

На правах рукописи
УДК 662.998.3:666.189

Баданина Юлия Владимировна

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫХ
ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НАСОСНО-
КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ИЗ КОРОТКИХ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН НА
ОСНОВЕ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва, 2017

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

Научный руководитель:

Комков Михаил Андреевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Плихунов Виталий Валентинович
доктор технических наук, профессор
ОАО «Национальный институт
авиационных технологий»

Бабашов Владимир Георгиевич
кандидат технических наук
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт авиационных материалов» ГНЦ РФ

Ведущая организация:

ЗАО «Завод Экспериментального
Машиностроения Ракетно-Космической
Корпорации «Энергия» им. С.П. Королева»

Защита состоится «___» _____ 2017г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

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

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 2017г.

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



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из технически значимых и энергосберегающих задач развития машиностроения является создание теплоизолирующих конструкций из доступных, дешевых и экологически чистых базальтовых супертонких волокон (БСТВ), работоспособных длительное время при температурах от -260°C до $700...750^{\circ}\text{C}$. Область применения таких конструкций - внутренняя теплоизоляция элементов машин, медицинской техники, бытовых приборов, межтрубная теплоизоляция изделий, работающих при высоких температурах или связанных с транспортировкой криогенных топлив.

Основным недостатком рулонных теплоизоляционных материалов (ТИМ) из базальтовых штапельных волокон, изготовленных аэродинамическим методом и широко применяемых в строительстве, является высокий коэффициент кондуктивной теплопроводности, который в 1,75 раза выше, по сравнению с коэффициентом, полученным расчетным путем для БСТВ и спокойного воздуха. Другим важным недостатком указанных ТИМ является невозможность создания теплоизолирующих конструкций сложной пространственно-геометрической формы.

Из анализа литературных источников следует, что сложно профильные изделия из БСТВ могут быть получены только методом жидкостного осаждения в пресс-форму коротких базальтовых волокон из пульпы или гидромассы. Это показывает и практика изготовления из коротких кварцевых волокон теплозащитных плиток ВКС по программе «Буран» (ТЗМК-10, ФГУП НПП «Технология») или «Шаттл» (Li-900, фирма «Boeing»).

Перспективным направлением в настоящее время является создание многослойных насосно-компрессорных труб (НКТ), включающих межтрубную теплоизоляцию из коротких БСТВ и защитно-силовую стеклопластиковую оболочку. Такое конструктивно-технологическое решение обеспечивает снижение погонной массы композитных НКТ в 2...2,5 раза по сравнению со стальными вакуумно-теплоизолированными НКТ - «термокейсами» и доставку теплоносителя (перегретого пара) с высокими начальными параметрами (температура $420...450^{\circ}\text{C}$, давление 35 МПа) в нефтяные пласты с тяжелой высоковязкой нефтью, которые залегают на глубине 3000...3500 м (с возможностью увеличения до 4000...4500 м).

С другой стороны, по критерию «себестоимость-теплопроводность» теплоизоляция из коротких базальтовых волокон в несколько раз дешевле теплоизоляции из кварцевых волокон ТЗМК-10, используемой в «термокейсах» для защиты от теплового излучения в межтрубном пространстве НКТ.

Таким образом, проблема, связанная с созданием высокопористых сложно профильных изделий (втулок, манжет, колец, полуцилиндров или «скорлуп») из коротких базальтовых волокон с коэффициентом теплопроводности в 1,5 раза меньшим по сравнению с ТЗМК-10 является

актуальной, имеет важное научно-техническое и практическое значение, способствует снижению массы и себестоимости теплоизолирующих конструкций.

Цель работы. Повышение технико-экономических показателей теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон на основе обеспечения минимального коэффициента теплопроводности и совершенствования фильтрационной технологии их изготовления.

Для решения поставленной цели были сформулированы **задачи исследования**.

1. Совершенствовать 2-х стадию технологию изготовления из коротких базальтовых волокон и минеральной связки Al_2O_3 сложно профильных конструкций, включающую получение полуфабриката и формообразование из него методом жидкостной фильтрации высокопористых теплоизолирующих изделий.

2. Разработать математическую модель процесса формообразования теплоизолирующих конструкций методом фильтрационного осаждения коротких волокон из пульпы на основании закона А. Дарси.

3. Провести экспериментальные исследования по определению коэффициента теплопроводности на цилиндрических и плоских образцах и описать стационарный и нестационарный режимы изменения температуры в высокопористом материале на основе коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса тепла в межпоровом пространстве.

4. Разработать методику расчета теплофизических характеристик, толщины теплоизоляционного покрытия в виде цилиндрических скорлуп, провести испытания опытных образцов НКТ нового поколения и оценить результаты экспериментальных и теоретических исследований.

Научная новизна состоит:

- в разработке математической модели процесса формообразования высокопористых теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон и связки Al_2O_3 на основе метода фильтрационного осаждения;
- в получении уравнений теплопроводности, описывающих стационарный и нестационарный режимы изменения температуры в высокопористом теплоизоляционном материале на основе коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса тепла в межпоровом пространстве.

Практическая значимость работы заключается:

- в совершенствовании 2-х стадийной технологии, включающей: измельчение и очистку волокон, подготовку полуфабриката; изготовление пульпы из коротких базальтовых волокон и связки Al_2O_3 , формообразование высокопористых теплоизолирующих конструкций сложной формы методом фильтрационного осаждения;
- разработке методического обеспечения, позволяющего производить расчет коэффициента теплопроводности и толщины стенки теплоизоляции из коротких базальтовых волокон, определяющего выход на стационарный

режим нагрева изделия и создающего основу для выбора технологических решений по созданию теплоизолирующих конструкций.

Практическая ценность работы доказана путем успешной промышленной апробации результатов работы при создании опытных образцов теплоизолирующего покрытия НКТ нового поколения диаметром 60 мм в виде цилиндрических скорлуп с толщиной стенки 25 мм и средним коэффициентом теплопроводности базальтовой теплоизоляции в диапазоне температур 63...420 °С, равным 0,0413 Вт/(м К).

Методы исследования. Использовались основные положения технологии машиностроения, проектирования технологических процессов, теоретические основы фильтрации жидкости через пористые среды, основы кондуктивного и лучистого переноса тепла через высокопористые волокнистые материалы. Достоверность полученных результатов подтверждается применением известных и апробированных методов экспериментального исследования структурных, механических и теплофизических характеристик теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон на аттестованном оборудовании и сертифицированных программно-математических пакетах.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель процесса фильтрационного осаждения коротких базальтовых волокон из пульпы со связкой из Al_2O_3 , определяющая технологические, структурные и механические характеристики материала формуемых сложно профильных теплоизолирующих конструкций.

2. Научно обоснованный водородный показатель для приготовления пульпы из коротких базальтовых волокон $pH = 6,5...8,5$, обеспечивающий введение расчетного количества (5 % по массе) окиси алюминия в теплоизоляционный материал, при сохранении достаточно высокой скорости осаждения волокон из пульпы с вязкостью $5 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

3. Новые результаты теоретических и экспериментальных исследований, описывающие стационарный и нестационарный режимы изменения температуры в высокопористом ТИМ с учетом лучистого переноса тепла и направленные на определение теплофизических характеристик теплоизолирующих конструкций.

4. Методические рекомендации по определению коэффициента теплопроводности и выбору толщины стенки цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон и связки Al_2O_3 по требуемому перепаду температур на опытных образцах насосно-компрессорных труб нового поколения.

Апробация и внедрение результатов работы. Основные положения диссертации докладывались на Всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2012, 2014 г.г.), на академических чтениях по космонавтике «Актуальные проблемы Российской космонавтики» (г. Москва, 2012-2014, 2016 г.г.), на 4-ой международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и

прикладные проблемы», на XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (г. Королев, РКК «Энергия», 2015 г.). Основные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». Получены дипломы на Всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» за лучшую научную работу по направлению «Специальное машиностроение» (г. Москва, 2012 г.), диплом за «Успешный поиск новых решений» и диплом I степени в номинации «Лучшая работа в области энергетики» Всероссийской молодежной научно-инженерной выставки «Политехника» (г. Москва, 2014 г.), диплом 2 степени за «Лучший проект», представленный на конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана с международным участием (г. Москва, 2014 г.).

Акты о внедрении получены от РКК «Энергия» им. С.П. Королёва и ЗАО «Компомаш ТЭК».

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 12 научных работах, из которых 5 статей - в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Общий объем публикаций 1,76 п.л. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и общих выводов, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 165 страницах, в том числе 139 страниц текста, 74 иллюстрации, 13 таблиц, список литературы из 100 наименований и приложения на 25 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает сущность исследуемой проблемы, ее актуальность и возможные пути решения, сформулированы цель и основные научные положения, выносимые автором на защиту, дана характеристика научной новизны и практической ценности результатов работы.

В первой главе проведен обзор и анализ литературных источников и практических разработок высокопористых теплоизоляционных материалов и изделий из коротких базальтовых и кварцевых волокон. Главными критериями в выборе волокнистых ТИМ являются тип и вид используемых в композиции волокон, технологический способ формирования композиционного материала и формообразования из него изделий.

В результате анализа опубликованных статей, монографий по тематике, связанной с получением и использованием высокопористой теплоизоляции, особый интерес к изучению представляют материалы из базальтовых волокон. Они обладают уникальными свойствами: высоким уровнем физико-механических и химических свойств, повышенной стойкостью в агрессивных средах и к вибрациям, долговечностью, стабильностью свойств при длительной эксплуатации в различных условиях, хорошей адгезией к различным связующим. Подробное описание применения базальтовых волокнистых материалов в качестве теплоизоляционных и теплозащитных

покрытий можно найти в работах М.С. Аслановой, М.Ф. Маховой, Д.Д. Джигириса, А.Г. Новицкого, В.А. Дубровского, Н.В. Большаковой, С.Т. Петросяна. Однако основное внимание ученые уделяют вопросам технологии получения базальтовых штапельных или непрерывных волокон, экспериментальным исследованиям их характеристик и описанию области применения высокопористых волокнистых базальтовых материалов для внешней теплоизоляции и защиты изделий.

Созданию и изучению физико-механических характеристик ТИМ на основе базальтового волокна в виде плиток посвящено диссертационное исследование М.П. Тимофеева. Однако в его работе не определены коэффициенты теплопроводности материалов, не затронуты вопросы формообразования из коротких базальтовых волокон фасонных теплоизоляционных изделий и их области применения, поэтому необходимо дальнейшее проведение исследований и разработок в области создания конструкций сложной формы и специального назначения.

Следует отметить, что существенный вклад в создание теплоизоляции внесли В.Н. Грибков, В.Г. Бабашов, Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич, В.П. Тимошенко, Н.М. Иванов, Дж. Мартин и др. Их исследования посвящены применению термостойких волокнистых материалов из коротких кварцевых волокон, в том числе и нитевидных кристаллов, получаемых методом жидкостной фильтрации. Наиболее известным примером теплозащиты с применением разнообразных плиток многократного применения являются сложные теплозащитные системы многоразовых космических кораблей «Спейс-Шаттл» (США) и «Буран» (СССР). В рамках программы «БУРАН» специалистами ФГУП «ВИАМ», ФГУП НПП «Технология» и НПО «Молния» разработаны и внедрены в производство волокнистые материалы ТЗМК-10 и ТЗМК-25 в виде плиток на основе сверхчистого аморфного кварцевого волокна и связки из оксида кремния, получаемых из гидромассы фильтрационной технологией.

Анализ способов изготовления теплоизоляционных материалов с учетом современных требований к теплоизоляции элементов машин, медицинской техники, бытовых приборов, трубопроводов, работающих при высоких температурах или связанных с транспортировкой криогенных топлив в машиностроении и авиационно-космической технике, показал преимущества применения фильтрационной технологии формообразования изделий. Таким образом, основным способом образования теплоизоляционных конструкций из коротких базальтовых волокон можно назвать метод фильтрационного осаждения.

В связи с этим были сформулированы задачи исследования представленной диссертационной работы.

Вторая глава посвящена вопросам совершенствования и исследования двух стадийной технологии формования высокопористых изделий из коротких базальтовых волокон и минеральной связки методом жидкостной фильтрации.

Аналитический обзор литературных источников и опубликованных работ по ТИМ из БСТВ позволил сделать вывод и провести расчет значения коэффициента кондуктивной теплопроводности высокопористого (94 %) ТИМ, в интервале температур 60...420 °С, который имеет существенно ($\approx$ в 1,75 раза) меньший коэффициент теплопроводности по сравнению с аналогичным показателем для прошивных рулонов и матов, изготовленных в соответствии с данными ГОСТ 21880-94, ТУ 5769-004-02500345-2009 (МПБОР); ТУ 5769-002-0164840370-2013 («MINOL») (см. Рис. 1).

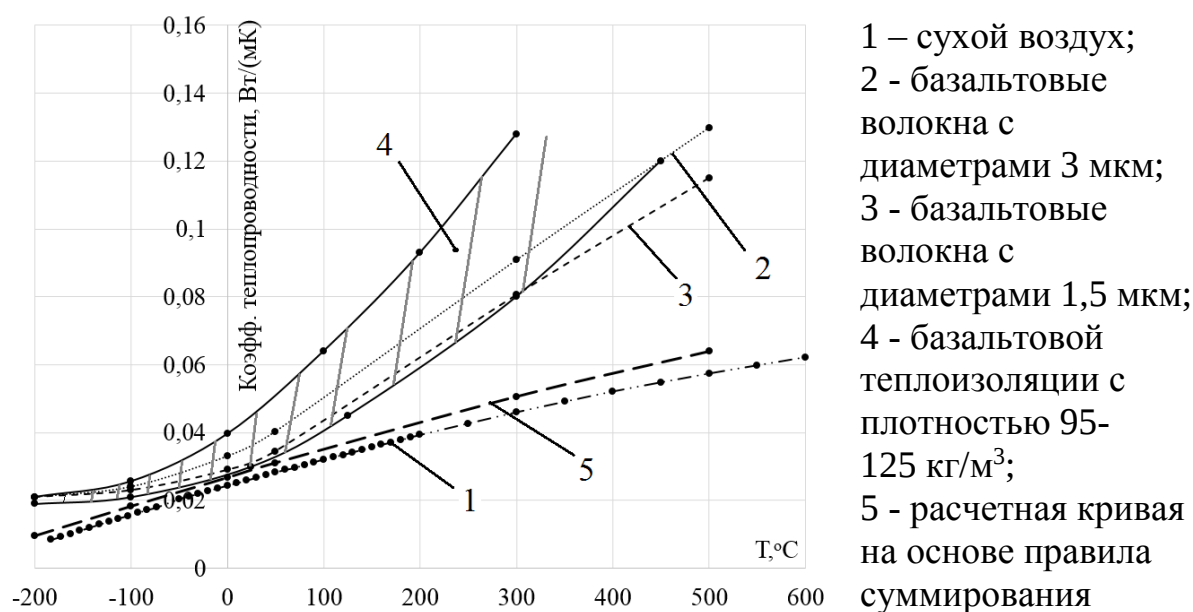


Рис. 1. Зависимость коэффициента кондуктивной теплопроводности от температуры

В связи с этим технология формования высокопористых изделий должна включать в себя две стадии:

- получение полуфабриката из коротких базальтовых волокон путем жидкостного измельчения штапельных волокон и удаления неволокнистых включений для обеспечения стабильных физико-механических и теплофизических характеристик;
- формообразование высокопористых теплоизоляционных изделий сложной пространственно-геометрической формы с заданными геометрическими размерами.

В процессе изучения жидкостного процесса получения полуфабриката для формования теплоизоляционных конструкций из коротких базальтовых волокон проведен ряд экспериментов, с помощью которых удалось определить оптимальную длину волокна для достижения требуемой плотности. Определены экспериментальные зависимости пористости материала от длины рубленных волокон. Проведен анализ формулы, определяющей коэффициент проницаемости в уравнении Дарси, сделаны уточнения и новая запись формулы, правильность которой подтверждена экспериментальными проливками жидкости через высокопористые образцы из коротковолокнистого материала. Исследование структуры волокнистой

теплоизоляции проводились в «Лаборатории тонких физических методов исследования материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана на растровом электронном микроскопе РЭМ Tescan VegaII LMN и инверсном металлографическом микроскопе МИМ-1600Б.

Теоретическая часть работы представлена разработкой математической модели фильтрационного осаждения коротких волокон из пульпы при формообразовании теплоизоляционных конструкций в виде плиток и цилиндрических колец. Основу физико-математического анализа фильтрации составляет описание движения жидкости (фильтрата) в порах слоя волокон.

Скорость фильтрации или течения жидкости $u_{\phi}(t)$ через пористый слой уже осажденных волокон (Рис. 2, а) определяется:

$$u_{\phi}(t) = \frac{K_d[(\rho_{\text{п}} g (H_{\text{п}} - h) + \Delta p)] \rho_{\text{сл}}}{\eta_{\text{ж}} c_m h} = \frac{dh}{dt}.$$

Здесь $\rho_{\text{п}}$ – плотность пульпы, $\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{ж}} + c_m(1 - \rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{в}})$, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости (воды), кг/м³; $\rho_{\text{в}}$ – плотность волокон, кг/м³; $h_{\text{п}}$ – текущая высота столба жидкости, м; $\rho_{\text{сл}}$ – плотность сухого осадка, средняя по толщине слоя, кг/м³; $c_m = M_{\text{в}}/V_{\text{п}}$ – массовое содержание (концентрация) волокон в объеме пульпы, кг/м³; $H_{\text{п}} = h_{\text{сл}}\rho_{\text{сл}}/c_m$ – начальная высота столба пульпы (жидкости), м.

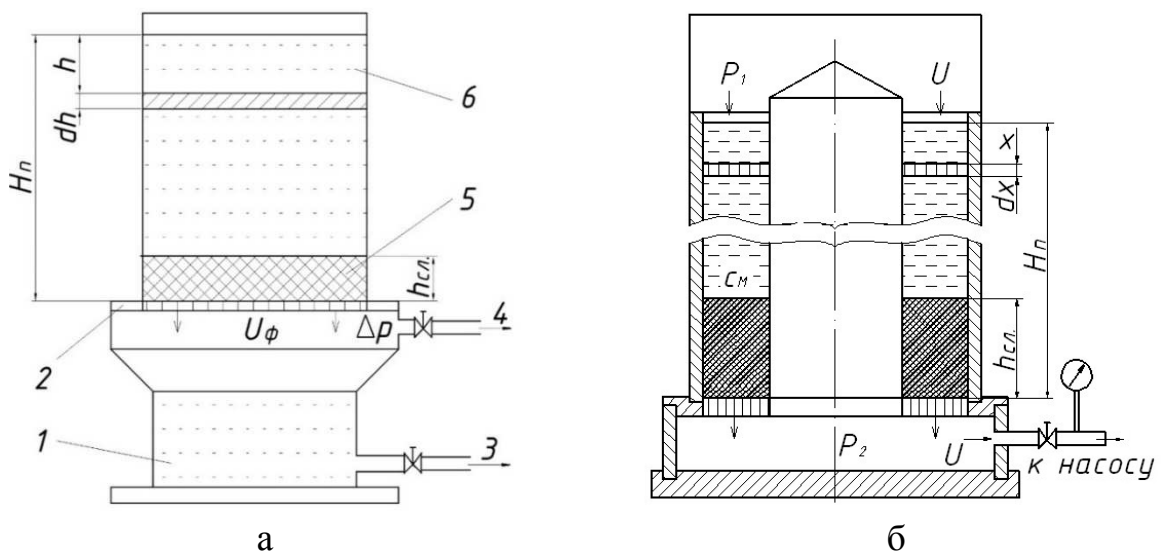


Рис. 2. Схема фильтрационного осаждения коротких базальтовых волокон из пульпы на перфорированную оправку (а): 1 – фильтр; 2 – перфорированная перегородка; 3 – слив фильтрата; 4 – вакуумирование камеры; 5 – слой волокнистого осадка; 6 – пульпа и (б) – схема изготовления цилиндрических колец

Разработанная математическая модель позволяет определить время, необходимое для осаждения волокон из пульпы:

- с вакуумированием камеры фильтрата (Рис. 3, а, кривые 2-4):

$$t_{\phi} = \frac{\eta_{\text{ж}} h_{\text{сл}} c_m}{K_d \rho_{\text{п}} g \rho_{\text{сл}}} \left[1 - \frac{\rho_{\text{сл}}}{c_m} + \left(\frac{\rho_{\text{сл}}}{c_m} + \frac{\Delta p}{h_{\text{сл}} \rho_{\text{п}} g} \right) \ln \frac{\rho_{\text{сл}}/c_m + \Delta p/(h_{\text{сл}} \rho_{\text{п}} g)}{1 + \Delta p/(h_{\text{сл}} \rho_{\text{п}} g)} \right];$$

- без вакуумирования камеры фильтрата (Рис. 3, а, кривая 1):

$$t_{\phi} = \frac{\eta_{\text{ж}} h_{\text{сл}} c_m}{k_d \rho_{\text{п}} g \rho_{\text{сл}}} \left[1 + \frac{\rho_{\text{сл}}}{c_m} \left(\ln \frac{\rho_{\text{сл}}}{c_m} - 1 \right) \right]; t_{\phi 1} = \frac{\eta_{\text{п}} \rho_{\text{в}} (1 - \varepsilon) h_{\text{сл}}^2}{2 k_d c_m (p_1 - p_2)}; k_d = \frac{c d_{\text{в}}^2 n^3}{16 (1 - n)};$$

- с внешним давлением без вакуумирования камеры $t_{\phi 1}$:
- зависимость коэффициента проницаемости k_d от пористости (Рис. 3, б).

Время получения осадка волокон заданной толщины и плотности под действием только столба жидкости в 5-10 раз больше (Рис. 3, а, кривая 1), по сравнению с вакуумированием камеры фильтрата (Рис. 3, а, кривые 2-4). На завершающем этапе свободного осаждения волокон время фильтрационного осаждения резко возрастает, поэтому следует применять вакуумирование камеры фильтрования.

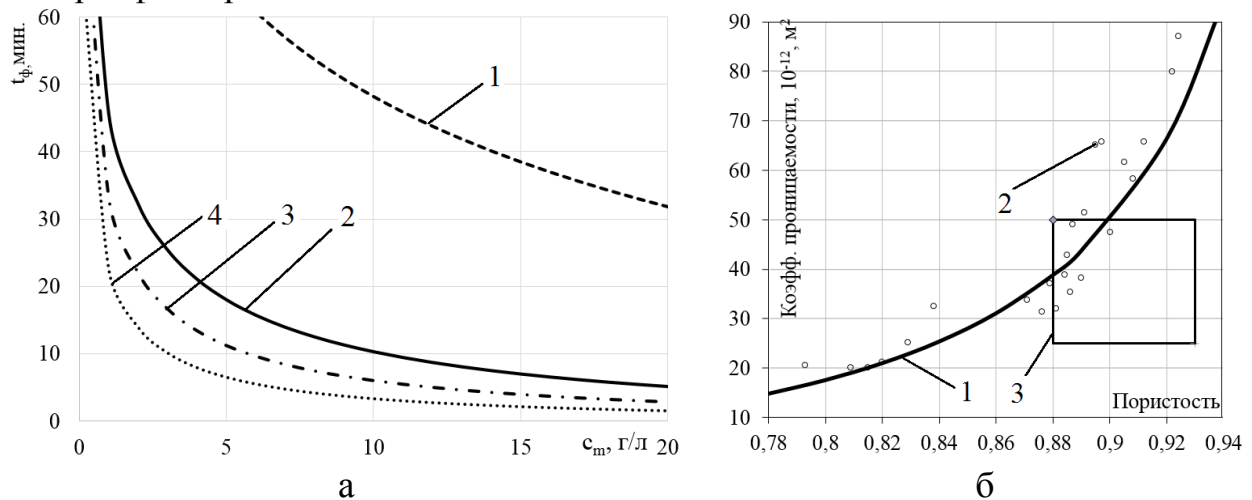


Рис. 3. Зависимость (а) времени формирования полуфабриката из коротких базальтовых волокон от концентрации волокон c_m в пульпе при давлениях Δp кривая 1 – 0 кПа; 2 – 5 кПа; 3 – 10 кПа; 4 – 20 кПа;

(б) коэфф. проницаемости k_d плоских образцов от пористости материала:

1 – по формуле $k_d = \frac{c d_{\text{в}}^2 n^3}{16 (1 - n)}$; 2 - экспериментальные значения; 3 – область результатов экспериментальных исследований на образцах из стекловолна

Изготовление теплоизолирующих конструкций непосредственно связано с разработкой и исследованием второй технологической стадии формообразования высокопористых изделий. В главе также описано исследование процесса введения в коротковолокнистую базальтовую теплоизоляцию свежесажленную гидроокись алюминия с образование минеральной связки из Al_2O_3 при термообработке изделия. С целью оценки «проскока» гидроокиси алюминия проведены эксперименты по осаждению гидроокиси алюминия в пульпе с базальтовым волокном. На основе проведенных исследований, оптимальным условием получения материала на основе базальтового волокна является проведение операции осаждения связующего в строго контролируемых значениях водородного показателя pH (Рис. 4, а). В случае, когда $\text{pH}=7,5 \div 8,5$ (Рис. 4, б), можно гарантировать расчетное количество окиси алюминия в теплозвукоизоляционном материале

при сохранении достаточно высокой скорости фильтрации при увеличивающейся вязкости пульпы до $\eta_{\text{п}} = 6 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

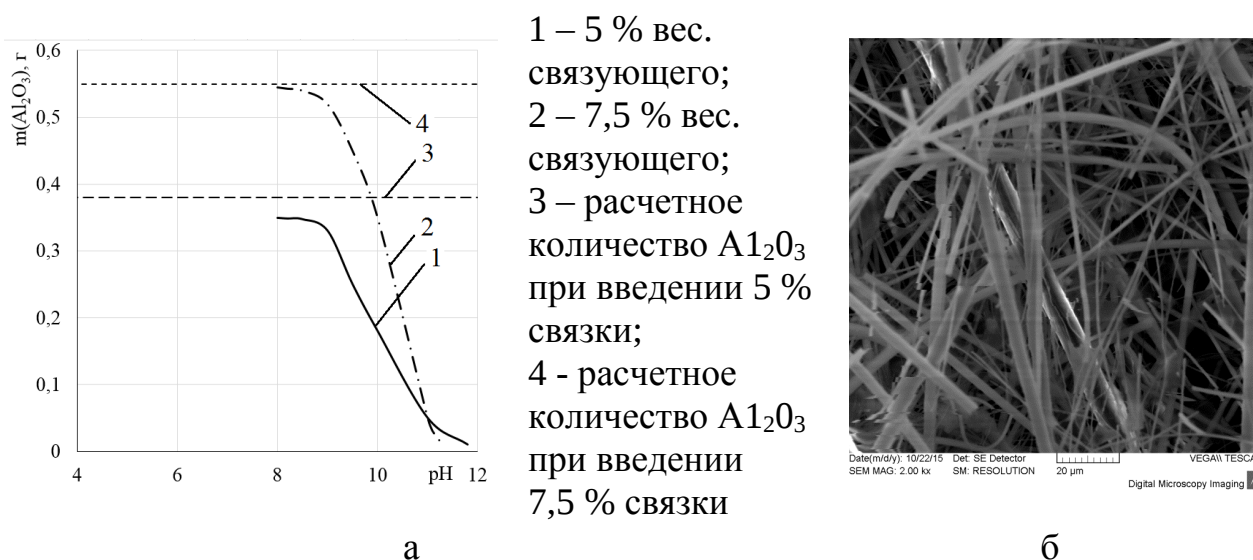


Рис. 4. Зависимость изменения содержания связующего в материале от pH осаждения гидроокиси алюминия (а); связка из Al_2O_3 , осажденная на базальтовых волокнах (б)

В главе описан также процесс фильтрационного осаждения волокон с постоянным внешним давлением на зеркало пульпы при формировании цилиндрических образцов (Рис. 2, б), необходимых для исследования теплофизических характеристик материала теплоизолирующих изделий.

В третьей главе приведены экспериментально-теоретические исследования в области теплофизических свойств теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон и минеральной связки из Al_2O_3 на плоских и цилиндрических образцах.

Лабораторные исследования высокопористой изоляции на цилиндрических образцах из коротких базальтовых волокон с внутренним нагревом трубы от электронагревателя позволили рассчитать удельный тепловой поток и фактические значения коэффициентов теплопроводности ТИМ. Полученные данные подтвердили аналитическое определение коэффициента кондуктивной теплопроводности ТИМ на основе базальтового волокна и спокойного воздуха.

Для изучения фактических характеристик при нагреве базальтовой теплоизоляции в виде цилиндрических колец, одетых на трубу, был создан специальный испытательный стенд, который позволяет прокачивать нагретый до необходимой температуры в пределах до 600 °С воздух. Так же в главе проведено экспериментальное определение коэффициента теплопроводности многослойного натурального образца регулярной части НКТ, включающего стальную трубу диаметром 60 мм и конструкцию ТИМ, состоящую из цилиндрических колец на основе базальтовых волокон и связки Al_2O_3 , двух слоев фольги и намотанной сверху защитно-силовой стеклопластиковой оболочки толщиной 2 мм. Испытания показали высокую

эффективность высокопористой базальтовой теплоизоляции. Среднее значение коэффициента теплопроводности теплозащитного покрытия НКТ составило 0,0409 Вт/м К.

В главе обсуждаются вопросы исследования процессов переноса тепла внутри теплозащитных покрытий, которые необходимо проводить при определении толщины теплоизолирующего слоя и при расчете температуры внешней поверхности многослойной НКТ. В результате температурных исследований были получены экспериментальные зависимости, отражающие нестационарный и стационарный нагрев теплоизоляционных образцов.

Теплофизическое исследование температурного режима при нагреве высокопористого теплоизоляционного материала из коротких базальтовых волокон проводилось с учетом лучистого переноса тепла в межпоровом пространстве. Уравнение теплопроводности представлено в следующем виде:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - a_1 (T - T_0)^4,$$

где $a = \frac{\lambda}{\rho C_v}$ - коэффициент температуропроводности, м²/с; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м К); ρ - плотность материала, кг/м³; C_v - теплоемкость материала, Дж/(кг К); T - температура, которая в силу линейности и однородности уравнения может измеряться с помощью шкал Кельвина и Цельсия; T_0 - начальная температура, К; t - время, с; x_i - пространственная координата; $a_1 = \chi \cdot a_2 = 5,8 \cdot 10^{-6}$ - параметр, полученный после обработки проведенных экспериментальных данных.

По результатам исследований разработаны номограммы для определения необходимой толщины теплоизоляции на основе базальтовых и волокон в зависимости от заданного перепада температур на холодной и горячей стенке (Рис. 5, а).

В третьей главе также предложена математическая модель нелинейной теплопроводности высокопористого теплоизоляционного материала из коротких базальтовых волокон, на основе которой можно оценить динамику изменения температуры стенки трубопровода в зависимости от условий испытаний. Полученная модель может быть использована для обоснования времени испытаний с учетом условий производства, разных сред теплопередачи (воздуха, воды и песка) и конструктивной схемой испытательного стенда.

В основе модели лежит зависимость наружной (T_n) и внутренней (T_e) температур:

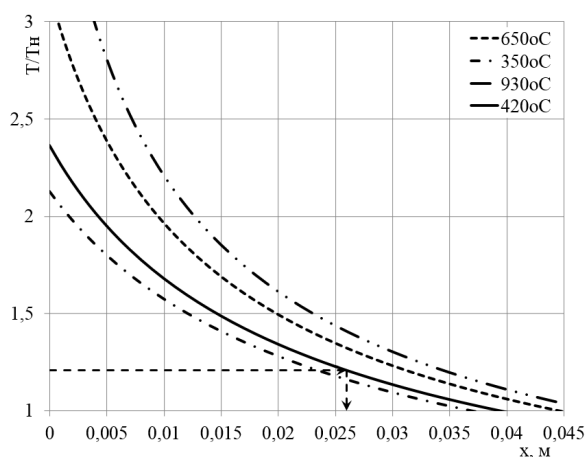
$$T_H = \frac{T_B}{B} \left(1 - \frac{1 - e^{-A(t+\tau)}}{A(t+\tau)} \right), \text{ где } B = 1 + \frac{\eta_2 f_2}{\eta_1 a f_1}; A = \eta_1 a f_1 + \eta_2 f_2.$$

$$\text{Здесь } f_1 = \frac{r}{\delta_T^2} \frac{1}{(r + \frac{\delta_T}{2})}, \eta_1 = \frac{1}{\chi}, \eta_2 = \frac{\mu}{\chi}, a = \lambda_T \frac{1}{c_T \rho_T}, f_2 = \frac{\lambda_B c_B \rho_B (r + \delta_T)}{c_T \rho_T (r + \frac{\delta_T}{2}) \delta_T},$$

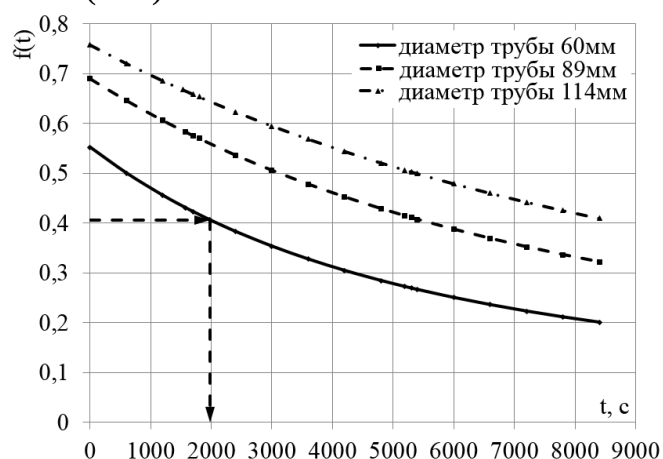
где r – внутренний радиус трубы, м; δ_T – толщина слоя ТИМ, м; χ – эмпирическая поправка; μ – эмпирический коэффициент; λ_T – коэффициент теплопроводности ТИМ, Вт/(м К); c_T – коэффициент теплоемкости ТИМ, Дж/(кг К); ρ_T – плотность ТИМ, кг/м³; $\lambda_\delta; c_\delta; \rho_\delta$ – соответственно коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м К); коэффициент теплоемкости воздуха, Дж/(кг К) и плотность воздуха, кг/м³.

Для обоснования времени проведения испытаний используется функция вида:

$$f(t) = \frac{1 - e^{-A(t+\tau)}}{A(t+\tau)}.$$



а



б

Рис. 5. Зависимость градиента температуры от координаты поверхности трубы - (а); график функции $f(t)$ – (б)

Проверив на базе экспериментальных данных вид $f(t)$, а затем, принимая $f(t)$ за установленный, можно проводить испытания на любой момент времени t . Изображенный на Рис. 5, б график $f(t)$ позволяет определить время выхода теплопередачи в ТИМ на стационарный режим, а также пересчитывать результат (температуру) на большие значения времени.

В результате полученные в главе соотношения представляют собой модель нагрева поверхности трубы, которая учитывает и диаметр трубы, и параметры теплоизоляции, и свойства окружающей среды. Эта модель может быть использована для анализа работы стенда с прямоточным движением горячего воздуха по внутренней поверхности трубы.

В четвертой главе описаны практические результаты по применению коротковолокнистой теплоизоляции из коротких базальтовых волокон и минеральной связки Al_2O_3 , а также прочностные и тепловые испытания теплоизолированных конструкций НКТ нового поколения.

Разработанная инженерная методика расчета эффективного коэффициента теплопроводности на основе правила суммирования кондуктивного и радиационного переноса тепла в высокопористой коротковолокнистой теплоизоляции позволила определить коэффициент теплопроводности теплоизоляционного покрытия регулярной части НКТ.

Эффективный коэффициент теплопроводности для материала на основе базальтового волокна представляется как сумма трех составляющих:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{БВ}} + \lambda_{\text{возд}} + \lambda_{\text{рад}} = \lambda_{\text{конд}} + \lambda_{\text{рад}},$$

где $\lambda_{\text{БВ}}$, $\lambda_{\text{возд}}$, $\lambda_{\text{рад}}$ и $\lambda_{\text{конд}}$ - соответственно коэффициенты теплопроводности каркаса из базальтовых волокон; сухого воздуха, радиационной и кондуктивной теплопроводности.

Величина изменения суммарного коэффициента теплопроводности изоляции из коротких базальтовых волокон показывает, что радиационная составляющая (Рис. 6, а) оказывает существенное влияние лишь при малой плотности материала и пористости выше 96 %.

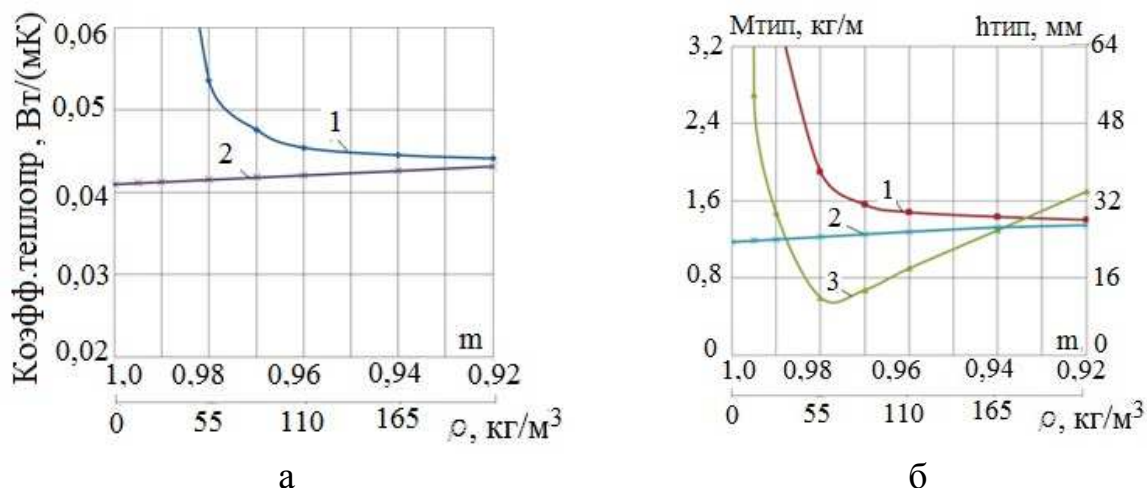


Рис. 6. Зависимости коэффициентов эффективной теплопроводности теплоизоляционного покрытия НКТ из коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса тепла (1) и кондуктивной теплопроводности (2), определенной без учета тепловых потерь на излучение (а); Зависимости толщины слоя (1) и погонной массы (3) покрытия НКТ из коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса тепла и толщины покрытия (2), определенная без учета тепловых потерь на излучение (б)

Необходимая толщина теплоизоляционного покрытия НКТ из коротких базальтовых волокон (Рис. 6, б) $h_{\text{тип}}$ без учета $h_{\text{конд}}(\lambda_{\text{конд}})$ и с учетом $h_{\text{рад}}(\lambda_{\text{эфф}})$ лучистого переноса тепла в высокопористом теплоизоляционном материале:

$$h_{\text{тип}} = \frac{d_{\text{тр}}}{2} \left[\exp \left(2\pi \frac{\lambda_{\text{тип}} \Delta T}{q_1} \right) - 1 \right],$$

где $\Delta T = (T_1 - T_2) = 360^\circ\text{C}$ – перепад температур на внешней и внутренней стенках теплоизоляции.

Четвертая глава также содержит результаты экспериментов по определению упругих характеристик материала на основе базальтовых волокон при 12 % деформации образца на сжатие. Исследования проводились на испытательной машине FP 10/1 с использованием реверсивного устройства и на испытательной машине Zwick/Roell (Рис. 7).

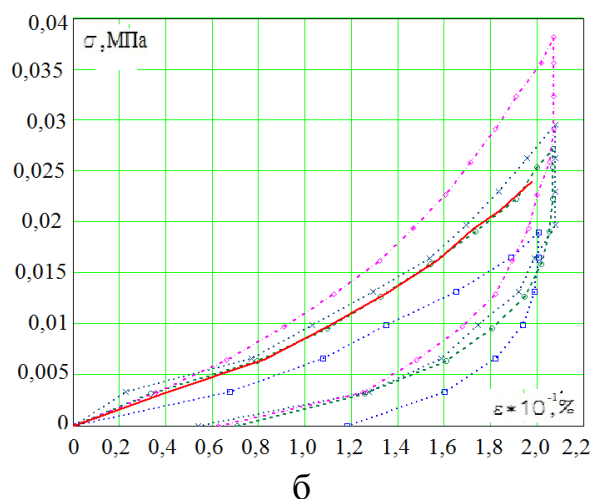
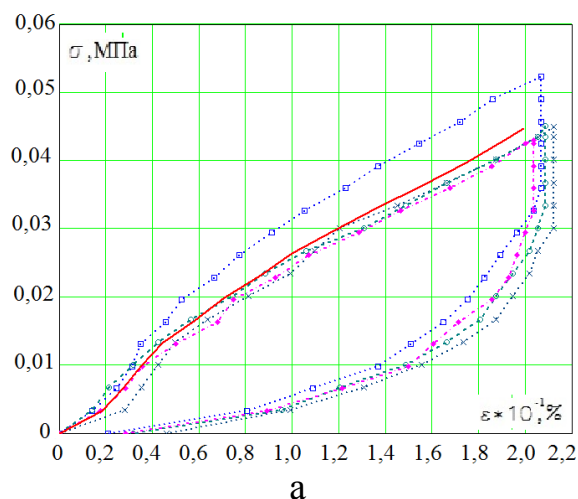
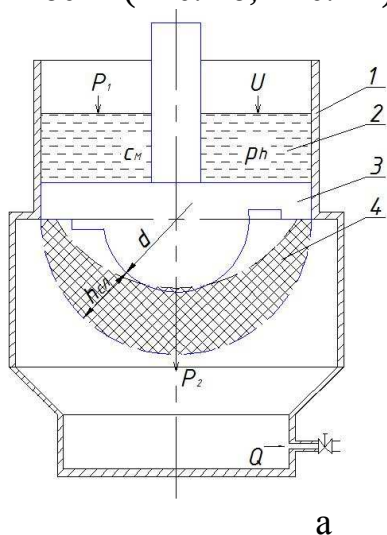


Рис. 7. Зависимости изменения напряжения и восстановления толщины образцов после их деформации со связкой Al_2O_3 (а) и без связки (б)

В работе описан технологический процесс изготовления ТИМ из коротких базальтовых волокон для теплоизоляционного покрытия опытной трубы НКТ. Проведенные исследования показали, что с целью сокращения времени изготовления цилиндрических теплоизоляционных изделий и последующей их сборки на трубе НКТ необходимо изменить схему формования с торцевого на формование с плоскости образующей цилиндра (Рис. 8).

Разработана методика проведения экспериментальных тепловых испытаний опытной (натурной, длиной 2,5 м) теплоизолированной НКТ нового поколения (Рис. 9) на тепловом стенде. Главным результатом испытаний явилось низкое значение температуры на элементах конструкции НКТ, в регулярной части трубы получена требуемая температура поверхности (Рис. 10, Рис. 11).



- 1 – камера;
- 2 – пульпа;
- 3 – пуансон;
- 4 – первонач. слой осадка



Рис. 8. Схема формования цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон (а); общий вид собранных цилиндрических скорлуп и профильных манжет для теплоизоляции стыка двух труб НКТ(б)

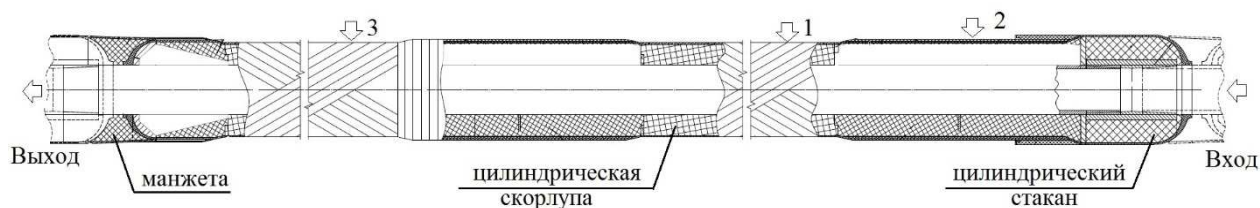


Рис. 9. Конструктивная схема многослойной НКТ: теплоизоляция регулярной части НКТ в виде цилиндрических скорлуп; теплоизоляция соединений НКТ между собой в виде профильной манжеты и теплоизоляция резьбовой муфты НКТ в виде цилиндрического стакана

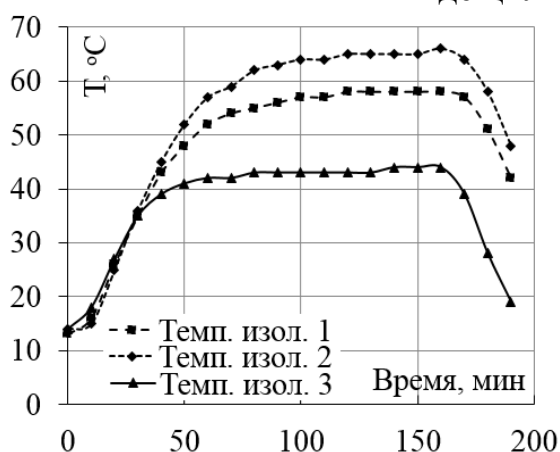


Рис. 10. Изменение во времени показаний датчиков температуры №1-3 на регулярной части трубы НКТ

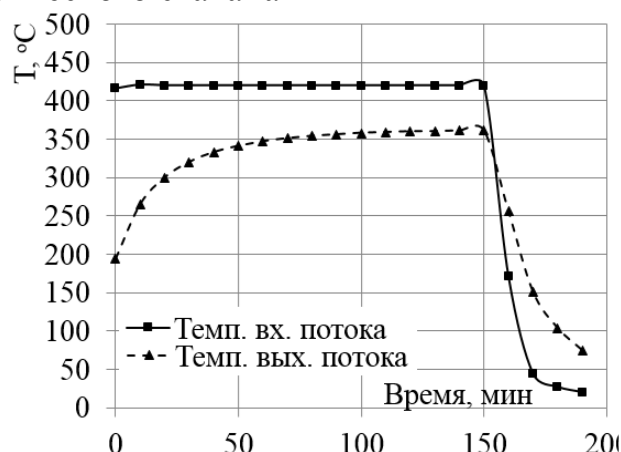


Рис. 11. Изменение во времени температуры воздуха на входе и выходе трубы НКТ



Рис. 12. Фото трубы НКТ, используемой для тепловых испытаний

Таким образом, и на полноразмерной секции паропровода (Рис. 9-12) была подтверждена высокая эффективность разработанного термоизоляционного покрытия для нефтепромыслового паропровода нового поколения. Опытные многослойные теплоизолированные НКТ прошли испытания на тепловом стенде и показали в регулярной части трубы и в области соединения двух труб требуемую температуру поверхности с допуском $\pm 3^\circ\text{C}$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. По результатам критического анализа литературных источников, ТУ и нормативных материалов исходных компонентов для получения теплоизолирующих конструкций, разработанное и выдержавшее испытания

покрытие на основе базальтового волокна и связки из Al_2O_3 является перспективным. Оно недефицитно, нетоксично, не горючее и экологически безопасно при изготовлении.

2. На основании экспериментально-теоретических исследований разработана математическая модель фильтрационного осаждения коротких базальтовых волокон из пульпы со связкой из Al_2O_3 в процессе формования сложно профильных теплоизолирующих конструкций:

- модель позволяет определить структурные, механические и теплофизические характеристики формируемых изделий;
- разработанные методики позволяют получать изделия с равномерным распределением волокон и связки по всему объему материала;
- предложенная модель позволяет определить время, необходимое для осаждения волокон из пульпы при фильтрационном осаждении.

3. Предложенная 2-х стадийная технология формообразования теплоизолирующих конструкций методом фильтрационного осаждения, включающая измельчение и очистку базальтовых штапельных волокон от неволокнистых включений, позволила получить изделия, которые в интервале температур $60...420\text{ }^\circ\text{C}$ имеют в 1,7-1,8 раза меньший коэффициент теплопроводности по сравнению с аналогичным показателем для применяемых в настоящее время прошивных рулонов и матов. Область применения таких конструкций - внутренняя теплоизоляция элементов машин.

4. Установлена аналитическая связь и получено уравнение теплопроводности, описывающие стационарный режим изменения температуры в волокнистом теплоизоляционном материале с учетом лучистого переноса тепла в межпоровом пространстве. Предложенное решение позволяет вести расчет толщины теплоизолирующего слоя с одновременной оптимизацией пористости материала.

5. Математическая оценка параметров конструкции и условий испытаний теплоизолированных насосно-компрессорных труб позволила рассчитать время выхода системы на стационарный режим. На основании расчетов с использованием предложенной модели возможно провести сокращение времени испытаний за счет интенсификации процесса теплоотдачи.

6. Разработано методическое обеспечение, позволяющее проводить расчет коэффициента теплопроводности и толщины стенки теплоизолирующей конструкции из коротких базальтовых волокон в виде цилиндрических колец и скорлуп по требуемому перепаду температур с учетом и без учета лучистого переноса тепла в межпоровом пространстве.

7. По результатам теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертации, изготовлена коротковолокнистая композитная теплоизоляция в виде цилиндрических скорлуп, которая была использована на модельных образцах труб НКТ. Созданное теплоизоляционное покрытие

на основе БСТВ и минеральной связки из Al_2O_3 , работоспособно при температуре 450 °С в течение длительного времени.

8. Результаты работы прошли промышленную апробацию. