

На правах рукописи

РОМАНЕНКОВ Владимир Алексеевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ КОСМИЧЕСКИХ
КОРАБЛЕЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э Баумана (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель: **Владимир Алексеевич Тарасов**
доктор технических наук,
профессор кафедры технологий ракетно-космического машиностроения национального исследовательского университета МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Валерий Андреевич Моисеев**
доктор технических наук, профессор,
Генеральный директор ЗАО «КОМПОМАШ – ТЭК»

Виктор Александрович Дьяконов
кандидат технических наук, начальник
лаборатории АО «Композит»

Ведущая организация: ФГУП «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева

Защита диссертации состоится «03» июля 2019 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5., стр.1

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8(499)267-09-63

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

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



Михайлов В.П.

Актуальность работы. Проблема тепловой защиты является первостепенной при возвращении на Землю пилотируемых космических кораблей. Аэродинамическое торможение набегающего потока воздуха на поверхности летательного аппарата (ЛА) приводит к формированию интенсивных тепловых потоков к пилотируемому изделию. Решение аналогичных задач актуально для летательных аппаратов, у которых скорость движения в атмосфере многократно превышает скорость звука.

Разработка систем тепловой защиты для полётов космических аппаратов в атмосфере осуществлена на базе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва; ФГУП ЦНИИмаш, ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, ФГУП ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, а также в ведущих ВУЗах страны: МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, МАИ (НИУ), МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, МГУЛ и других организациях. Значительный вклад в научную базу создания тепловой защиты внесли труды ученых страны: Н.А. Анфимова, В.С. Авдеевского, А.И. Леонтьева, С.И. Исаева, А.В. Лыкова, Г.Н. Дульнева, Ф.Б. Юревича, Н.А. Тихонравова, Ю.В. Полежаева, О.Ф. Шленского, С.М. Скалы, В.В. Горского, В.С. Зарубина, Н.А. Алфутова, С.В. Резника, П.В. Просунцова, П.А. Ребиндера, С.П. Рудобашты, В.Д. Котенко, И.В. Глебова и др.

Установлено, что наиболее эффективными явились системы, построенные на принципе абляции – упорядоченном разрушении части теплозащитного покрытия (ТЗП) из искусственно созданных композиционных материалов (КМ) и, в частности, на основе стеклянных, асбестовых, капроновых волокон, переплетенных в многослойную объемную структуру, и полимерной феноло-формальдегидной смолы (ФФС), заполняющей межволоконное пространство, скрепляющей волокна и превращающейся в кокс при высокотемпературном воздействии.

Важнейшим условием качества и надежности подобной тепловой защиты является обеспечение требуемых условиями эксплуатации значений физико-механических и теплофизических свойств КМ. Данная задача решается в процессе изготовления композитной конструкции теплозащитного покрытия, т.к. получение материала и создание конструкции совмещены во времени.

Производство тепловой защиты космических кораблей включает несколько различных технологий. Главными факторами, определяющими качество теплозащитного покрытия, являются: факторы пропитки волокнистого наполнителя раствором феноло-формальдегидной смолы в этиловом спирте в процессе изготовления многослойной заготовки ТЗП и факторы последующего горячего формования в автоклаве под давлением газообразной среды (автоклавного формования).

Управление указанными факторами невозможно без понимания взаимосвязей между составляющими технологической цепочки «пропитка межволоконного пространства заготовки ТЗП – вакуумная сушка - автоклавное формование», определяемых параметрами процессов: давлением, температурой, временем, вязкостью, текучестью и другими.

Известные результаты проведенных исследований не содержат моделей, необходимых для оптимизации и активного управления параметрами технологической цепочки «пропитка межволоконного пространства заготовки ТЗП – вакуумная сушка - автоклавное формование».

В связи с этим представленную научную работу, посвященную созданию методического и технологического обеспечения процессов изготовления теплозащитного покрытия космических кораблей, следует считать актуальной.

Работа выполнена по Госконтракту № 351-8625107 в рамках Федеральной космической программы 2006 – 2015гг.

Цель работы. Улучшить характеристики теплозащитных покрытий при изготовлении на базе создания и внедрения новых технологий и технологического оборудования при сокращении затрат на производство теплозащиты.

Основными задачами исследования являются:

1. Научное обоснование технологических режимов многократной пропитки-сушки заготовки теплозащиты из условия обеспечения доли смолы на уровне 35-40% и создание оборудования для снижения времени пропитки;
2. Создание автоклавного комплекса, использующего азот в качестве рабочей среды, и научно обоснованное согласование технологического воздействия на заготовку теплозащиты температуры и давления в реакционной камере;
3. Разработка рекомендаций по применению результатов исследований в производстве теплозащитных покрытий.

