

На правах рукописи

**САЛИМОВ ИЛЬЯ ЭРКИНОВИЧ**

**ГИБКИЙ ТЕПЛОЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ  
НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОВОЛОКНА**

Специальность 2.6.11. «Технология и переработка синтетических и  
природных полимеров и композитов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2026 г.

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Беспалов Александр Сергеевич**  
кандидат технических наук,  
начальник сектора НИЦ «Курчатовский институт - ВИАМ

Официальные оппоненты: **Трофимов Александр Николаевич**  
доктор технических наук,  
Генеральный директор АО «НПО Стеклопластик им. Н.Н. Трофимова»  
**Солдатов Михаил Александрович,**  
кандидат химических наук,  
доцент кафедры химической технологии полимерных композиционных лакокрасочных материалов и покрытий ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «\_\_\_» апреля 2026 г. в 1\_\_:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д.17. Тел. 8 (499) 267-88-70, e-mail: admin@viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ и на сайте [www.viam.ru](http://www.viam.ru)

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 1005005, г. Москва, ул. Радио, д.17, НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ, учёному секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук

М. А. Горбовец

© НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ, 2026

© Салимов И.Э., 2026

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Актуальность работы обусловлена комплексом взаимосвязанных технологических, экономических и климатических вызовов, стоящих перед российской гражданской авиацией, а также необходимостью обеспечения технологического суверенитета в сфере критических материалов. Интенсивный рост пассажиропотока и грузооборота на внутренних и международных маршрутах, обслуживаемых отечественными авиакомпаниями, требует не только увеличения парка воздушных судов нового поколения (таких как МС-21, Суперджет, ИЛ-114 и других перспективных разработок), но и их соответствия ужесточающимся требованиям российских авиационных правил (АП-25, НЛГ 25 и др.), а также иностранным и международным стандартам (FAR-25, JAR-25, ICAO и другим). Эти требования формируют запрос на оптимизацию конструкции летательных аппаратов, где приоритетными направлениями выступают снижение массы для уменьшения расхода авиатоплива и эксплуатационных затрат, а также обеспечение акустического комфорта в пассажирском салоне и кабине экипажа, напрямую влияющего на конкурентоспособность авиаперевозчиков.

Теплозвукоизоляционные материалы (ТЗИМ) играют в этом контексте критически важную роль: они необходимы для обеспечения комфорта и безопасности, при этом их значительный объем и масса напрямую влияют на топливную эффективность. Традиционно применяемые изоляционные решения (минеральная вата, полимерные пены, комбинированные системы) зачастую не в полной мере удовлетворяют комплексным требованиям НЛГ 25 и специфике эксплуатации в России. Помимо фундаментального компромисса между низкой плотностью и высокими теплозвукоизоляционными свойствами (особенно в низкочастотном диапазоне 100-1000 Гц), особую остроту приобретает проблема гидрофобности. Впитывание влаги приводит к резкому росту теплопроводности, увеличению массы, снижению звукоизоляции, потере эластичности в результате промерзания в условиях отрицательных температур, развитию микроорганизмов и коррозии элементов конструкции планера. Поэтому разработка материала с повышенной гидрофобностью, достигаемой за счет применения специальных связующих, придающих гидрофобные свойства, является критически важным требованием для обеспечения стабильности эксплуатационных характеристик и долговечности в реальных условиях, в том числе в условиях арктического климата.

Ввиду запроса промышленности на новый ТЗИМ взамен импортного материала Microlite AA blankets (США) в связи с прекращением его поставок и взамен отечественного материала АТМ-1 в связи с прекращением его производства, а также в

свете обозначенных ранее вызовов разработка нового класса гибких волокнистых ТЗИМ низкой плотности приобретает высокую научно-техническую и практическую значимость.

Таким образом, создание нового многофункционального материала, сочетающего гибкость, предельно низкую плотность, высокое звукопоглощение, низкий коэффициент теплопроводности, низкое влагопоглощение при полном соответствии нормам НЛГ 25 по пожаробезопасности, на сегодняшний день крайне актуально и позволит создать конкурентоспособный отечественный продукт. Успешная реализация данного исследования и последующее внедрение материала в конструкции перспективных (МС-21, Суперджет, Ил-114 и другие) и модернизируемых воздушных судов гражданской авиации будет способствовать достижению стратегических целей отрасли: снижению массы изоляционных систем, повышению акустического комфорта пассажиров, снижению эксплуатационных затрат, обеспечению независимости от импорта критических материалов и укреплению технологического суверенитета России в области авиастроения, особенно в условиях повышенного внимания к развитию арктических регионов и Северного морского пути.

**Цель работы:** разработка технологии изготовления нового гибкого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности на основе стекловолокна и полимерного связующего.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Создать оборудование для получения гибких волокнистых материалов с низкой плотностью методом аэрационного осаждения с одновременным послойным нанесением связующего;
2. Установить взаимосвязь между структурой и свойствами основных компонентов связующего для получения гибкого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности на основе стекловолокна;
3. Разработать состав и технологию изготовления связующего для скрепления стеклянных волокон теплозвукоизоляционного материала, обеспечивающего ему высокую гибкость, низкую плотность, пожаробезопасные и гидрофобные свойства;
4. Установить зависимости физико-механических и гидрофобных свойств гибкого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности на основе стекловолокна от состава связующего;
5. Выявить закономерности влияния плотности волокнистых материалов низкой плотности на коэффициент теплопроводности;
6. Разработать состав и технологию изготовления гибкого волокнистого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности, отвечающего современным требованиям авиастроения, и исследовать его эксплуатационные свойства.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые построена физически обоснованная математическая модель, описывающая зависимость коэффициента теплопроводности от плотности волокнистых материалов в области низких плотностей от  $5 \text{ кг/м}^3$  до  $35 \text{ кг/м}^3$ , обеспечивающая сходимость теоретических и экспериментальных данных более 98 %. Установлено, что основными причинами увеличения коэффициента теплопроводности при низких плотностях (до  $25 \text{ кг/м}^3$ ) волокнистых материалов в диапазоне температур  $0-70 \text{ }^\circ\text{C}$  являются конвекция и радиационный перенос тепла.

2. На основе построенной математической модели установлено и экспериментально подтверждено эффективное пороговое значение плотности гибких материалов на основе стекловолокна средним диаметром  $1 \text{ мкм}$  равное  $9 \text{ кг/м}^3$ , при котором коэффициент теплопроводности соответствует современным требованиям авиастроения.

3. Установлены закономерности изменения свойств теплозвукоизоляционных материалов от состава связующего, что позволило обосновать выбор состава многокомпонентного связующего, обеспечивающего получение гибкого волокнистого теплозвукоизоляционного материала, превосходящего зарубежный и отечественный аналоги по гидрофобным и звукоизоляционным свойствам.

### **Теоретическая значимость работы**

1. Определены особенности смачивания поверхности стекла карбамид модифицированной фенолформальдегидной и карбамид меламиноформальдегидной смолами, являющимися основой связующего для получения гибких волокнистых теплозвукоизоляционных материалов низкой плотности. Показано, что карбамид модифицированная фенолформальдегидная смола имеет меньший контактный угол смачивания в зависимости от времени по сравнению с карбамид меламиноформальдегидной смолой.

2. Определены особенности процессов отверждения формальдегидных смол при различных температурных режимах и изучены структуры отвержденных смол. Установлены режимы отверждения смол, которые обеспечивают наиболее полное протекание реакции поликонденсации в них и минимальное количество дефектов в объеме отвержденных смол.

