процессе отверждения  $\Delta T_a$ ; их максимальные значения  $T_{\max}$ ; среднее значение градиента степени отверждения  $\Delta\alpha_a$ ; их максимальное значение  $\Delta\alpha_{\max}$  и общая продолжительность  $t$  процесса отверждения для 25 вариантов режима отверждения,

которые использованы в качестве критерии оптимизации на следующем этапе работы.

В работе проведена оптимизация процесса отверждения. Все приведенные варианты технологических режимов были исследованы методом идеальной точки (1), в соответствии с которым, наиболее приемлемой считается вариант, у которого расстояние до "идеальной точки" минимально:

$$R_A = \sqrt[2]{(x_{\Delta T_{a,d}} - x_{\Delta T_a})^2 + (x_{\Delta T_{max,d}} - x_{\Delta T_{max}})^2 + (x_{\Delta \alpha_{a,d}} - x_{\Delta \alpha_a})^2 + (x_{\Delta \alpha_{max,d}} - x_{\Delta \alpha_{max}})^2 + (t_d - t)^2}, \quad (1)$$

где  $R_A$  – расстояние точки до идеальной точки;  $x_{\Delta T_{a,d}}$  – идеальное значение среднего градиента температуры для идеального варианта;  $x_{\Delta T_a}$  – среднее значение градиента температуры;  $x_{\Delta T_{max,d}}$  – идеальное значение максимального градиента температуры для идеального варианта;  $x_{\Delta T_{max}}$  – максимальное значение градиента температуры;  $x_{\Delta \alpha_{a,d}}$  – идеальное значение среднего степени отверждения для идеального варианта;  $x_{\Delta \alpha_a}$  – среднее значение градиента степени отверждения;  $x_{\Delta \alpha_{max,d}}$  – идеальное значение максимального градиента степени отверждения для идеального варианта;  $x_{\Delta \alpha_{max}}$  – максимальное значение градиента степени отверждения;  $t_d$  – идеальное значение времени отверждения для идеального варианта;  $t$  – время отверждения.

В результате расчетов (рисунок 9) установлено, что наименьшее значение  $R_A$  получено для режима №14,  $R_A=36,6$ , при котором нагрев на 1 участке проводят со скоростью 2 °С/мин, а на 3 участке со скоростью 3 °С/мин. Температурное состояние степень отверждения тепловыделение и перепад температур по объему образца показаны на рисунках 10 – 13.

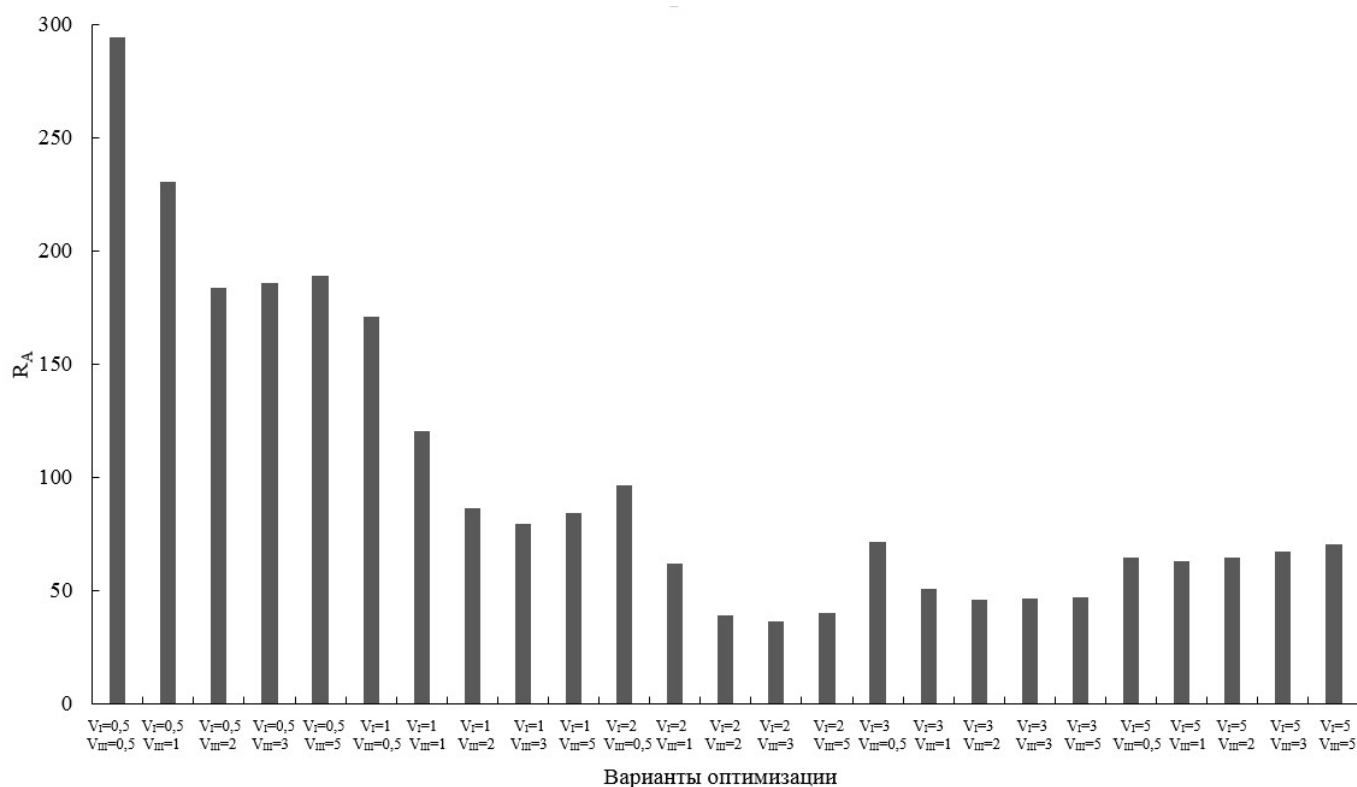
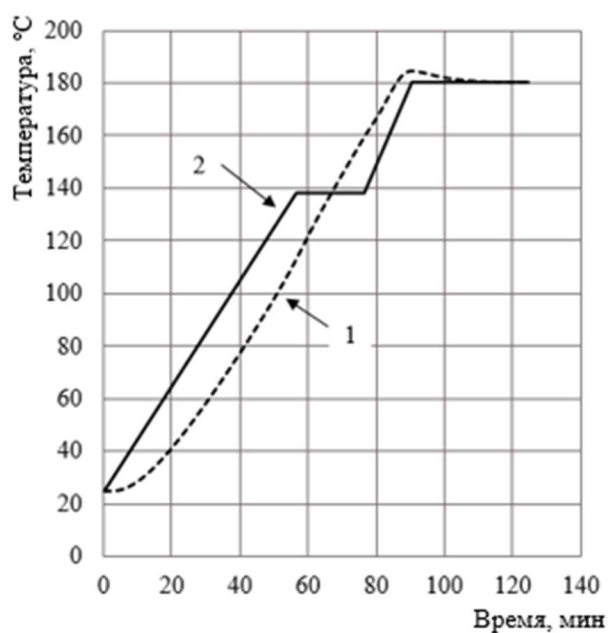
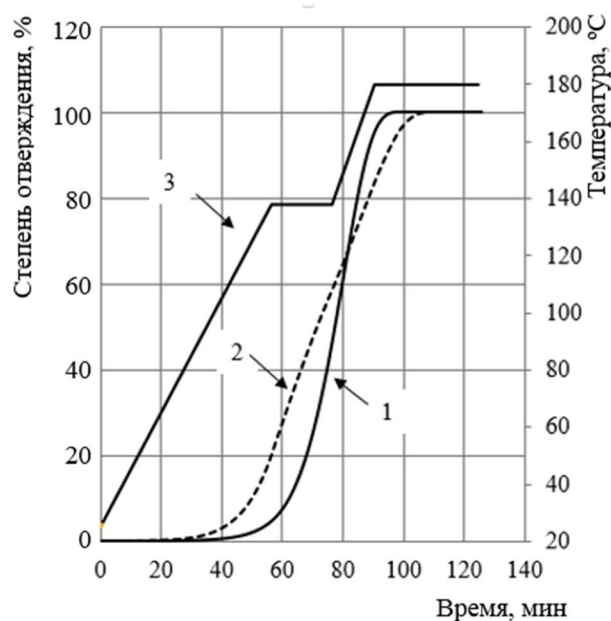