Научной новизной обладают следующие положения работы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена технология пропитки многослойных вязально-прошивных заготовок ТЗП феноло-формальдегидным связующим, которая на основе оригинальной 3-х кратной комбинации режимов пропитки и вакуумной сушки обеспечила получение высокого содержания смолы на уровне более 42%, что недостижимо при традиционной технологии пропитки.
2. Концептуально обоснована величина оптимальной доли спирта, равной 75% и удаляемой из связующего ЛБС-4 методом вакуумной сушки, позволяющая обеспечивать минимальную длительность 3-х циклов пропитки-сушки заготовок ТЗП с высоким содержанием смолы.
3. Теоретически обоснована связь технологических параметров формования ТЗП – величины давления и момента подачи азота в реакционную камеру автоклава, обеспечивающая получение требуемого содержания феноло-формальдегидной матрицы в тепловой защите по окончании процесса отверждения связующего.
4. Разработана методика согласования давления и момента подачи азота в реакционную камеру автоклава, позволившая сократить до минимума энергозатраты на получение азота из воздуха и нагрев формуемого

теплозащитного покрытия и обосновать наиболее экономичный вариант заполнения камеры азотом с предварительным вакуумированием по сравнению с традиционной технологией продувки.

Практическая значимость работы состоит:

- в созданном комплексе методик для обоснованного выбора технологических режимов многократной пропитки, вакуумной сушки и автоклавного формования с учетом свойств волокнистого наполнителя и феноло-формальдегидной смолы, обеспечивающих однородность распределения и требуемое соотношение объемов смолы и наполнителя в теплозащитном покрытии;

- в созданной технологии и опытно-промышленной установке, которые позволяют проводить многократную пропитку многослойных вязально-прошивных полотен бакелитовым лаком, обеспечить однородность распределения связующего и наполнителя, сократить время пропитки и расход связующего;

- в созданной технологии и автоматизированном автоклавном комплексе, которые обеспечивают эффективное проведение автоклавного формования в нейтральной среде теплозащитных покрытий с однородным распределением и определенным соотношением объемов связующего и наполнителя в материале;

Практическая значимость научных, методических и технологических разработок подтверждается актами испытаний препрегов, теплозащитных композиционных материалов и конструкций тепловой защиты спускаемых аппаратов (СА), техническими актами внедрения технологий и оборудования в ЗАО «Завод экспериментального машиностроения» РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

Научно-практические положения, выносимые на защиту:

- результат аналитической оценки научно-практической значимости основных направлений развития и совершенствования технологии многократной пропитки, вакуумной сушки и автоклавного формования теплозащитных покрытий космических кораблей в соответствии с приоритетом повышения качества теплозащиты и снижения затрат при изготовлении;

- принципы проведения многократной пропитки-сушки заготовок ТЗП, включая режимы и количество повторяющихся циклов, количество удаляемых летучих компонентов, с достижением высокого содержания феноло-формальдегидной смолы при минимальной длительности производственного цикла и расхода связующего;

- математическая модель уплотнения стенки теплозащитного покрытия, определяющая выбор технологических режимов автоклавного

формования, методику согласования давления и момента подачи азота в реакционную камеру, обеспечивающих достижение требуемого содержания смолы в покрытии с минимальными затратами электроэнергии.

Методы исследований. Теоретические положения работы базируются на использовании верифицированных численных методов исследования, положений теории вероятности и математической статистики, сертифицированных методов измерения теплофизических и механических величин. Эксперименты по пропитке проводились на опытно-промышленной установке ВК 888-01850 ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, по автоклавному формованию - на аттестованном автоматизированном автоклавном комплексе, испытания материалов - на сертифицированном испытательном оборудовании - Zwick Z 150, применяемом в производстве космической техники на ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, изложенных в работе, обеспечиваются корректным применением математических методов анализа и оптимизации, известных методов экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании, сходимостью результатов аналитических моделей с экспериментальными данными, а также успешным использованием основных положений работы в производстве космической техники.

Апробация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на пяти международных конференциях «Академические чтения по космонавтике» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана) в 2005; 2010; 2011; 2016; 2017г.г., на 4-ой Международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана) в 2013г., на международной конференции «The International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications» (Wrexhem UK, Glyndor university) в 2016г.

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 10 статьях общим объемом 9,5 п.л., опубликованных в журналах перечней Scopus, ВАК РФ. По материалам диссертации получено 4 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Содержит 197 страниц, из которых на 160 страницах изложен основной текст, проиллюстрированный 82 рисунками и 33 таблицами. Список литературы состоит из 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается сущность и актуальность темы работы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость, а также основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор, посвященный актуальным вопросам создания теплозащиты спускаемых аппаратов космической техники. Показано, что для пилотируемой космонавтики проблема тепловой защиты экипажа космического корабля была и остается наиболее важной и сложной. При ее решении должна быть обеспечена высокая степень надежности.

Теория и практика применения тепловой защиты космического корабля, основу которых составляют труды известных ученых страны, показала эффективность композитных конструкций абляционного типа на основе волокнистых вязально-прошивных полотен и резольной феноло-формальдегидной смолы, которая при высокотемпературном воздействии разрушается с образованием твердого коксового остатка, препятствующего проникновению тепловых потоков внутрь аппарата.

При исследовании процессов пропитки рассматривались в основном особенности пропитки под действием капиллярных сил и путем вакуумного всасывания (метод инфузии). Основными направлениями исследований горячего формования под давлением композитных конструкций явились вопросы горячего прессования и вакуумного формования в температурном поле.

Вместе с этим результаты проведенных исследований недостаточны для интенсификации специфических процессов изготовления теплозащитных покрытий.

Конструкция ТЗП отличается значительной толщиной, а феноло-формальдегидная смола имеет высокую вязкость, что предопределяет большую длительность пропитки, измеряемую десятками суток. Для снижения вязкости применяют спиртовые растворы смолы. Спирт относится к летучим компонентам связующего (бакелитового лака), который определяет пожароопасность технологии и пористость материала после отверждения.

Перспективным направлением борьбы с пористостью является многократное повторение циклов «пропитка – сушка», но моделей данных процессов в настоящее время не существует.

Другим важным направлением обеспечения качества ТЗП является обработка многослойной заготовки на оправке давлением инертного газа – азота при одновременном температурном воздействии на изделие. Известны рекомендации на изменение температуры нагрева изделия во времени.

Однако отсутствуют рекомендации на согласованное с температурой изменение во времени давления газа, которое в конечном итоге должно обеспечить однородность структуры материала по объему ТЗП и требуемое соотношение долей волокнистого наполнителя и феноло-формальдегидной смолы.

Практический опыт производства ТЗП свидетельствует об объективной необходимости научно обоснованного подхода к выбору технологических

режимов, изучения и приобретения новых знаний по управлению процессами определяющими качество покрытий.

В связи с этим в первой главе работы были приняты задачи исследований.

Во второй главе приведены результаты экспериментально – теоретического анализа явлений, протекающих в процессе принудительной пропитки бакелитовым лаком ЛБС-4 под давлением вязально - прошивных полотен волокнистого наполнителя ТЗП и последующей вакуумной сушки.

Показано, что необходимость обеспечения требуемого соотношения наполнителя и ФФС в заготовке диктует применение многократной пропитки и сушки. Обосновано минимально необходимое количество ФФС после пропитки, чтобы в процессе автоклавного формования получилась однородная структура теплозащиты. В целях интенсификации процесса и сокращения длительности приготовления заготовок предложено использовать схему поперечной пропитки под давлением (Рис.1).

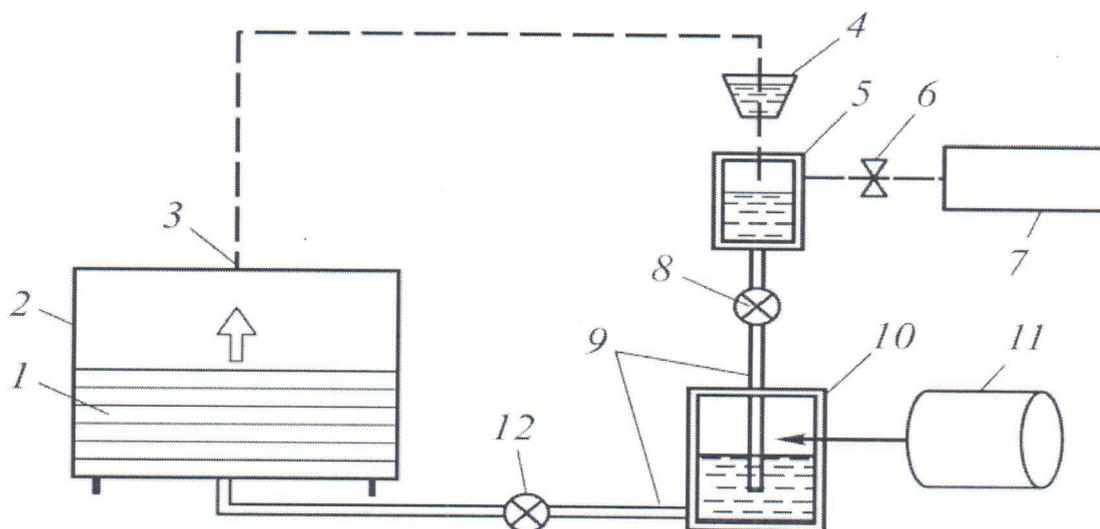


Рис. 1. Схема установки для поперечной пропитки ТЗП

1 – многослойная заготовка ТЗП; 2 – пропиточная камера; 3 – вакуумная линия; 4 – индикатор связующего; 5 – сборник связующего; 6; 9; 12 – краны; 7 – вакуумный насос; 8 – трубопроводы; 10 – ёмкость со связующим; 11 – компрессор

Разработана модель заполнения пор заготовки при многократной пропитке и сушке, которая показала, что:

- с учетом необходимости пропитки нитей вязально – прошивного полотна, состоящих из нескольких десятков микроволокон, рациональным следует считать использование трех циклов пропитки и сушки,
- режимы вакуумной сушки допускают оптимизацию по общей длительности приготовления заготовок ТЗП (Рис.2).

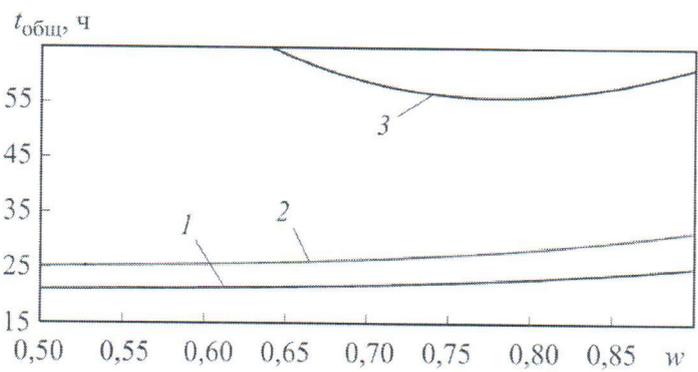


Рис. 2. Зависимость общего времени $t_{общ}$ циклов, пропитка-сушка от доли удаляемых ЛК w после одной(1), двух(2) и трех(3) пропиток

Определены режимы многократной пропитки и сушки.