3. Установлено влияние режимов нанесения и отверждения связующего на физико-механические и гидрофобные свойства гибких теплозвукоизоляционных волокнистых материалов. Показано, что наилучшим комплексом свойств обладают образцы теплозвукоизоляционных материалов, полученных при комнатной температуре с

объемным расходом связующего 20 мл на 1 г стекловолокна, температура отверждения 160 °С с выдержкой в течение 150 мин.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана и изготовлена установка аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон для получения низкоплотных теплозвукоизоляционных материалов, обеспечивающая равномерное осаждение волокнистой основы и распределение связующего в объеме материала без привязки к производству волокна (получен патент РФ № 2023119229 «Устройство для получения нетканого теплоизоляционного материала»).

2. Разработаны состав и технология изготовления связующего для получения гибкого теплозвукоизоляционного волокнистого материала низкой плотности (технологическая инструкция ТИ 1.595-29-1693-2023 и технические условия ТУ 20.16.56-132-07545412-2023 НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ).

3. Разработаны состав и технология изготовления гибкого волокнистого теплозвукоизоляционного материала с низкой плотностью  $9,0 \pm 0,6 \text{ кг/м}^3$ , улучшенными гидрофобными свойствами (сорбционная влажность за 30 сут.  $(22,2 \pm 4,2 \%)$  и звукопоглощением (при частотах, превышающих 800 Гц) по сравнению с аналогами (технологическая инструкция ТИ 1.595-29-1797-2024 и технические условия ТУ 23.99.19-204-07545412-2024 НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, заявка на изобретение № 2024130034 от 04.10.2024 г.) для применения в конструкции авиационной техники.

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

1. Способ послойного получения гибких волокнистых теплозвукоизоляционных материалов низкой плотности, обеспечивающий равномерность осаждения волокнистой основы и распределения связующего в объеме материала.

2. Выбор основных компонентов, состава и способа нанесения связующего, обеспечивающих наилучший комплекс физико-механических и гидрофобных свойств гибких теплозвукоизоляционных волокнистых материалов.

3. Физически обоснованная модель и экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности от плотности волокнистых материалов в области низких плотностей от  $5 \text{ кг/м}^3$  до  $35 \text{ кг/м}^3$ , позволившие определить значение плотности равное  $9 \text{ кг/м}^3$ , ниже которого происходит значительное ухудшение теплоизоляционных свойств в волокнистых материалах на основе стеклянных волокон средним диаметром 1 мкм.

4. Технология изготовления нового гибкого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности на основе стекловолокна, обладающего пониженной плотностью, улучшенными гидрофобными свойствами по сравнению с аналогами.

### **Личный вклад соискателя**

Личный вклад соискателя заключается в постановке целей и задач исследования, выборе методов исследования, проведении анализа литературных и патентных источников, исследовании состава и свойств материала Microlite AA blankets (США), разработке экспериментальной установки для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон, отработке режимов получения гибких волокнистых ТЗИМ, исследовании особенностей процессов отверждения смол, разработке состава и технологии изготовления связующего, изготовлении и исследовании свойств образцов ТЗИМ, построении математической модели, описывающей зависимость коэффициента теплопроводности от плотности волокнистых материалов в области низких плотностей от  $5 \text{ кг/м}^3$  до  $35 \text{ кг/м}^3$ , разработке состава и технологии изготовления гибкого ТЗИМ низкой плотности на основе стекловолокна, обобщении и анализе полученных данных, подготовке публикаций и представлении результатов работы.

**Достоверность полученных в работе результатов** подтверждается использованием стандартизованных методов испытаний, метрологически аттестованного, поверенного современного оборудования, статистической обработкой значительного (свыше двухсот образцов) объема экспериментальных данных.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертационной работы были представлены на XXII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Федеральная территория «Сириус», 2024 г.), Международной научно-практической конференции «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2025 (ICMSSTE 2025)» (ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», 2025 г.).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 6 научных работ в рецензируемых журналах, из которых 5 включены в перечень ВАК при Минобрнауки России, 1 включена в международные базы данных Scopus и Web of Science, отражающих основное содержание работы. Получен 1 патент РФ и подана 1 заявка на изобретение.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 7 основных глав (литературный обзор, экспериментальная часть, обсуждение результатов) и выводов, изложена на 161 страницах печатного текста, содержит 38 рисунков, 11 таблиц и библиографию из 150 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, отражены основные достигнутые результаты, которые выносятся на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор, в котором рассмотрены основные публикации, посвящённые современным авиационным ТЗИМ, их составу, свойствам и технологиям изготовления.

В частности, описана классификация современных ТЗИМ. В обзоре отдельно рассмотрены волокнистые ТЗИМ на основе стеклянных и минеральных волокон. Проведен сравнительный анализ характеристик различных ТЗИМ.

Благодаря оптимальному сочетанию низкой плотности, низкой теплопроводности и высокого звукопоглощения, перспективными являются ТЗИМ на основе стекловолокна. Эффективность волокнистых ТЗИМ определяется их микроструктурой: диаметром волокон в диапазоне 1-3 мкм, снижающим теплопроводность, особой пространственной ориентацией волокон, вызывающей анизотропию теплопроводности, и высокой пористостью.

Связующие компоненты играют решающую роль в обеспечении структурной целостности и долговечности ТЗИМ. В частности, фенолформальдегидные (ФФ) связующие характерны тем, что они обеспечивают образование наиболее прочных и водостойких соединений. Опыт промышленного применения фенольных связующих показывает, что материалы с ними приобретают способность хорошо переносить переменные воздействия влажности и температуры окружающей среды. В свою очередь, неорганические связующие обеспечивают высокую термостойкость и огнестойкость до 1000 °С, однако, сильно уступают органическим связующим по физико-механическим и гидрофобным свойствам.

Ключевым негативным фактором, существенно ухудшающим функциональные свойства ТЗИМ, является высокая влажность, увеличивающая теплопроводность и снижающая звукопоглощение. Гидрофобизация ТЗИМ на основе стекловолокна является критически важной для противодействия высокому росту теплопроводности, снижению звукопоглощения и демпфирования, а также для противодействия процессам коррозии, индуцируемому воздействием влаги. Введение гидрофобизаторов в связующее является наиболее технологически простым и недорогим способом придания протекторных свойств ТЗИМ.

На сегодняшний день главным вызовом остается обеспечение стабильности функциональных свойств ТЗИМ (тепло- и звукоизоляции) при минимальной массе в условиях экстремальных эксплуатационных факторов авиации.

Оборудование для производства авиационных ТЗИМ на основе стеклянных и минеральных волокон эволюционирует для удовлетворения растущих требований к сложным ТЗИМ. На сегодняшний день можно выделить три основных метода производства, определяющих тип оборудования: расплавный, влажный и сухой. Ключевыми тенденциями в развитии оборудования являются: автоматизация производства, снижение стоимости технологического процесса, снижение вредных выбросов при производстве.

Также следует отметить, что современное оборудование движется от узкоспециализированных линий для массового производства стандартных материалов по расплавному методу к гибким, автоматизированным и экологичным комплексам, ориентированным на аэродинамическое формование. Это позволяет эффективно реализовывать инновационные конструкции ТЗИМ (градиентные, гибридные, многофункциональные), отвечающие жестким требованиям авиации по массе, эффективности и стабильности свойств.

**Вторая глава** посвящена описанию исходных компонентов, из которых были изготовлены образцы волокнистых материалов. Также во второй главе приведено описание следующих методик исследования (испытания) исходных компонентов и образцов волокнистых материалов: сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ, газовая хромато-масс-спектрометрия и пиролитическая газовая хромато-масс-спектрометрия; испытания по ГОСТ 17177-94 (определение плотности, определение влажности, определение сорбционной влажности, определение предела прочности при растяжении, определение упругости, определение гибкости), рентгеноструктурный анализ, оптическая микроскопия в поляризованном свете, измерение контактного угла смачивания смол методом сидячей капли, определение массовой доли нелетучего остатка при поликонденсации смол и определение массовой доли щелочи в смолах по ГОСТ 20907-2016, измерение коэффициента теплопроводности по ГОСТ 7076-99, измерение коэффициента звукопоглощения по ISO 10534-2:2023, определение потери массы теплозвукоизоляционных материалов после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С по ГОСТ 2678-94, испытания на распространение пламени в соответствии с НЛГ 25 приложение F часть VI, оценка коррозионной агрессивности теплозвукоизоляционных материалов методом ускоренных испытаний в условиях повышенной температуры и влажности (метод IV по ГОСТ 9.902-81).

**Третья глава** посвящена исследованию состава и свойств передового гибкого ТЗИМ низкой плотности марки Microlite AA blankets производства США.

Исследования микроструктуры ТЗИМ марки Microlite AA blankets методом сканирующей электронной микроскопии показали, что материал состоит из нескольких слоев, которые образованы из хаотично расположенных стеклянных волокон с диаметрами от 1 мкм до 5 мкм.

Исследования элементного состава ТЗИМ марки Microlite AA blankets, выявили наличие в материале следующих элементов: кремния, кислорода, натрия, магния, кальция, алюминия, углерода, калия, никеля. Также данные исследования показали равномерное распределение углерода по поверхности волокон в материале Microlite AA blankets, что свидетельствует о том, что используемое связующее является органическим, равномерно распределено по поверхности волокон, обладает высокой способностью к растеканию.

В дополнение к исследованию элементного анализа ТЗИМ марки Microlite AA blankets был проведен качественный анализ состава связующего методами газовой хромато-масс-спектрометрии и пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии. Проведенные исследования показали присутствие в составе образца бор-содержащих соединений, карбамид модифицированного фенолформальдегидного связующего, и сшитых или высокомолекулярных олигодиметилсилоксанов. По результатам исследований можно предположить присутствие в составе образца дополнительного аппарата на основе крахмала или других материалов, выделяющих при пиролизе воду и углекислый газ.

Кроме того, были исследованы следующие эксплуатационные свойства ТЗИМ марки Microlite AA blankets: плотность, упругость, гибкость, предел прочности при растяжении, влажность, сорбционная влажность в течение 30 суток, коэффициент теплопроводности, потеря массы при 70 °С и 168 ч выдержки. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследования эксплуатационных свойств ТЗИМ марки Microlite AA blankets (США).

<b>Свойство</b>	<b>Значение</b>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9,6 ± 0,96
Упругость, %	93,5 ± 1,5
Гибкость (наименьший радиус изгиба), мм	15
Предел прочности при растяжении, кПа	1,80 ± 0,06
Влажность, %	2,0 ± 0,3
Сорбционная влажность (при 22±5°С, φ=98%) за 30 сут., %	72,6 ± 6,4
Коэффициент теплопроводности при 100 °С, Вт/м·К	0,052 ± 0,002
Потеря массы при 70 °С и 168 ч выдержки, %	0,24 ± 0,02

Из таблицы 1 видно, что ТЗИМ марки Microlite AA blankets обладает низкой плотностью, высокими физико-механическими характеристиками, низким коэффициентом теплопроводности, низкой эмиссией легколетучих компонентов, удовлетворительной влажностью, но при этом высоким значением сорбционной влажности ( $72,6 \pm 6,4 \%$ ). Высокое значение сорбционной влажности, предположительно, связано с наличием дополнительного аппрета на основе крахмала.

**Четвертая глава** посвящена разработке оборудования для получения гибких волокнистых материалов низкой плотности.

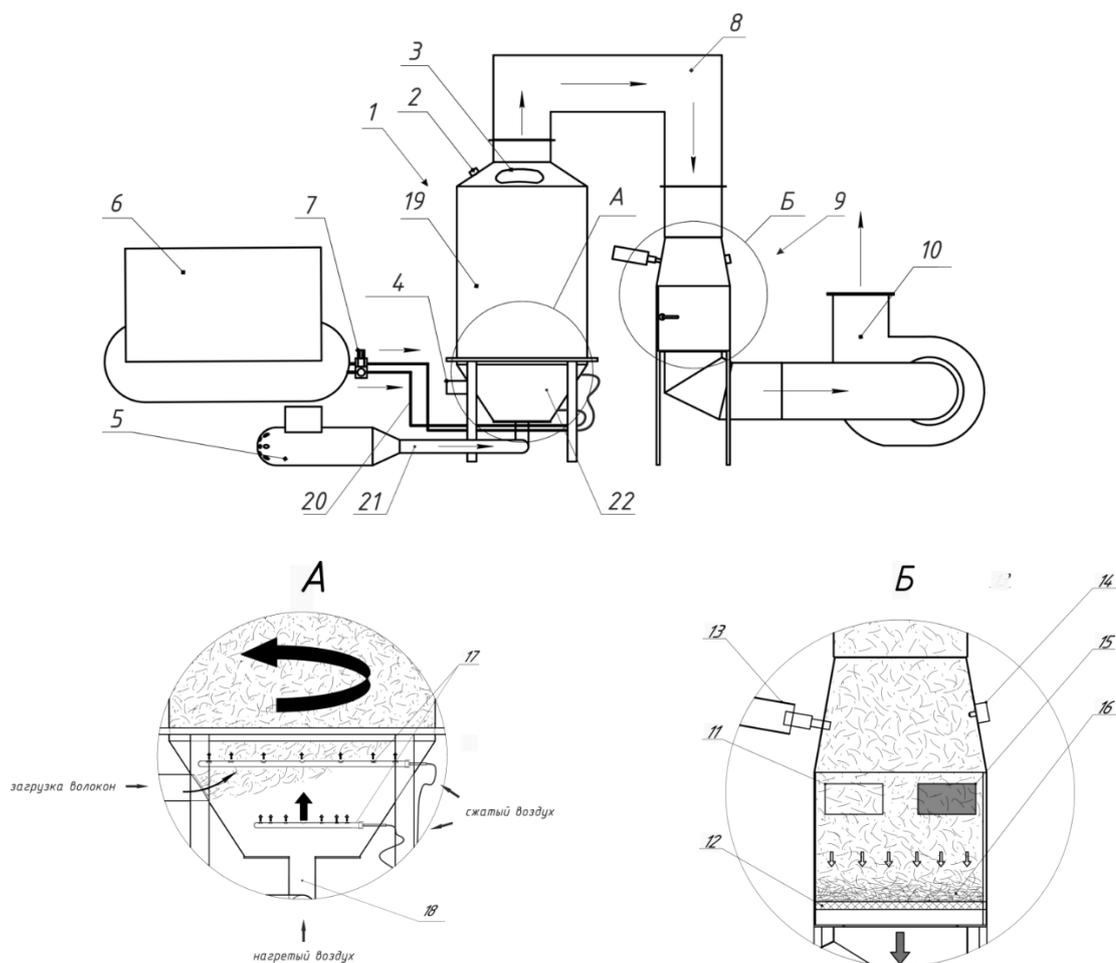


Рисунок 1 - Лабораторный макет установки для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон: 1 - камера диспергирования, 2 - подсветка камеры диспергирования, 3 - смотровое окно камеры диспергирования, 4 - приемный патрубок для загрузки исходных волокон, 5 - теплогенератор воздушного потока, 6 - компрессор для подачи сжатого воздуха, 7 - регулятор давления, 8 – воздуховод, 9 - камера волокноосаждения, 10 - вытяжной вентилятор, 11 - подсветка камеры волокноосаждения, 12 - воздухопроницаемая формующая поверхность (кассетный фильтр), 13 - форсунка для подачи связующего (опционально), 14 – термопара, 15 - смотровое окно камеры осаждения, 16 - нетканый теплоизоляционный материал, 17 - кольцевая воздушная насадка с инъекционными соплами, 18 – патрубок теплогенератора для ввода нагретого воздуха, 19 – отсек диспергирования, 20 – линия подвода сжатого воздуха, 21 – линия подвода нагретого воздуха, 22 – приемный отсек камеры диспергирования.

В результате проведенных исследований возникла необходимость в разработке и изготовлении экспериментальной установки для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон, которая позволяет получать ТЗИМ с низкой плотностью (от  $7 \text{ кг/м}^3$ ). На разработанную установку был получен патент RU 2817837 С1 от 22.04.2024 г. «Устройство для получения нетканого теплоизоляционного материала».

На рисунке 1 представлен эскиз экспериментальной установки для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон. На рисунке 1А изображено движение потоков воздуха и волокон внутри приёмного отсека камеры диспергирования. На рисунке 1Б представлена камера волокноосаждения.

Преимуществом данной установки является её компактность, простота и возможность получения образцов широкой номенклатуры, так как в качестве исходного сырья могут быть использованы волокна различных видов и различные связующие. Это дает возможность использовать устройство для получения различных видов теплоизоляционных материалов в зависимости от требований заказчика, а также в качестве лабораторной установки для сравнения свойств получаемых материалов. Например, при последовательной загрузке различных видов волокон, таких как стеклянные, минеральные, органические, растительные, может быть получен слоистый материал, а при загрузке смеси различных волокон может быть получен комбинированный тип ТЗИМ.

Еще одним преимуществом данной установки является возможность производства ТЗИМ на любой площадке без привязки к производству волокон.

**Пятая глава** посвящена разработке состава и технологии изготовления связующего для скрепления стеклянных волокон в ТЗИМ.

В результате исследования процессов отверждения смол марок Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024 определено, что режим их отверждения должен состоять из двух этапов: 1 этап – выдержка при температуре  $95-100 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 4 часов для всех смол; 2 этап – выдержка при температуре  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение двух часов для смол Фенотам Н210М и КМФ-С, выдержка при этой же температуре в течение 3 часов для смолы СФЖ-3024, и выдержка 8 часов при температуре  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  для смолы Фенотам Н210.

Проведенные испытания смол на влажность показали, что наибольшее значение влажности  $3,6 \%$  имеют образцы смолы СФЖ-3024. Наименьшее значение влажности  $0,6 \%$  соответствует образцам отвержденной смолы Фенотам Н210М. Образцам отвержденных смол КМФ-С и Фенотам Н210 соответствует значение влажности  $1,9 \%$ .

Испытания на сорбционную влажность (влагопоглощение) показали, что наименьшим влагопоглощением обладает смола Фенотам Н210М  $6,5 \%$  и  $15,4 \%$  при

экспозиции образцов в течение 24 ч и 72 ч соответственно. Смола КМФ-С также обладает довольно низкими значениями влагопоглощения 8,5 % и 21,7 % при экспозиции образцов в течение 24 ч и 72 ч соответственно. Наибольшими значениями влагопоглощения обладают смола марки СФЖ-3024 значения влагопоглощения 15,7 % и 36,4 % при выдержке образцов в течение 24 ч и 72 ч соответственно и смола марки Фенотам Н210 значения влагопоглощения 21,1 % и 40,5 % при выдержке образцов в течение 24 ч и 72 ч соответственно.

Также были проведены исследования образцов отвержденных смол Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С, СФЖ-3024 методами оптической микроскопии в поляризованном свете (рисунок 2) и рентгеновской дифракции (рисунок 3).



Рисунок 2 – Фотографии смол (СФЖ-3024 (а), Фенотам Н210 (б), Фенотам Н210М (в), КМФ-С (г)), отвержденных при 90 °С в течение 6,5 ч

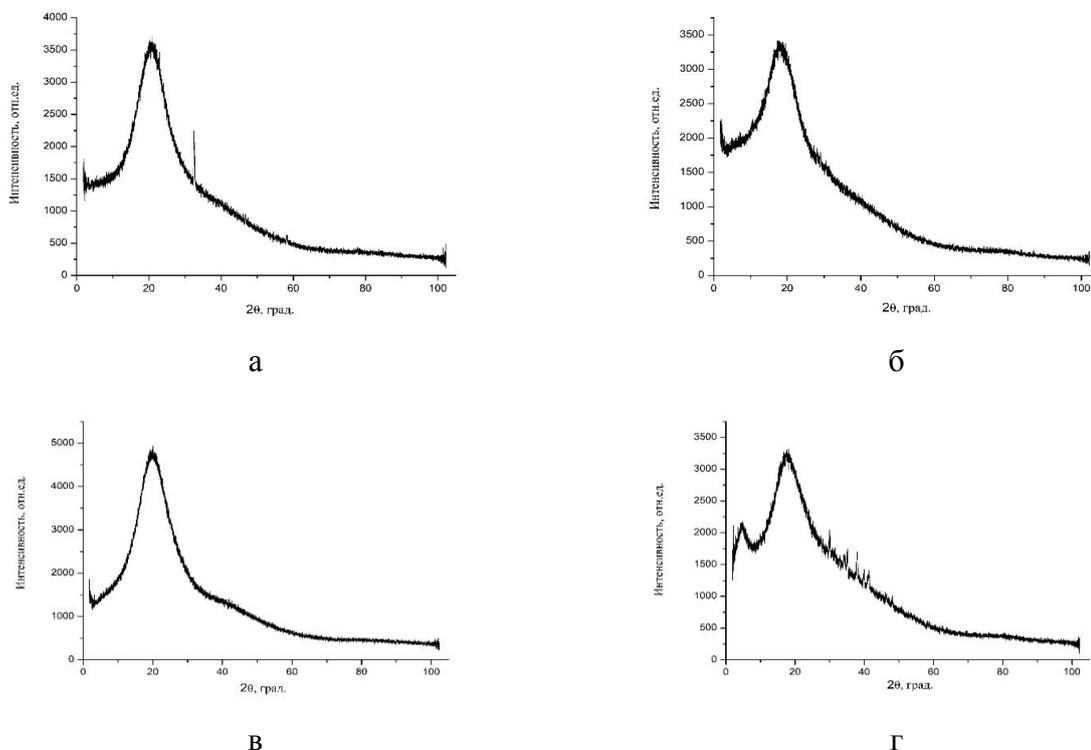


Рисунок 3 – Дифракционный спектр смол, отвержденных при 150 °С: Фенотам Н210М (а), Фенотам Н210 (б), КМФ-С (в), СФЖ-3024 (г)

Совместные результаты оптической микроскопии и рентгеноструктурного анализа показывают, что в процессе отверждения в смоле СФЖ-3024 происходит её частичная

кристаллизация, которая в совокупности с усадочными процессами, в итоге приводит к появлению внутренних напряжений и растрескиванию смолы. В смоле Фенотам Н210М в процессе отверждения образуются мелкие зерна кристаллической фазы, которые равномерно распределены в аморфной матрице, что с высокой вероятностью может приводить к улучшению механических свойств отвержденной смолы. По результатам оптической микроскопии в смолах КМФ-С и Фенотам Н210 не наблюдается оптической анизотропии, что также подтверждается наличием только аморфной фазы на дифрактограммах.

Совместные результаты оптической микроскопии и исследования контактного угла смачивания (рисунок 4) показывают, что смола Фенотам Н210М лучше смачивает поверхность стекла, чем смолы КМФ-С, Фенотам Н210 и СФЖ-3024.

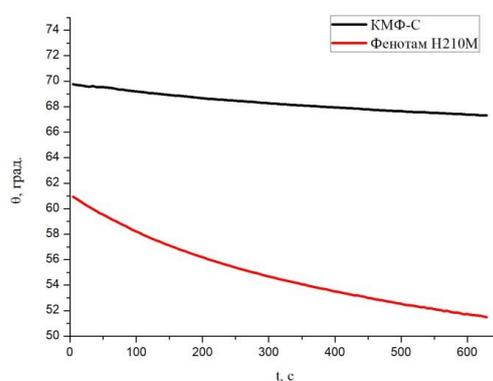


Рисунок 4 – Зависимости изменения контактного угла смачивания поверхности стекла от времени образцов жидких смол марок Фенотам Н210М и КМФ-С

Для установления влияния состава связующего на свойства ТЗИМ были исследованы плотность, гибкость, упругость, влажность, сорбционная влажность в течение 30 суток и предел прочности при растяжении образцов материалов, полученных с использованием следующих составов связующих (таблица 2):

- смолы марки Фенотам Н210М с добавлением полиэтилгидросилоксана (жидкость гидрофобизирующая 136-41) (состав 1);
- смолы марки Фенотам Н210М с добавлением в качестве гидрофобизатора полиметилфенилсилоксана марки ПФМС-4 (состав 2);
- смолы марки КМФ-С с добавлением полиэтилгидросилоксана (жидкость гидрофобизирующая 136-41) (состав 3);
- натриевого жидкого стекла с добавлением в качестве гидрофобизатора полиметилфенилсилоксана марки ПФМС-4 (состав 4);
- калиевого жидкого стекла с добавлением в качестве гидрофобизатора полиметилфенилсилоксана марки ПФМС-4 (состав 5).

В результате исследований плотности, физико-механических (гибкость, упругость и предел прочности при растяжении) и гидрофобных (влажность и сорбционная влажность) свойств образцов гибких волокнистых ТЗИМ низкой плотности, показано, что наилучшим комплексом свойств обладают образцы ТЗИМ, полученные с применением связующего на основе карбамидомодифицированной фенолформальдегидной смолы марки Фенотам Н210М с добавлением гидрофобизирующей жидкости марки 136-41 в качестве гидрофобизатора. Образцы, полученные из стекловолокна с применением связующего на основе смолы марки Фенотам Н210М с добавлением гидрофобизирующей жидкости марки 136-41, примерно на 20 % уступают по прочности материалу Microlite AA blankets, но при этом более чем в 3 раза превосходят его по показателям влажности и влагопоглощения, а по остальным свойствам не уступает импортному аналогу. Также можно сказать, что образцы ТЗИМ, полученные с применением связующего на основе смолы марки Фенотам Н210М с добавлением гидрофобизирующей жидкости марки 136-41, по плотности и физико-механическим свойствам не уступают отечественному аналогу – материалу АТМ-1, а по гидрофобным свойствам превосходят его.

Таблица 2 – Результаты исследования плотности, физико-механических и гидрофобных свойств образцов гибких волокнистых ТЗИМ низкой плотности, полученных с использованием различных составов связующих, и их сравнение с материалами марок Microlite AA blankets и АТМ-1.

Состав материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Упругость, %	Гибкость (наименьший радиус изгиба), мм	Предел прочности при растяжении, кПа	Влажность, %	Сорбционная влажность, %
Стекловолокно + состав 1	9,0 ± 0,1	92,8 ± 1,4	15	1,33 ± 0,07	0,5 ± 0,1	14,4 ± 5,6
Стекловолокно + состав 2	8,9 ± 0,1	90,0 ± 1,5	15	1,76 ± 0,09	0,7 ± 0,1	25,4 ± 6,8
Стекловолокно + состав 3	8,6 ± 0,2	75,8 ± 1,9	15	0,96 ± 0,06	0,5 ± 0,1	98,8 ± 7,4
Стекловолокно + состав 4	9,7 ± 0,5	67,2 ± 1,5	15	0,78 ± 0,09	2,5 ± 0,1	115,4 ± 7,5
Стекловолокно + состав 5	9,6 ± 0,6	70,8 ± 1,9	15	0,86 ± 0,06	2,3 ± 0,1	102,8 ± 7,8
Microlite AA blankets	9,6 ± 0,9	93,5 ± 1,5	15	1,80 ± 0,06	2,0 ± 0,3	72,6 ± 6,4
АТМ-1	9,8 ± 0,2	87,7 ± 1,9	15	–	2,0 ± 0,3	30,0 ± 5,3

По результатам проведенных исследований была разработана нормативная документация на связующее: технологическая инструкция ТИ 1.595-29-1693-2023 «Изготовление связующего марки ВС-74 для теплозвукоизоляционных материалов на основе стеклянных и керамических волокон» и технические условия ТУ 20.16.56-132-07545412-2023 «Связующее марки ВС-74 для теплозвукоизоляционных материалов на основе стеклянных и керамических волокон. Технические условия».

**Шестая глава** посвящена исследованию зависимости коэффициента теплопроводности от плотности волокнистых материалов (ВМ).

Измерение коэффициента теплопроводности образцов ВМ (ВМ на основе стекловолокна типа Е, полученные без применения связующего и ВМ на основе стекловолокна типа Е, полученные с применением связующего ВС-74) проводились стационарным методом плоского слоя (Heat Flow Meter – HFM) при трех значениях температуры (0 °С, 30 °С, 70 °С) и различных плотностях ВМ при разнице температур лицевых граней образцов 20 °С. Результаты измерений приведены на рисунке 5.

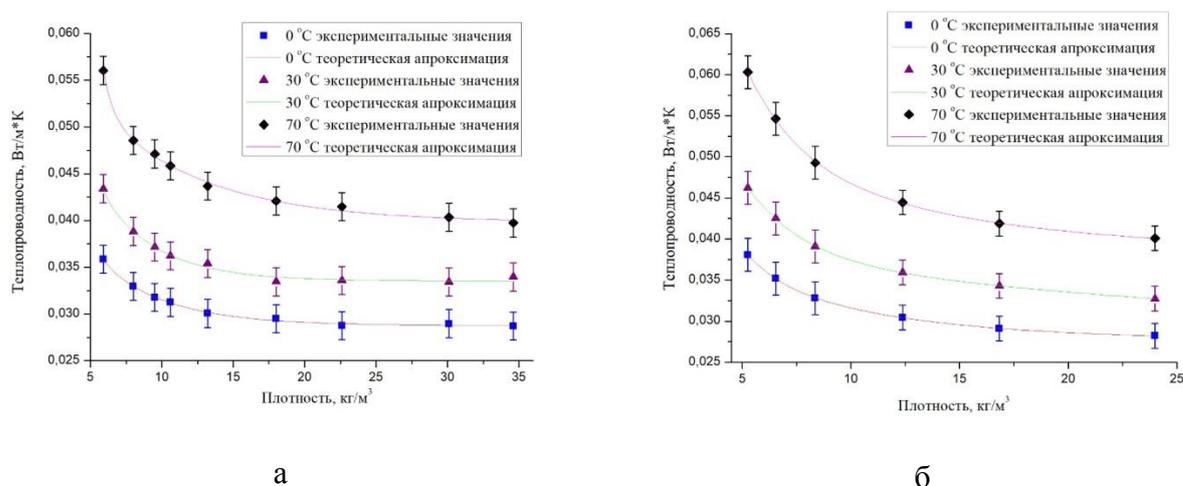


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента теплопроводности от плотности ВМ: на основе стекловолокна типа Е без связующего (а); на основе стекловолокна типа Е с применением связующего марки ВС-74 (б)

Теплопроводность волокнистых материалов в общем случае является суммой четырех компонент: теплопроводность волокнистого каркаса (твердого тела), теплопроводность газа (воздуха), конвективная и радиационная составляющие теплопроводности. Данное утверждение можно выразить следующей формулой.

$$\lambda(\rho, T) = \lambda_{\text{ТВ}}(T) + \lambda_{\text{ВОЗД}}(T) + \lambda_{\text{КОНВ}}(\rho, T) + \lambda_{\text{РАД}}(\rho, T)$$

Объемная доля твердой фазы в полученных волокнистых материалах с плотностью до 35 кг/м³ не превышает 2 %, а волокнистый каркас вносит незначительный вклад в общую теплопроводность волокнистых материалов. Наибольший вклад теплопроводности волокнистого каркаса установлен для материала со связующим при 70 °С и составляет примерно 0,007-0,009 Вт/м·К при плотностях 5-35 кг/м³, таким образом, разброс значений коэффициента теплопроводности сравним с погрешностью измерений. Поэтому можно считать, что теплопроводность волокнистого каркаса не зависит от плотности материала в диапазоне 5-35 кг/м³. Также стоит отметить, что длина свободного пробега молекул воздуха составляет около 70 нм, что значительно меньше, чем диаметр пор, который составляет более 15 мкм. В связи с этим теплопроводность воздуха также можно считать

не зависящей от плотности ВМ.

Дифференцируя уравнение по  $\rho$  получаем

$$\frac{d\lambda(\rho, T)}{d\rho} = \frac{d\lambda_{\text{конв}}(\rho, T)}{d\rho} + \frac{d\lambda_{\text{рад}}(\rho, T)}{d\rho} = f_{\text{конв}}(\rho, T) + f_{\text{рад}}(\rho, T)$$

где,  $f_{\text{конв}}(\rho, T)$  – вклад от подавления конвекции, а  $f_{\text{рад}}(\rho, T)$  – вклад от подавления радиационного переноса.

Рассмотрим пору размера  $L$ . Конвекция в материале подавляется, когда  $L < L_{\text{крит}}$ . При увеличении плотности средний размер пор в материале зависит от плотности как  $L(\rho) = L_0 \exp(-k_1 \rho)$ , а эффективность конвекции  $f_{\text{конв}}(\rho) \sim L(\rho) - L_{\text{крит}}$ . Поэтому для подавления конвекции можно записать как  $df_{\text{конв}}/d\rho = -k_1 f_{\text{конв}}$ .

Интенсивность излучения равна  $I(\rho) = I_0 \exp(-k_2 \rho)$  (закон Бугера-Ламберта), а эффективность радиационного переноса пропорциональна интенсивности  $f_{\text{рад}}(\rho) \sim I(\rho)$ . Таким образом, для подавления радиационного переноса также можно записать  $df_{\text{рад}}/d\rho = -k_2 f_{\text{рад}}$ . Поскольку  $d\lambda/d\rho = f_{\text{конв}} + f_{\text{рад}}$ , то получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\lambda}{d\rho} = f_{\text{конв}} + f_{\text{рад}} \\ \frac{df_{\text{конв}}}{d\rho} + k_1 f_{\text{конв}} = 0 \\ \frac{df_{\text{рад}}}{d\rho} + k_2 f_{\text{рад}} = 0 \end{cases}$$

Затем дважды последовательно дифференцируем первое уравнение системы для исключения  $f_{\text{конв}}$  и  $f_{\text{рад}}$ :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \lambda}{d\rho^2} &= \frac{df_{\text{конв}}}{d\rho} + \frac{df_{\text{рад}}}{d\rho} = -k_1 f_{\text{конв}} - k_2 f_{\text{рад}} \\ \frac{d^3 \lambda}{d\rho^3} &= -k_1 \frac{df_{\text{конв}}}{d\rho} - k_2 \frac{df_{\text{рад}}}{d\rho} = k_1^2 f_{\text{конв}} + k_2^2 f_{\text{рад}} \end{aligned}$$

Используя полученные выражения получаем:

$$\begin{aligned} &\frac{d^3 \lambda}{d\rho^3} + (k_1 + k_2) \frac{d^2 \lambda}{d\rho^2} + k_1 k_2 \frac{d\lambda}{d\rho} \\ &= (k_1^2 f_{\text{конв}} + k_2^2 f_{\text{рад}}) + (k_1 + k_2)(-k_1 f_{\text{конв}} - k_2 f_{\text{рад}}) + k_1 k_2 (f_{\text{конв}} + f_{\text{рад}}) \end{aligned}$$

Раскрывая скобки и приводя подобные члены в правой части уравнения получаем:

$$\frac{d^3 \lambda}{d\rho^3} + (k_1 + k_2) \frac{d^2 \lambda}{d\rho^2} + k_1 k_2 \frac{d\lambda}{d\rho} = 0$$

Физический смысл этого уравнения заключается в описании динамического баланса между конкурирующими механизмами теплопереноса, где члены с производными различных порядков отражают разные уровни влияния плотности на теплопроводность: первая производная характеризует непосредственную чувствительность

теплопроводности к изменению плотности, вторая производная описывает изменение этой чувствительности, третья производная отражает высшие порядки нелинейности системы. Коэффициенты  $k_1k_2$  и  $k_1 + k_2$  определяют, соответственно, синергетическое взаимодействие механизмов и суммарную эффективность их влияния.

Решением полученного дифференциального уравнения третьего порядка является функция:

$$\lambda(\rho) = \lambda_{\text{эфф}} - C_1(1 - e^{-k_1\rho}) - C_2(1 - e^{-k_2\rho})$$

где  $\lambda_{\text{эфф}}$  – эффективное значение теплопроводности при плотности, стремящейся к нулю,  $C_1$  и  $C_2$  – максимальные снижения теплопроводности за счет подавления конвекции и радиационного переноса соответственно,  $k_1$  и  $k_2$  – скорости подавления конвекции и радиационного переноса соответственно. Все коэффициенты могут быть определены из экспериментальных данных.

Аппроксимация экспериментальных данных полученной функцией методом наименьших квадратов показывает, что отклонения функции не превышают 2 % от экспериментальных значений, что показывает адекватность полученной модели. Данный результат свидетельствует о том, что при низких плотностях (примерно до 25 кг/м<sup>3</sup>) основной причиной увеличения теплопроводности являются конвекция и радиационный перенос. Также это подтверждается наличием быстро убывающего (соответствует подавлению конвекции) и медленно убывающего (соответствует подавлению радиационного переноса) экспоненциальных членов в аппроксимационных функциях.

Полученная модель также подтверждает, что при достижении плотности 9 кг/м<sup>3</sup> доля конвективной составляющей становится менее 4 % и за счет подавления конвекции коэффициент теплопроводности приобретает значения, удовлетворяющие требованиям современного авиастроения. Полученный результат полностью коррелирует с экспериментальным данным.

**Седьмая глава** посвящена разработке технологии изготовления гибкого волокнистого ТЗИМ низкой плотности на основе стекловолокна и исследованию его эксплуатационных свойств.

Результаты проведенных исследований по влиянию режимов нанесения и отверждения связующего ВС-74 на физико-механические и гидрофобные свойства ТЗИМ, а также на потерю массы ТЗИМ при температуре 70 °С в течение 168 ч, показывают, что наилучшими свойствами обладают образцы ТЗИМ, полученные при следующих условиях: объемный расход связующего – 20 мл на 1 г стекловолокна, температура нанесения

связующего на стекловолокно –  $20 \pm 5$  °С, температура отверждения 160 °С с выдержкой в течение 150 мин.

Показано, что образцы гибкого волокнистого ТЗИМ низкой плотности, полученные с применением связующего ВС-74 при комнатной температуре ( $20 \pm 5$  °С) с расходом связующего 20 мл на 1 г стекловолокна, примерно на 20 % уступают по прочности материалу Microlite AA blankets, но при этом более чем в 3 раза превосходят его по показателям влажности и влагопоглощения, а по остальным свойствам не уступает импортному аналогу. Также показано, что данные образцы по своим характеристикам не уступают ТЗИМ марки АТМ-1, а по гидрофобным свойствам превосходят его.

Установлено, что образцы ТЗИМ, полученные при температуре отверждения связующего 160 °С с выдержкой в течение 150 мин, по потере массы при температуре 70 °С в течение 168 ч не уступают импортному аналогу – материалу Microlite AA blankets, а по значению сорбционной влажности превосходят его примерно в 3 раза.

На основании полученных результатов была разработана нормативная документация на гибкий волокнистый ТЗИМ на основе стекловолокна: ТИ 1.595-29-1797-2024 «Изготовление гибкого теплозвукоизоляционного волокнистого материала марки ВТИ-29 на основе стекловолокна» и ТУ 23.99.19-204-07545412-2024 «Гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал марки ВТИ-29 на основе стекловолокна». А также подана заявка на изобретение № 2024130034 от 04.10.2024 г. на гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал. Разработанный ТЗИМ марки ВТИ-29 включен в спецификацию перспективного воздушного судна.



Рисунок 6 – Принципиальная схема получения гибкого волокнистого ТЗИМ марки ВТИ-29 на основе стекловолокна

Исходными компонентами для гибкого волокнистого ТЗИМ марки ВТИ-29 являются стекловолокно типа Е и связующее марки ВС-74. ТЗИМ марки ВТИ-29

получают на экспериментальной установке для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон путем послойного аэрационного осаждения стекловолокна и его пропитки связующим марки ВС-74 с последующим отверждением связующего при температуре 160 °С. Принципиальная схема получения ТЗИМ марки ВТИ-29 представлена на рисунке 6.

В рамках представленной работы были определены следующие эксплуатационные характеристики образцов ТЗИМ марки ВТИ-29, изготовленных в соответствии с разработанной технологической инструкцией: плотность в соответствии с ГОСТ 17177-94; коэффициент теплопроводности в соответствии с ГОСТ 7076-99; потери массы после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С в соответствии с ГОСТ 2678-94; коэффициент звукопоглощения в соответствии с ISO 10534-2; сорбционная влажность после выдержки в течение 30 суток при температуре (22 ± 5) °С и относительной влажности воздуха 98% в соответствии с ГОСТ 17177-94; время остаточного горения в соответствии с НЛГ-25 приложение F часть VI; длина прогорания в соответствии с НЛГ-25 приложение F часть VI. Результаты исследования основных эксплуатационных характеристик разработанного ТЗИМ марки ВТИ-29 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные эксплуатационные характеристики образцов ТЗИМ низкой плотности марки ВТИ-29 и их сравнение с материалами марок Microlite AA blankets и АТМ-1.

Характеристики	Материал ВТИ-29	Зарубежный аналог – ТЗИМ Microlite AA blankets фирмы Johns Manville International Inc. (США)	Отечественный аналог – ТЗИМ материал АТМ-1
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9,0 ± 0,6	9,60 ± 0,96	9,8 ± 0,2
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,050 ± 0,002 (при 100°С)	0,051 ± 0,002 (при 93°С)	0,047 ± 0,002 (при 100°С)
Потеря массы при 70 °С и 168 ч выдержки, %	0,21 ± 0,03	0,24 ± 0,02	-
Коэффициент звукопоглощения	0,10-1,00 (в диапазоне частот 125-1600 Гц)*	0,35 (при 250 Гц), 0,75 (при 500 Гц), 0,87 (при 1000 Гц)**	0,05-1,0 (в диапазоне частот 125-1600 Гц)***
Сорбционная влажность (при 22±5°С, φ=98%) за 30 сут., %	22,2 ± 4,2	72,6 ± 6,4	30,0 ± 5,3
Длина прогорания, мм	15-35	менее 51	менее 51
Время остаточного горения, с	0	менее 3	менее 3

\* - толщина образца 100 мм; \*\* - толщина образца 90 мм; \*\*\* - толщина образца 50 мм

Из таблицы 3 видно, что в среднем плотность теплозвукоизоляционного материала ВТИ-29 ( $9,0 \text{ кг/м}^3$ ) меньше, чем у зарубежного аналога – ТЗИМ марки Microlite AA blankets ( $9,6 \text{ кг/м}^3$ ) и отечественного аналога – ТЗИМ марки АТМ-1 ( $9,8 \text{ кг/м}^3$ ), что обеспечивается равномерностью нанесения связующего и хаотичным расположением волокон в объеме материала ВТИ-29.

Коэффициент теплопроводности ТЗИМ марки ВТИ-29 составляет  $0,050 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  (при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и находится на одном уровне с материалами марок Microlite AA blankets и АТМ-1.

Также результаты исследований показывают, что материал марки ВТИ-29 обладает наименьшей сорбционной влажностью ( $22,2 \%$ ) по сравнению с импортным и отечественным аналогами. Следует отметить, что ТЗИМ марки ВТИ-29 более чем в 3 раза превосходит по этому показателю материал марки Microlite AA blankets. А по результатам огневых испытаний можно сделать вывод, что разработанный ТЗИМ марки ВТИ-29 полностью соответствует требованиям НЛГ 25 приложения F части VI и является пожаробезопасным.

По значению коэффициента звукопоглощения при частотах до  $800 \text{ Гц}$  материал ВТИ-29 находится примерно на одном уровне с материалами марок Microlite AA blankets и АТМ-1, а при частотах, превышающих  $800 \text{ Гц}$ , превосходит их (рисунок 7).

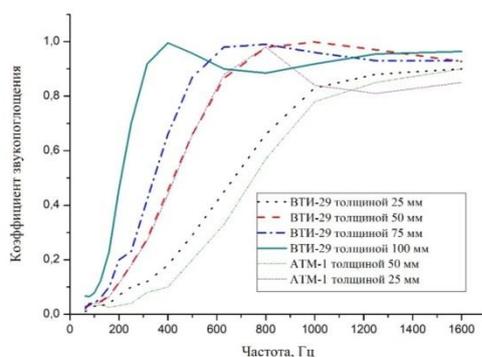


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты в теплозвукоизоляционных материалах марок ВТИ-29 и АТМ-1 при разных толщинах материалов

В результате испытаний по коррозионному воздействию на цветные металлы установлено, что контакт с материалом ВТИ-29 при температуре испытаний  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  не усилил коррозию алюминиевого сплава Д16Т (неплакированного), не вызвал коррозию алюминиевого сплава Д16АТ (плакированного), алюминиевого сплава Д16АТ, анодированного в стандартном электролите с последующим хроматным наполнением (Ан.Окс.нхр), и титанового сплава ОТ4-1 по сравнению с контрольными образцами.

В результате испытаний по коррозионному воздействию на черные металлы установлено, что контакт с материалом ВТИ-29 при температуре испытаний 60 °С не усилил коррозию конструкционной стали 30ХГСА, не вызвал коррозию нержавеющей стали 12Х18Н10Т, химически пассивированная (Хим.Пас), и конструкционной стали 30ХГСА с кадмиевым покрытием по сравнению с контрольными образцами.

### **Выводы**

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон. На разработанную установку получен патент RU 2817837 С1 от 22.04.2024 г. «Устройство для получения нетканого теплоизоляционного материала».

2. Установлена взаимосвязь между структурой и свойствами смол марок Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С и СФЖ-3024. Показано, что наилучшим комплексом свойств (мелкозернистая структура, способствующая упрочнению; низкие влажность (0,6 %) и сорбционная влажность (6,5 % и 15,4 % при выдержке в течение 24 ч и 72 ч соответственно), повышенные адгезия к стеклу и смачиваемость поверхности стекла по сравнению со смолами Фенотам Н210, КМФ-С и СФЖ-3024) обладает карбонидомодифицированная смола Фенотам Н210М.

3. Установлены зависимости изменения физико-механических и гидрофобных свойств гибкого волокнистого ТЗИМ низкой плотности от состава связующего. Показано, что наилучшим комплексом свойств обладают образцы ТЗИМ, полученные с применением связующего на основе карбонидомодифицированной ФФ смолы марки Фенотам Н210М с добавлением полиэтилгидросилоксана (гидрофобизирующей жидкости марки 136-41) в качестве гидрофобизатора: плотность –  $9,0 \pm 0,1$  кг/м<sup>3</sup>, гибкость – 15 мм, упругость –  $92,8 \pm 1,4$  %, влажность –  $0,5 \pm 0,1$  %, сорбционная влажность в течение 30 суток –  $14,4 \pm 5,6$  %, предел прочности при растяжении –  $1,33 \pm 0,07$  кПа.

4. Разработаны состав и технология изготовления связующего, обеспечивающего высокую гибкость, низкую плотность, пожаробезопасные и гидрофобные свойства. Выпущены технологическая инструкция ТИ 1.595-29-1693-2023 «Изготовление связующего марки ВС-74 для теплозвукоизоляционных материалов на основе стеклянных и керамических волокон» и технические условия ТУ 20.16.56-132-07545412-2023 «Связующее марки ВС-74 для теплозвукоизоляционных материалов на основе стеклянных и керамических волокон. Технические условия».

5. Построена физически обоснованная модель, описывающая зависимость коэффициента теплопроводности от плотности ВМ в области низких плотностей от 5 кг/м<sup>3</sup> до 35 кг/м<sup>3</sup>. Расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет не более

2 %. Установлено, что основными причинами увеличения коэффициента теплопроводности при низких плотностях волокнистых материалов (до 25 кг/м<sup>3</sup>) в диапазоне температур 0-70 °С являются конвекция и радиационный перенос тепла. Определено значение плотности равное 9 кг/м<sup>3</sup>, ниже которого происходит значительное ухудшение теплозащитных свойств волокнистых материалов.

6. Разработаны состав и технология изготовления гибкого волокнистого ТЗИМ низкой плотности. Выпущена нормативная документация на гибкий волокнистый ТЗИМ на основе стекловолокна: ТИ 1.595-29-1797-2024 «Изготовление гибкого теплозвукоизоляционного волокнистого материала марки ВТИ-29 на основе стекловолокна» и ТУ 23.99.19-204-07545412-2024 «Гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал марки ВТИ-29 на основе стекловолокна». Составлена заявка на изобретение № 2024130034 от 04.10.2024 г. на гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал. Разработанный ТЗИМ марки ВТИ-29 включен в спецификацию перспективного воздушного судна.

7. Показано, что ТЗИМ марки ВТИ-29 по потере массы при 70 °С и 168 ч выдержки, плотности, теплопроводности, и пожаробезопасным свойствам не уступает материалам Microlite AA blankets и АТМ-1. А по сорбционной влажности и коэффициенту звукопоглощения при частотах, превышающих 800 Гц, превосходит их. Также ТЗИМ марки ВТИ-29 не вызывает коррозию сплавов цветных и черных металлов.

*Список основных трудов по теме диссертации опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:*

1. Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г., Максимов В.Г.. Исследование влияния химического состава смол марок Фенотам Н210, Фенотам Н210М, КМФ-С, СФЖ-3024 на их физико-химические свойства // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-84-91.

2. Антипов В.В., Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г. Исследование влияния состава связующего на плотность, физико-механические и гидрофобные свойства теплозвукоизоляционного материала // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2024. № 9 (139). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.08.2025.). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-25-32.

3. Беспалов А.С., Салимов И.Э., Юдин А.В.. Придание высоких гидрофобных свойств высокопористому керамическому материалу низкоконтрированными растворами фторпарафина в среде сверхкритического диоксида углерода // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1. С. 39-48. DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-39-48.

4. Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г., Шаркалов А.А. Исследование эксплуатационных свойств теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2025. № 6 (148). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.08.2025.). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-64-72.

5. Саврицкий А.С., Мараховский П.С., Салимов И.Э., Бабашов В.Г. Исследование зависимости теплопроводности от плотности низкоплотного теплозвукоизоляционного материала на основе стеклянных волокон // Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн. 2025. № 5. Ст. 13. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 05.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-149-160.

*Публикации, индексируемые базами Web of science и Scopus:*

1. Варрик Н.М., Салимов И.Э., Бабашов В.Г., Шавнев А.А. Связующие для материалов на основе стеклянных и минеральных волокон (обзор) // Новые огнеупоры. 2023. № 8. С. 60-65. DOI: 10.17073/1683-4518-2023-8-60-65.

*Патент Российской Федерации:*

1. Бабашов В.Г., Бондаренко А.С., Гурьев Э.П., Куянов Р.А., Салимов И.Э. Устройство для получения нетканого теплоизоляционного материала // пат. 2817837 РФ, патентообладатель НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. № 2023119229; заявл. 20.07.2023; опубл. 22.04.2024, Бюл. № 12. С. 13.

*Заявка на изобретение:*

1. Бабашов В.Г., Бондаренко А.С., Беспалов А.С., Шаркалов А.А., Салимов И.Э. Гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал // патентообладатель НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. № 2024130034; заявл. 04.10.2024. С. 11.

*Иные публикации по теме диссертации:*

1. Салимов И.Э., Бабашов В.Г., Беспалов А.С. Исследование влияния состава теплозвукоизоляционных материалов на их физико-механические и гидрофобные свойства // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2025 (ICMSSTE 2025): Материалы международной научно-практической конференции. Ялта. 2025. С. 47-50. EDN HOUXFM.

2. Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г., Шаркалов А.А. Современный волокнистый теплозвукоизоляционный материал для гражданской авиации // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Федеральная территория «Сириус». Россия. Сборник тезисов докладов в 7 томах. 2024. Том 1. С. 545. ISBN 978-5-00202-665-4.

**«Гибкий теплозвукоизоляционный материал низкой плотности на основе стекловолокна»**

Подписано в печать

Формат бумаги 60×90/16. Печ. Л 1,00. Тираж \_\_\_\_ экз.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ  
105005, г. Москва, ул. Радио,17