Рисунок 9 – Результаты оптимизации



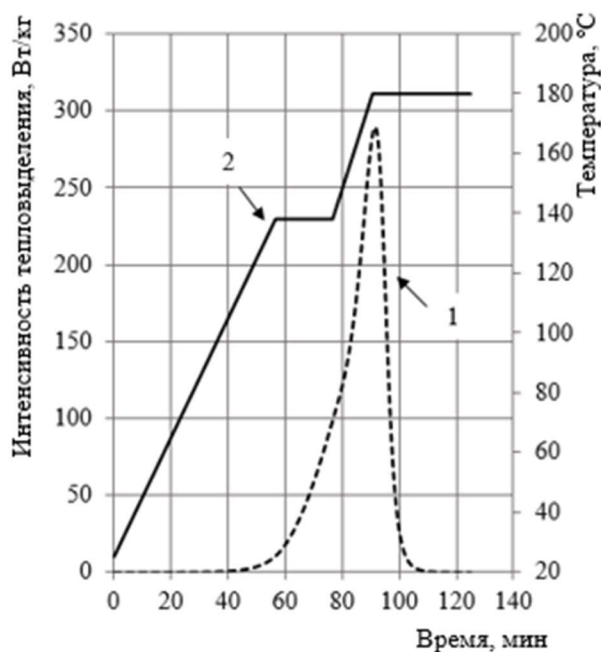
1 – в центре образца, 2 – на поверхности образца (заданный режим отверждения)

Рисунок 10 – Температурное состояние для оптимального режима отверждения



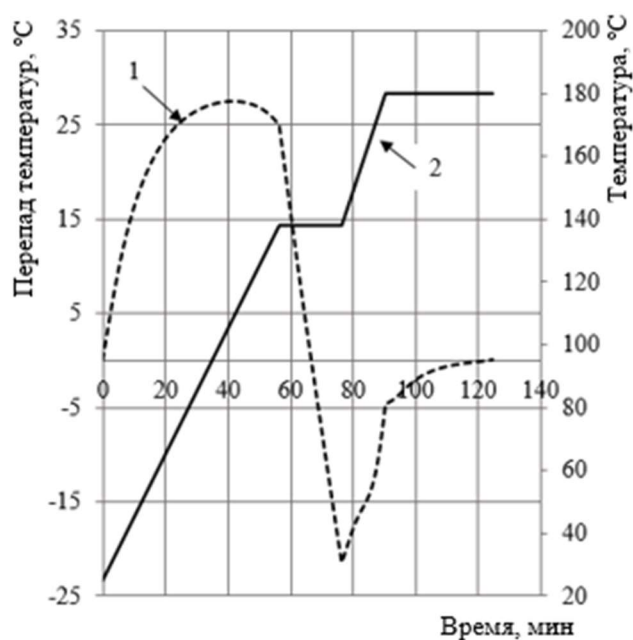
1 – в центре образца, 2 – на поверхности образца, 3 – заданный режим отверждения

Рисунок 11 – Зависимость степени отверждения от времени для оптимального режима отверждения



1 – образец, 2 – заданный режим отверждения

Рисунок 12 – Тепловыделение образца для оптимального режима отверждения



1 – в центре образца и на его поверхности, 2 – заданный режим отверждения

Рисунок 13 – Перепад температур в центре образца и на его поверхности для оптимального режима отверждения

При данном режиме среднее значение перепада температур внутри и на поверхности стеклопластика составляет 14 °C, максимальное значение перепада температур составляет 27,4 °C, среднее значение перепада степени отверждения внутри и на поверхности стеклопластика составляет 5,0%, максимальное значение перепада температур составляет 23,4%, общая продолжительность процесса отверждения (до конца выдержки на четвертом участке) составляет 124,8 мин.

**Четвертая глава** посвящена разработке технологических режимов изготовления изделий из углепластиков. В качестве объекта исследования в работе выбран баллон высокого давления для хранения водорода, используемый в конструкции беспилотных ЛА и стрингер крыла самолета А319.

В работе проведена разработка геометрической модели баллона из углепластика. Днище баллона по сечению (рисунок 14) имеет различную толщину, величина которой изменяется от 1,9 мм до 18,1 мм. Толщина баллона в цилиндрической части составляет 4,5 мм т.е. толщина днища по контуру изменяется в 4 раза.



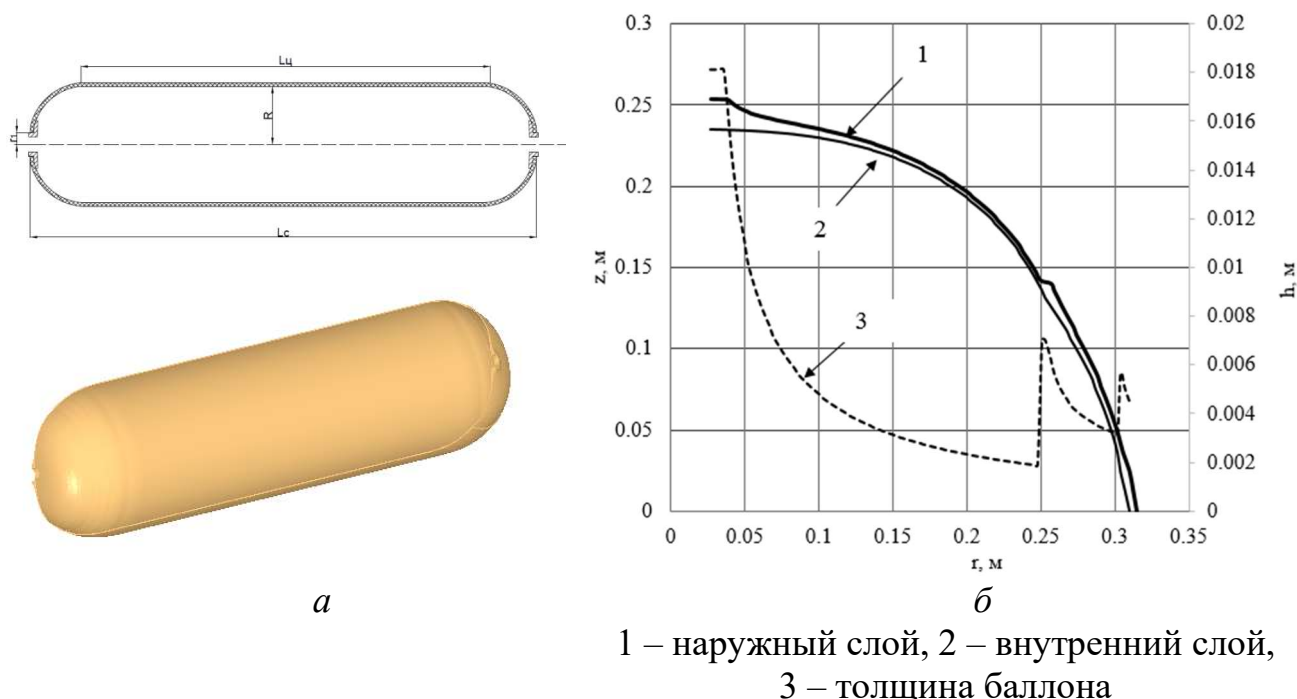


Рисунок 14 – Баллон высокого давления  
а – конечно-элементная модель, б – контур дна

Для анализа теплообмена в процессе отверждения в работе использовано уравнение теплопроводности (2) с внутренним источником тепла:

$$\rho C_p (T, \alpha) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{xx} (T, \alpha) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_{zz} (T, \alpha) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho_r v_r H_r \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность используемого ПКМ, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость ПКМ, Дж/(кг·К);  $T$  – абсолютная температура образца, К;  $t$  – время, с;  $\lambda_{xx}$ ,  $\lambda_{yy}$ ,  $\lambda_{zz}$  – теплопроводности анизотропного материала, Вт/(м·К);  $\rho_r$  – плотность связующих, кг/м<sup>3</sup>;  $v_r$  – объемное содержание связующих, %;  $H_r$  – общее количество теплоты, выделяемой в единице массы в процессе отверждения, Дж/кг;  $\alpha$  – степень отверждения, %.

В качестве исходных данных для моделирования использованы кинетические характеристики связующих и теплофизические характеристики материалов (таблица 1). Значения коэффициентов, используемые при моделировании, составили: теплоемкость углеродной ткани 600 Дж/(кг·К); теплопроводность углеродной ткани в направлениях  $x$  и  $y$ : 15 Вт/(м·К), в направлении  $z$ : 2 Вт/(м·К); общее количество теплоты, выделяемой в процессе отверждения  $3,1 \cdot 10^5$  Дж/кг. В процессе нагрева тепловой поток действует на внутренней поверхности баллона, коэффициент теплоотдачи принимали 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температура выдержки на втором участке (рисунок 4, б) составляет 160 °С, скорость нагрева на первом и на третьем участке составляет 3 °С/мин. Начальная температура соответствует температуре окружающей среды, равная 20 °С.



В результате моделирования кинетики процесса отверждения баллона определены значения температурных полей, степени отверждения и интенсивности тепловыделения в различные моменты времени отверждения (рисунок 15).

Для удобства анализа результатов моделирования по контуру баллона нанесены четыре точки (рисунок 15, *a*), которые далее в работе используются для обозначения участков контура днища, на которых определяются значения температур, степени отверждения и интенсивность тепловыделения. Анализ полученных результатов показал (рисунки 16 – 19), что в процессе отверждения имеет место неравномерный нагрев не только по контуру днища, но и по толщине.

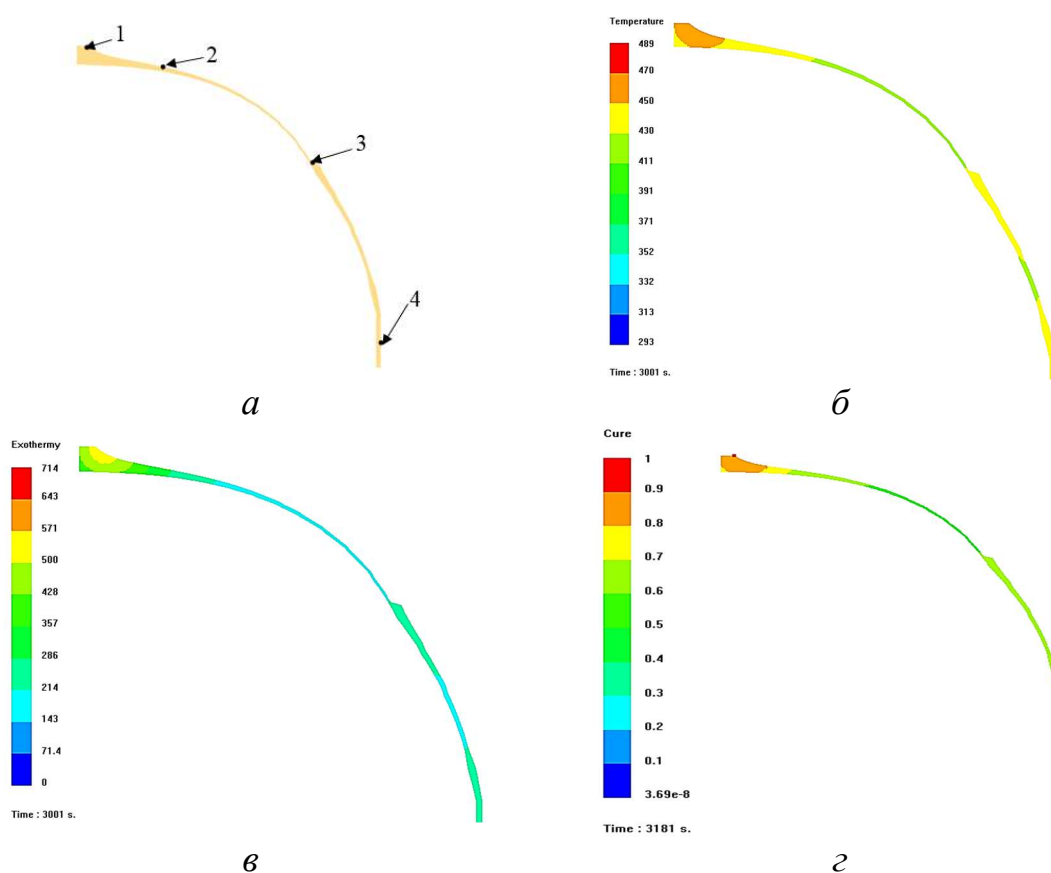


Рисунок 15 – Баллон высокого давления и результаты моделирования  
*a* – модель сечения баллона, *б* – температурного состояния,  
*в* – интенсивности тепловыделения, *г* – степени отверждения

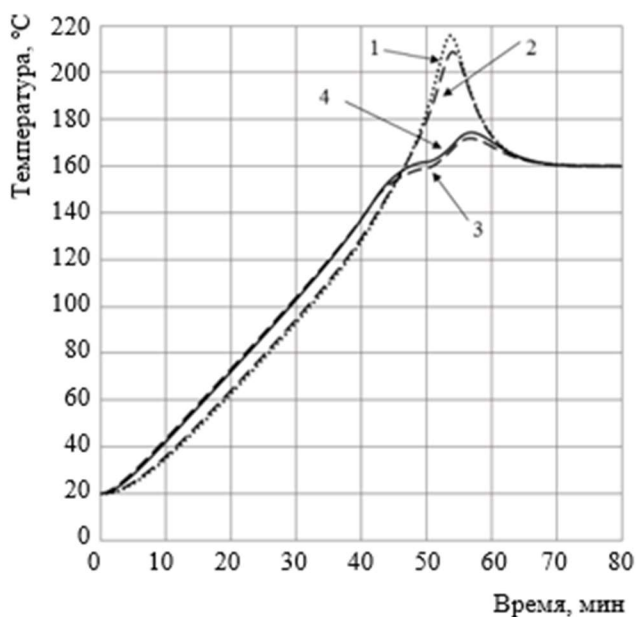


Рисунок 16 – Температурное состояние в точках 1(1), 2(2), 3(3), 4(4)

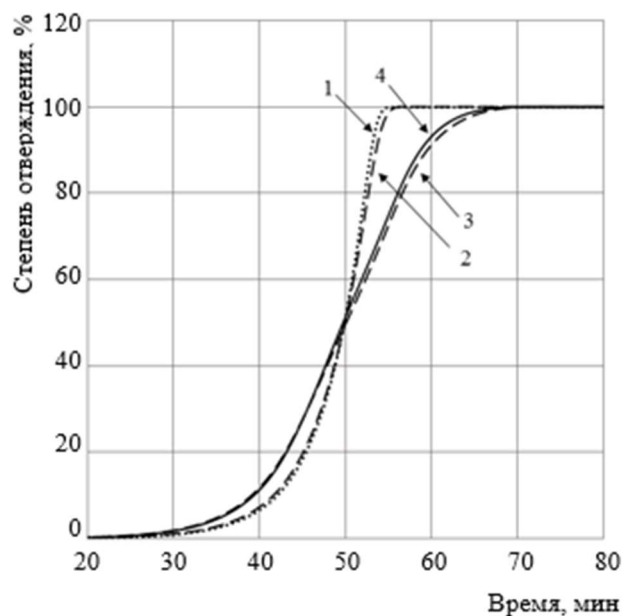


Рисунок 17 – Степень отверждения в точках 1(1), 2(2), 3(3), 4(4)

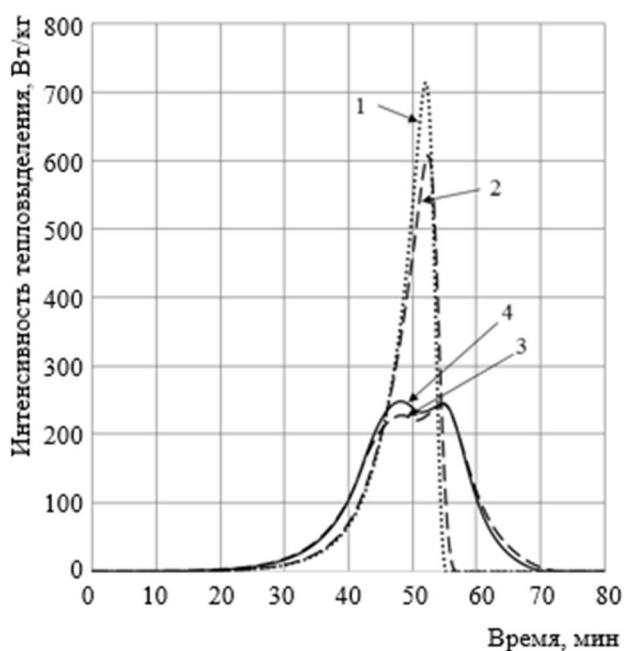


Рисунок 18 – Изменение интенсивности тепловыделения в процессе отверждения баллона в точках 1(1), 2(2), 3(3), 4(4)

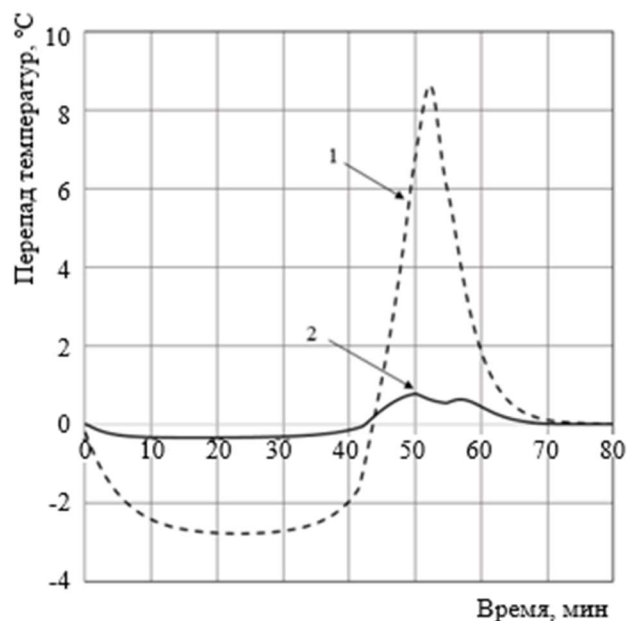


Рисунок 19 – Перепад температуры по толщине баллона в точках 1(1) и 3(2)

Наибольшие значения температур зафиксированы в точке 1, максимальная интенсивность тепловыделения происходит в точке 1, минимальная в точке 3. Таким образом, температурное поле по контуру днища изменяется нелинейно, значение температуры уменьшается от точки 4 до точки 3, далее температура на поверхности детали увеличивается от точки 3 до точки 2 и на участке от точки 2 до

точки 1. При увеличении толщины имеет место повышение градиента температур. Аналогичным образом изменяется степень отверждения. При повышении толщины конструкции из-за концентрации теплового потока максимальное значение температуры, и интенсивности тепловыделения увеличивается, что требует проводить нагрев с минимальной скоростью.

Для обеспечения более равномерного распределения температурных полей по длине и толщине конструкции, в работе проведено моделирование при меньшей скорости нагрева, значения которой на 1 участке (рисунок 4, б) составила 3 °С/мин и 1 °С/мин на участке 3. Предлагаемый режим нагрева приводит к увеличению продолжительности отверждения в 5%, однако снижает значения градиентов температур по толщине в 8% и по длине в 11%.

В работе проведено моделирование процесса отверждения стрингера крыла самолета А319 (рисунок 20).

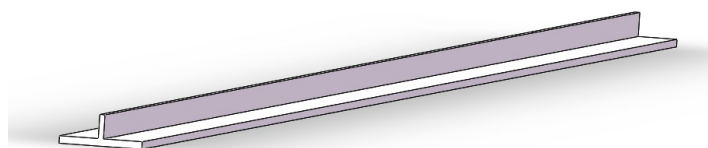


Рисунок 20 – Стрингер крыла

Для удобства исследования результатов моделирования по контуру стрингера нанесены пять точек (рисунок 21): точки 1, 4, 5 находятся на поверхности стрингера, точки 2 и 3 располагаются в центре верхней и нижней его части. Отверждение стрингера проводили при скорости нагрева 3 °С/мин.

С использованием кинетических и теплофизических свойства материалов (таблица 1) определены температурное поле, степень отверждения и интенсивность тепловыделения в зависимости от времени отверждения в различных точках стрингера (рисунки 22 – 24), при значениях коэффициента теплоотдачи 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Все обозначения точек, в которых проводили расчеты, даны в соответствии с рисунком 21 (a=14 мм, b=20 мм).

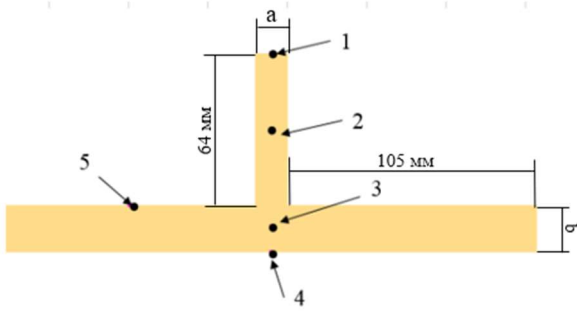


Рисунок 21 – Схема стрингера с указанием характерных точек

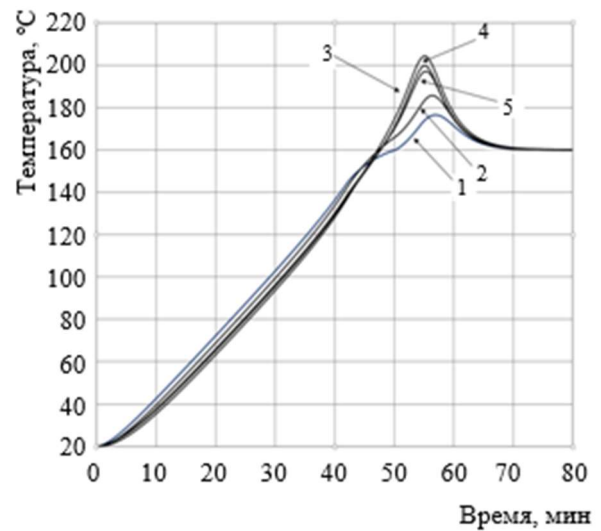


Рисунок 22 – Температурное состояние различных участков стрингера

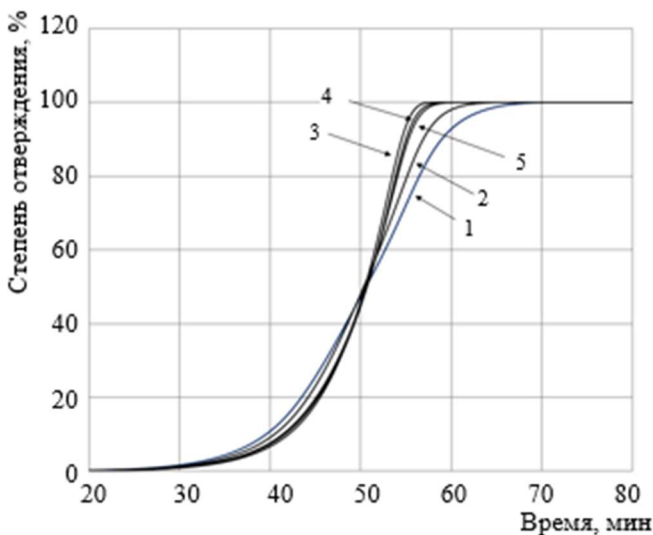


Рисунок 23 – Степень отверждения различных участков стрингера

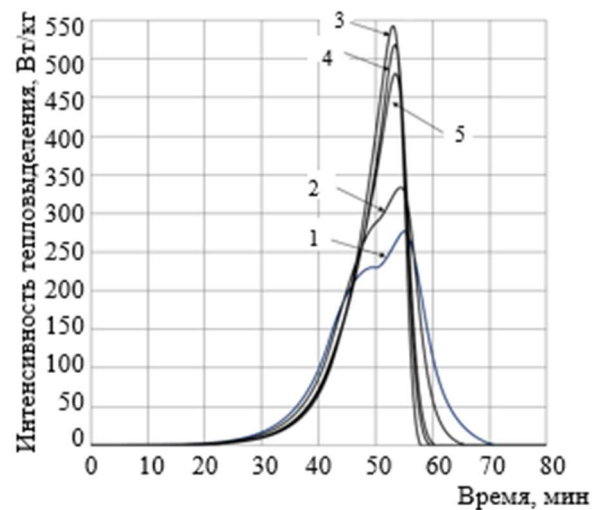
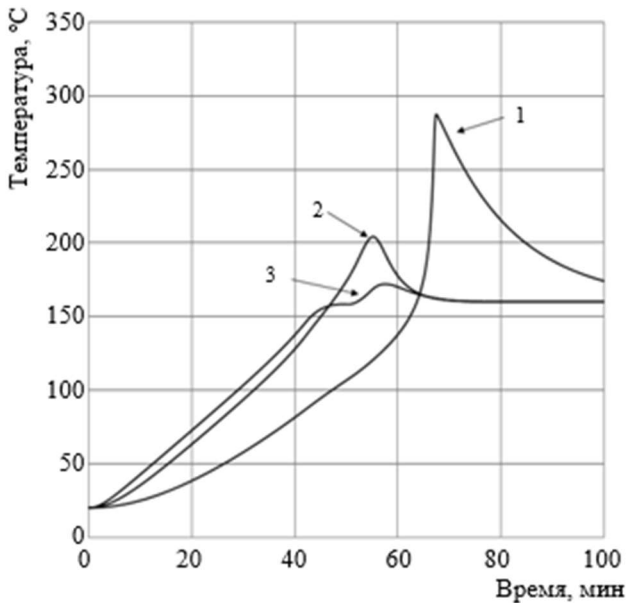


Рисунок 24 – Интенсивность тепловыделения различных участков стрингера

В результате проведенных расчетов установлено, что максимальная интенсивность тепловыделения происходит на втором участке режима отверждения (рисунок 4, б). Процесс тепловыделения протекает неравномерно, что приводит к такому же неравномерному процессу отверждения. Среди рассмотренных пяти участков стрингера, самое интенсивное тепловыделение зафиксировано в точке 3 (рисунок 21). В начале процесса отверждения из-за низкой теплопроводности значения температур на этом участке стрингера ниже, чем на остальных его поверхностях, однако из-за большей интенсивности тепловыделения (рисунок 24) самое большое значение температуры наблюдается именно в этой

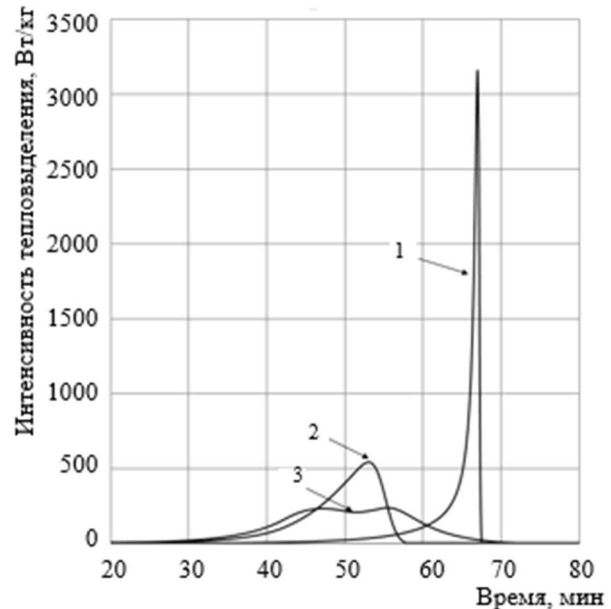
точке. Таким образом, именно в точке 3 будет происходить перегрев и, как следствие, возникновение остаточных напряжений.

В работе исследовано влияние условий конвекции на кинетику процесса отверждения стрингера (рисунки 25 и 26) и проведено моделирование при трех значениях коэффициента теплоотдачи 10, 50, 150 Вт/(м<sup>2</sup>·К).



1 – 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К), 2 – 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К),  
3 – 150 Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Рисунок 25 – Температурное состояние в точке 3 при различных значениях коэффициента теплоотдачи



1 – 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К), 2 – 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К),  
3 – 150 Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Рисунок 26 – Интенсивность тепловыделения в точке 3 при различных значениях коэффициента теплоотдачи

В результате проведенных расчетов установлено, что при повышении значения коэффициента теплоотдачи с 10 до 150 Вт/(м<sup>2</sup>·К), интенсивность тепловыделения в точке 3 уменьшается в 13 раз, максимальная температура на этом же участке стрингера уменьшается на 40%, максимальный градиент температуры между точками 1 и 3 уменьшается в 6 раз, т.е. чем выше значения коэффициента теплоотдачи, тем равномернее значения температурных полей.

Далее в работе исследовано влияние масштабного фактора и рассмотрены 3 варианта стрингеров, отличающиеся геометрическими размерами. Моделирование кинетики процесса отверждения проводили, как и ранее, с использованием программного обеспечения ESI PAM-RTM.

В результате проведенных расчетов (таблица 2) установлено, что общие закономерности изменения кинетики процесса нагрева и отверждения для стрингеров различных геометрических размеров, подобны. Для всех

рассмотренных вариантов стрингеров максимальное количество теплоты выделяется в точке 3. Для этой области стрингера характерно, что процесс отверждения в точке 3 начинается позднее, по сравнению со всеми иными характерными участками, однако заканчивается раньше.

Таблица 2 – Температурное состояние и степень отверждения стрингеров различных габаритов

Параметры	Варианты стрингера (рис. 21)		
	a= 7мм b=10мм	a=14мм b=20мм	a=21мм b=30мм
Максимальное значение температуры в точке 3, °С	173,0	204,3	243,2
Среднее значения перепада температур между точками 1 и 3, °С	3,0	7,4	12,5
Среднее значения перепада степени отверждения между точками 1 и 3, %	1,6	2,8	3,0
Среднее значение разницы интенсивности тепловыделения между точками 1 и 3, Вт/кг	55,8	287,7	793,6

В результате исследования влияние масштабного фактора установлено, что при увеличении габаритов стрингера в 3 раза, интенсивность тепловыделения увеличивается более чем в пять раз, максимальная температура стрингера увеличивается на 40%, средний градиент температуры по площади стрингера увеличивается в 4,2 раз, среднее значения градиента степени отверждения между точками 1 и 3 увеличивается в 2 раза, и разница максимальной достигаемой интенсивности тепловыделения между точками 1 и 3 увеличивается в 14 раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, посвященной совершенствованию технологии производства тонкостенных конструкций ЛА из ПКМ, позволяющей повысить их качество, получены следующие результаты:

1. Разработана методика многокритериальной оптимизации режимов производства деталей ЛА из композиционных материалов на этапе отверждения, позволяющая принимать оптимальные технологические решения.
2. Разработана методика оценки теплофизических характеристик связующих в процессе их отверждения с учетом изменения их агрегатного состояния при разной степени конверсии, включающая методики оценки температуры и времени гелеобразования, теплоемкости и теплопроводности.
3. Предложены модели, учитывающие кинетику процесса отверждения композиционных материалов без и с учетом изменения агрегатного состояния

связующего при разных скоростях нагрева в процессе производства деталей ЛА. Установлено, что при повышении скорости нагрева, значения погрешностей при оценке температурных полей с учетом и без учета агрегатного состояния связующего, увеличиваются. Учет теплофизических свойств эпоксидного материала при изменении его агрегатного состояния позволяет повысить точность моделирования на  $\approx 30\%$ .

4. Разработан алгоритм определения режима отверждения стеклопластика и углепластика и установлено, что при одном и том же режиме отверждения интенсивность тепловыделения в стеклопластиках выше, чем в углепластиках, значения градиентов температур по толщине образца выше в стеклопластиках, что может приводить к перегреву и, как следствие, к снижению механических характеристик. Оптимизация технологических режимов отверждения при производстве деталей ЛА из композиционных материалов позволяет сократить суммарную продолжительность техпроцесса.

5. На примере ряда конструкции (стрингер и баллон высокого давления беспилотного ЛА) с учетом масштабного фактора показано, что для обеспечения более равномерного распределения температурных полей по длине и толщине конструкции в процессе производства, целесообразно использовать найденные по предложенной методике, режимы нагрева.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Чэнь Янян Определение кинетики отверждения деталей из полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих / Чэнь Янян, Пье Пху Маунг, Г.В. Малышева // Тепловые процессы в технике. – 2020. – Т. 12. – № 4. – С. 185-191.
2. Чэнь Янян Исследование кинетики процесса отверждения тонкостенной конструкции из углепластика / Чэнь Янян, Пье Пху Маунг, Г.В. Малышева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2020. – № 5. – С. 58-70.
3. Чэнь Янян Исследование влияния масштабного фактора на кинетику процесса отверждения деталей из полимерных композиционных материалов / Чэнь Янян, Пье Пху Маунг, Г.В. Малышева // Тепловые процессы в технике. – 2020. – Т. 12, № 9. – С. 424-431.

### Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS

4. Chen Yangyang Method for determining the rational regimes of curing products from polymer composite materials / Yangyang Chen, G.V. Malysheva // Materials Today: Proceedings. – 2019. – No. 11. – pp.128-133.
5. Chen Yangyang An investigation of the kinetics of the heating process for parts made of carbon fiber in the process of curing / Yangyang Chen, V.A. Nelyub.,

- G.V. Malysheva // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, No.3. – pp. 296-299.
6. Chen Yangyang An optimization technique for technological modes of thermoset binder hardening / Yangyang Chen, G.V. Malysheva // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, No.4. – pp. 367-371.
  7. Chen Yangyang Algorithm for the optimization of the technological conditions of forming epoxy-matrix-based composites / Yangyang Chen, M.A. Gorodetskii, V.A. Nelyub, G.V. Malysheva // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – No. 13. – pp. 1369-1372.
  8. Chen Yangyang Optimization of curing mode of epoxy resin based composites / Yangyang Chen, G.V. Malysheva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 683, No. 1. – p. 012065.
  9. Chen Yangyang Simulation of the curing process of glass fiber reinforced epoxy composites / Yangyang Chen, Maung Pyi Phyo, G.V. Malysheva // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2171, No. 1. – p. 030018.
  10. Chen Yangyang Optimization of the technological curing modes of glass fiber reinforced composites / Yangyang Chen, Maung Pyi Phyo, G.V. Malysheva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, No. 2. – p. 022040.
  11. Chen Yangyang A method of evaluating the curing kinetics of epoxy-binder-based polymer composite materials / Yangyang Chen, N.I. Khudoberdin, Maung Pyi Phyo, G.V. Malysheva // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, No. 2. – pp. 164-168.

#### Другие публикации

12. Чэнь Янян Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их отверждения / Чэнь Янян, П.С. Мараховский, Г.В. Малышева // Труды ВИАМ. – 2018. – № 9. – С. 119-123.
13. Нелюб, В.А. Оптимизация технологических режимов отверждения композитов, изготовленных на основе углеродной ленты с медным покрытием / В.А. Нелюб, Чэнь Янян, Г.В. Малышева // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 12. – С. 84-87.
14. Чэнь Янян Оптимизация технологии режима отверждения композитов на основе эпоксидных связующих / Чэнь Янян, Г.В. Малышева // Пром-Инжиниринг: Сб. тезисов докл. V Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, 2019. – С. 188-192.
15. Чэнь Янян Оптимизация технологии отверждения композитов на основе эпоксидных связующих / Чэнь Янян, Н.И. Худобердин, Г.В. Малышева // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Сб. трудов VI Международной научной конференции. – Москва, 2019. – С. 448-450.
16. Чэнь Янян Разработка технологии отверждения деталей из стеклопластиков на примере баллона высокого давления / Чэнь Янян, Пье Пху Маунг, Г.В. Малышева // Сб. тезисов докл. XLIV Академических чтений по космонавтике. – Москва, 2020. – С. 149-151.