Для исследования особенностей поперечной пропитки под давлением разработан и изготовлен лабораторный стенд (Рис.3).

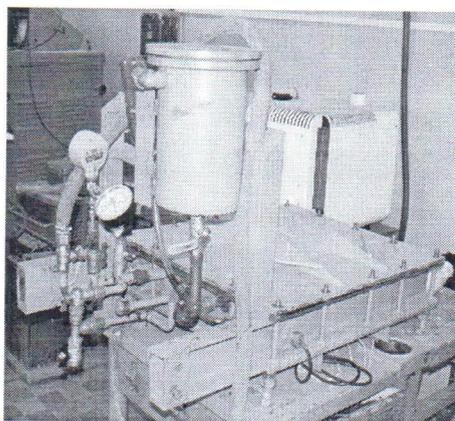


Рис. 3. Общий вид универсального лабораторного стенда

На образцах, вырезанных из разных точек поверхности пропитанного вязально - прошивного полотна, проведено изучение интенсивности удаления летучих компонентов (ЛК) бакелитового лака при вакуумной сушке (Рис.4).



Рис. 4. Интенсивность удаления ЛК лака из заготовки ТЗП

Разработана гидромеханическая модель движения вязкого связующего в капиллярах заготовок при вакуумной сушке, которая указывает на возможность потери однородности содержания ФФС в процессе сушки. Экспериментальные исследования подтвердили существование и необходимость учета данного эффекта при назначении времени вакуумной сушки.

В третьей главе исследовались процессы и явления, сопровождающие автоклавную обработку ТЗП СА с целью обоснования рациональных технологических режимов. Обосновано вертикальное расположение реакционной камеры (Рис.5), применение азота в качестве рабочего газа.

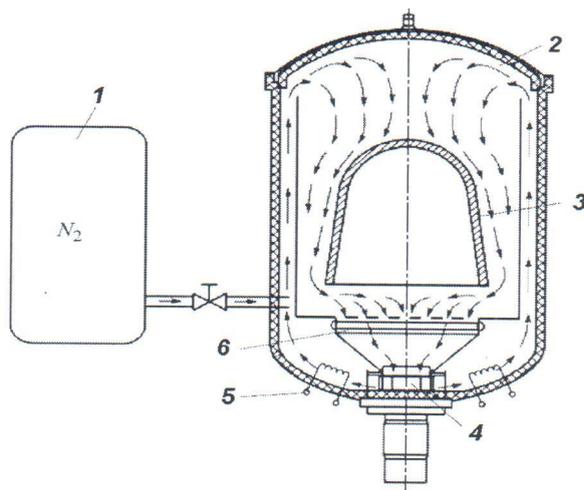


Рис.5. Схема нагрева и движения азота в реакционной камере автоклава
1 – ресивер; 2 – реакционная камера; 3 – заготовка теплозащиты СА;
4 – вентилятор; 5 – электронагреватели; 6 – теплообменник

Важную роль в технологии изготовления ТЗП играет процесс движения вязкой жидкости в межволоконном пространстве, управление которым потребовало изучения реологических свойств лака ЛБС-4. Было установлено, что на вязкость лака влияние оказывают следующие факторы: степень отверждения связующего и содержание в нем растворителя, которые изменяются во времени в процессе испарения и естественной полимеризации; температура нагрева как фактор интенсификации отверждения и испарения спирта и, наконец, скорость сдвига как фактор интенсификации процессов испарения растворителя и отверждения.

Комплексное воздействие данных факторов на лак влияет на сложный, немонотонный вид изменения вязкости, которая в соответствии с уравнением Дарси определяет процесс движения жидкости в межволоконном пространстве. Исследования показали бесперспективность снижения вязкости лака путём добавления спирта и нанотрубок, применения ультразвуковой обработки.

Установлено, что нагрев лака снижает вязкость, но одновременно запускает механизм роста вязкости вследствие испарения спирта и частичного отверждения.

Кроме того, в процессе испытания лака ЛБС-4 на вискозиметре CAP 2000+ фирмы Brookfield было показано, что изменение вязкости свойственно и для совместного влияния скорости сдвига в жидкости и времени воздействия, которые определяют работу против сил трения (Рис.6).

Увеличение скорости сдвига в связующем сопровождается снижением вязкости. Скорость сдвига пропорциональна скорости течения связующего в межволоконном пространстве, а также перепаду давления в законе Дарси, рост которого на этапе автоклавной обработки способствует снижению вязкости.

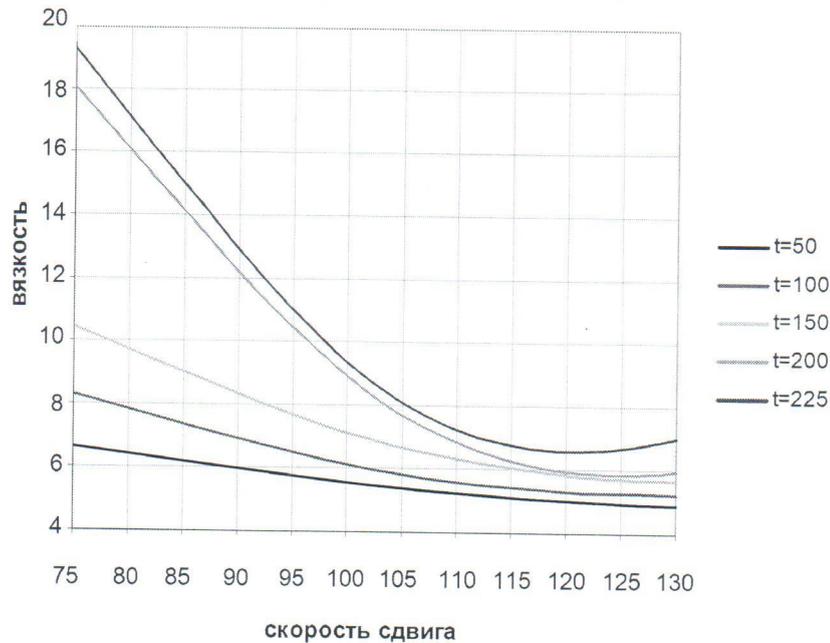


Рис. 6. Функция вязкости от скорости сдвига для фиксированного времени t , измеренная на вискозиметре CAP 2000+ фирмы Brookfield

На базе использования уравнения Дарси разработана математическая модель вытеснения излишков связующего из объема заготовки под давлением

$$\frac{d \ln \delta}{dx} = -\frac{2K_k^*}{R^2 + 2RH} \frac{\Delta T_m}{\dot{T}} \frac{\Delta p}{\eta_0^* \eta(x)},$$

где $K_k^* = K_k \frac{R}{R+H}$ - коэффициент, учитывающий криволинейность боковой

поверхности изделия, R, H - радиус и высота изделия, $K_k = \frac{C_D}{\tilde{l}} \frac{d_n^2}{16} \frac{\Pi^3}{(1-\Pi)^2}$ -

коэффициент Козени, $C_D = 0,5$ - коэффициент Дарси, $\tilde{l} = 1,2 \dots 1,25$ - поправка на непрямолинейность траекторий течения связующего между слоями стеклоткани, d_n - диаметр нитей стеклоткани ($d_n = 0,2 \text{ мм}$), Π - пористость вязального прошивного полотна, η_0^* - вязкость связующего в начальный момент времени при нормальной температуре, η - нормированная вязкость при произвольном значении параметра температуры $x = \frac{\Delta T}{\Delta T_m}$, ΔT_m - перепад температур при отверждении, \dot{T} - скорость роста температуры.

Модель устанавливает связь между утонением изделия, законом изменения температуры во времени и давлением, у которого моменты подачи θ и сброса t_k могут не соответствовать началу $x=0$ и окончанию $x=1$ нагрева при отверждении. Модель позволяет решать разнообразные практические задачи и проводить анализ:

- процесса предварительной холодной подпрессовки и последующего прессования нагретых заготовок композитных конструкций,
- процесса предварительной холодной подпрессовки и последующего прессования заготовок композитных конструкций в условиях непрерывного роста температуры,
- автоклавного формования, согласуя моменты начала и окончания опрессовки изделия так, чтобы обеспечить требование к соотношению наполнителя и связующего.

Зависимость избыточного давления в автоклаве как функция моментов подачи θ и сброса t_k давления представлены на (Рис. 7).

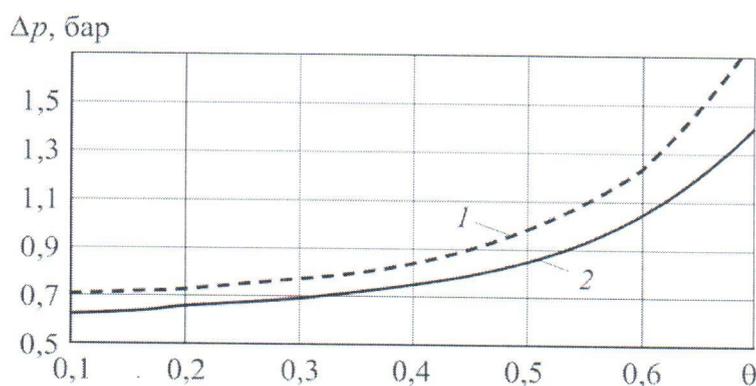


Рис. 7. Зависимости амплитуды изменения давления азота от момента времени его подачи при $t_k = 0,9$ (кривая 1) и $t_k = 1$ (кривая 2)

Адекватность и точность модели была подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными.

Разработана методика обоснования выбора таких технологических режимов автоклавной обработки, как: величина и время подачи давления, масса подаваемого азота, мощность электротока в используемых ТЭНах с учетом колебания температуры подаваемого азота в процессе адиабатического расширения и сжатия. Анализ роста температуры изделия проведён с учетом инерционности нагрева, которую обеспечивают участие в процессе реакционной камеры и технологической оснастки. Данный подход обеспечивает удовлетворительную сходимость экспериментальных и расчётных данных (Рис.8).

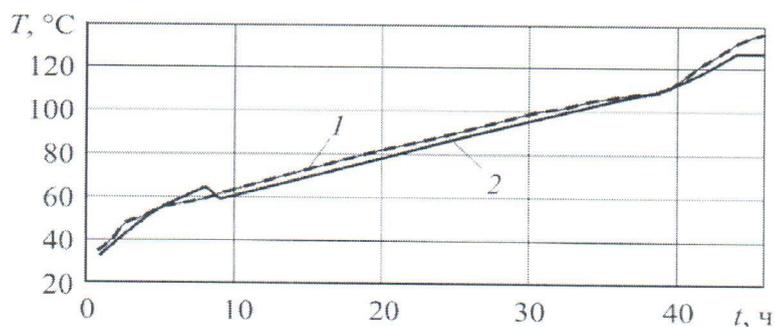


Рис. 8. Изменение температуры при термообработке ТЗП
1 – экспериментальные; 2 – расчётные

Установлена возможность оптимизации режимов подачи давления по критерию минимума варьируемой части расхода электроэнергии (Рис. 9) на извлечение азота из воздуха и его сжатие без учета электроэнергии на нагрев ТЗП и технологической оснастки. Проведено сравнение экономичного режима удаления воздуха из камеры путем вакуумирования и прогрессивного режима путем продувки камеры азотом. Показано удовлетворительное соответствие с результатами опытной отработки на ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева алгоритма управления давлением и температурой (Рис.10).



Рис.9. Зависимость затрат электроэнергии на получение потребной массы азота и изменения его температуры в процессе термообработки теплозащиты СА

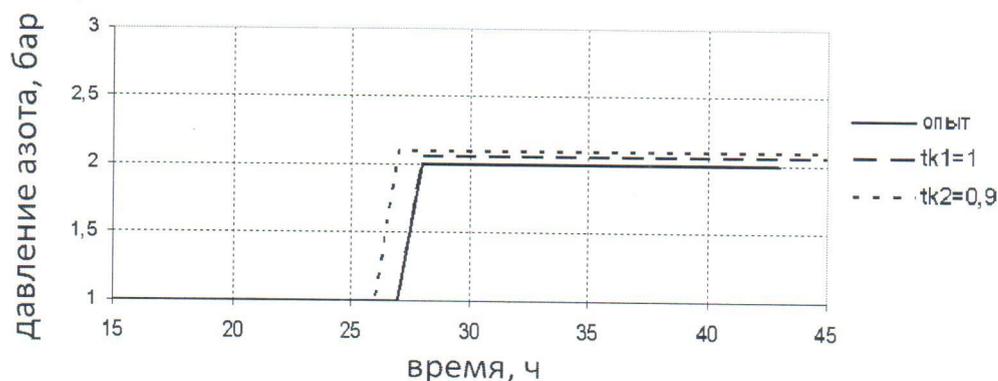


Рис.10. Сравнение теоретических и опытных рекомендаций по режимам подачи азота в реакционную камеру

В четвертой главе представлены результаты экспериментального и практического применения разработок и методик для обоснования технологических режимов многократной пропитки и формования ТЗП в автоклаве.

На опытно-промышленной установке ВК 888-01850 (Рис.11) проведена трехкратная пропитка лаком ЛБС-4 при температуре от 20 до 25 °С теплозащитной заготовки крышки парашютного контейнера СА (Рис.12) из кремнезёмного полотна ПВП-КТ-11 из 11 слоев по режиму, указанному в Таблице 1.

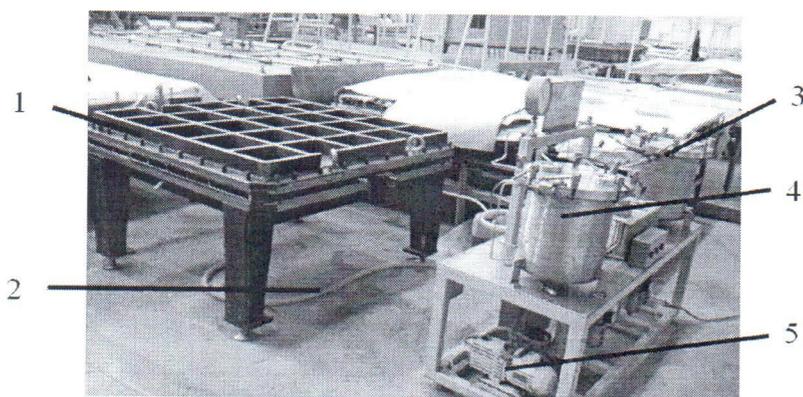


Рис. 11. Установка для пропитки ВК 888-01850

- 1 – пропиточная камера ВК0690-14526;
- 2 – линия подачи связующего;
- 3 – сборник связующего;
- 4 – ёмкость со связующим;
- 5 – вакуумный насос

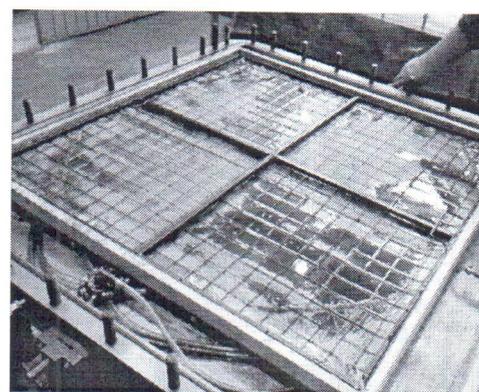


Рис. 12. Пропитанная заготовка крышки парашютного контейнера СА

Содержание ФФС в препреге после 3-х циклов пропитки-сушки составило более 42 %, что соответствует требованиям обеспечения надежного функционирования ТЗП.

Экспериментальная отработка режимов автоклавной обработки ТЗП СА проводилась в автоматизированном комплексе для композитных конструкций в среде азота (Рис.13).

Основные технические параметры комплекса: объем реакционной камеры 263 м³; максимальная рабочая температура 350 °С; максимальное рабочее давление 1,6 МПа; объем накопительной азотной установки 327 м³; давление азота в накопительной установке 3,5 МПа; мощность азотной станции 307 кВт; время производства азота из воздуха для заполнения накопительной установки 11,1 ч.

Режим пропитки-сушки

№ переход а	Наименование технологического перехода	Технологические параметры	
		Давление, МПа	Время, ч
1	Вакуумирование камеры с заготовкой	0,02	1
2	Подача порции связующего в камеру	0,02	1
3	Выдержка	0,02	8...10
4	Вакуумная сушка	0,005	2...3

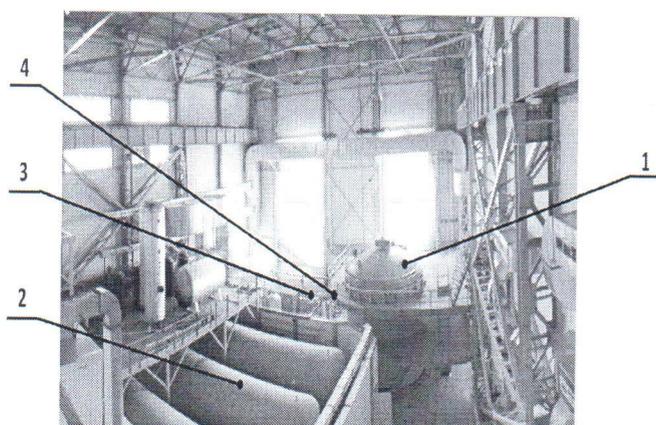


Рис. 13. Комплекс для баротермического формования
 1-реакционная камера;
 2-азотная накопительная установка;
 3-азотная станция;
 4-вакуумная станция

При экспериментальной отработке режимов проведено автоклавное формование опытных элементов тепловой защиты СА: крышки парашютного контейнера (Рис.14), оболочки корпуса СА (Рис.15), лобового теплозащитного экрана (Рис.16).

Достигнутые при изготовлении основные физико-химические свойства ТЗП приведены в Таблице 2.

В Таблице 3 приведены данные по экономии энергоресурсов при изготовлении ТЗП СА.

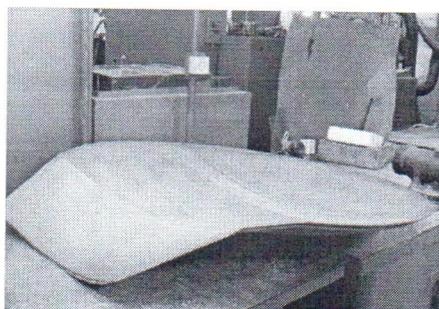


Рис.16. Крышка парашютного контейнера, диаметр около 1100 мм, толщина 5 мм

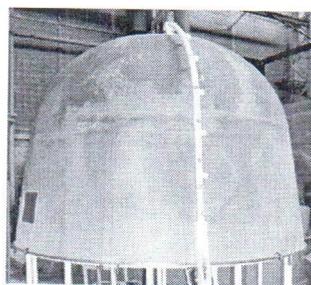


Рис.17. Оболочка корпуса СА, диаметр 2200 мм, высота 1800 мм, толщина 5 мм



Рис.18. Лобовой теплозащитный экран, диаметр 2200 мм, высота 500 мм, толщина до 100 мм

Таблица 2.

Сравнение свойств ТЗП с требованиями КД на изделие

Показатели	Среднее значение		Сравнительная оценка
	Старая технология	Новая технология	
Степень поликонденсации	95,6	97,1	Повышение на 1,6%
Предел прочности при изгибе (ЛТЭ), МПа	56,3	61,3	Повышение на 11%
Предел прочности при сжатии (ЛТЭ), МПа	68,2	89	Повышение на 13%
Масса ЛТЭ	212	208	Снижение на 1,6%
Предел прочности при изгибе (оболочка СА), МПа	103,2	110,5	Повышение на 7%
Масса оболочки СА	57,3	56,2	Снижение на 2%
Массовая доля ФФС, %	>28	>35	Повышение на 25%

Таблица 3.

Экономия энергоресурсов при автоклавном формовании

Вид энергоресурсов	Годовая экономия, %
Электроэнергия	18,3
Техническая вода	90
Тепловая энергия	7,4

Внедрение результатов исследований подтверждено актами ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева.

Основные выводы:

1. Сформулированы принципы проведения 3-х кратной пропитки – сушки заготовки теплозащитного покрытия и обоснованы режимы технологических переходов, позволившие достичь содержания смолы в заготовке более 42%.

2. Установлен относительный объем спирта, равный 75% и подлежащий удалению из лака ЛБС-4 на каждом цикле 3-х кратной пропитки –

сушки, позволивший повысить на порядок производительность изготовления заготовки теплозащиты для последующего автоклавного формования.

3. Получена математическая модель уплотнения стенки теплозащитного покрытия, которая является необходимым условием выбора технологических режимов автоклавной обработки (давления и момента подачи азота в реакционную камеру), определяющих достижение требуемого содержания смолы в готовом изделии.

4. Разработана методика согласования давления и момента подачи азота в реакционную камеру, позволившая сократить до минимума энергозатраты на получение азота из воздуха и нагрев формируемого теплозащитного покрытия и обосновать наиболее экономичный вариант заполнения камеры азотом с предварительным вакуумированием по сравнению с известной технологией замещения воздуха путем продувки камеры азотом.

5. Созданы и внедрены в производство технологические средства в виде новых технологий и нового оборудования автоклавного формования и вакуумной пропитки, которые обеспечили:

- повышение качества ТЗП (доли смолы в теплозащитном покрытии на 25%, прочности на изгиб и сжатие на 11% и 13% соответственно)
- снижение материальных затрат на изготовление теплозащитного покрытия (лака ЛБС-4 в 7 раз, длительности пропитки в 10 раз, длительности автоклавной обработки на 15%, потреблению электроэнергии на 18%, технической воды на 90%)
- увеличение в 2,5 раза годового выпуска тепловой защиты пилотируемых космических кораблей для полетов экипажей к международной космической станции.

Материалы диссертации изложены в следующих основных работах:

1. Theory and practice for the manufacture of a composite thermal heat shield for a space ship/ Romanenkov V.A., [et al.]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 4, 2016. P. 012015. (0,8 п.л./0,5 п.л.).

2. Modification of Polyester Resin Binder by Carbon Nanotubes Using Ultrasonic Dispersion/ Romanenkov V.A., [etc.]// Polymer Science. Series D 2015 .- Vol. 8 , Issue 1 . P. 9 - 16 <http://link.springer.com/...34/S1995421215010165>. (1 п.л./0,2 п.л.).

3. Обоснование технологических режимов многократной пропитки-сушки и последующей автоклавной обработки для обеспечения требуемого состава материала теплозащитного покрытия и минимального времени его изготовления/ В.А. Романенков [и др.]// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017 . № 12 . С. 94 – 102. (1,5 п.л./0,8 п.л.).

4. Математическая модель многократной пропитки пористых тел растворами полимеров / В.А. Романенков [и др.]// Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 11. 2015. М.: Московский

государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. С. 238-252. (Электронное издание) DOI: 10.7463/1115.0820714. (2 п.л./0,75 п.л.)

5. Методика выбора режимов баротермической обработки в автоклаве теплозащиты спускаемых космических аппаратов/ В.А. Романенков [и др.]// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 9. С. 83 – 92. (1,5 п.л./0,7 п.л.).

6. Романенков В.А. Технологические основы снижения длительности цикла и повышения безопасности изготовления тепловой защиты спускаемых космических аппаратов/ Тарасов В.А., Комков М.А. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 8. С. 35 – 43. (1,2 п.л./0,5 п.л.).

7. Прочность волокнистых композиционных материалов с наномодифицированным наполнителем/ В.А. Романенков [и др.]// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2013. № 3. С. 120 – 129. (1,5 п.л./0,3 п.л.).

8. Модификация полиэфирного связующего углеродными нанотрубками методом ультразвукового диспергирования/ Романенков В.А. [и др.]// Клеи. Герметики. Технологии. 2014 . № 8 . С. 22 – 29. (1,5 п.л./0,3 п.л.).

9. Реологическая модель влияния теплового воздействия на вязкость лака ЛБС-4 в процессе пропитки многослойной тканой заготовки теплозащитного покрытия/ В.А. Романенков [и др.]// Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 10 . С. 33 – 37. (1,5 п.л./0,25 п.л.).

10. Повышение физико-механических показателей теплозащитных покрытий при автоклавном формовании в нейтральной среде / В.А. Романенков [и др.]// Космическая техника и технологии. 2017. № 3 (18). С. 34-41. (1 п.л./0,8 п.л.).

11. Способ изготовления препрега с автоматическим контролем технологического процесса: пат. №2565709 РФ / В.А. Романенков [и др.]; заявл. 12.05.14; опубл. 20.10.15. Бюлл. №29.

12. Устройство и способ изготовления многослойных изделий из полимерных композиционных материалов преимущественно в виде тел вращения: пат. RU №2574261 С1 / В.А. Романенков [и др.]; заявл. 12.08.14; опубл. 10.02.16. Бюлл. № 4.

13. Автоматизированный комплекс для изготовления композиционных материалов: пат. RU №2574262 С1 / В.А. Романенков [и др.]; заявл. 12.08.14; опубл.10.02.16. Бюлл. № 4.

14. Способ изготовления препрега: пат. РФ № 2484956 / В.А. Романенков [и др.]; заявл. 29.03.12; опубл. 20.06.13. Бюлл. № 17.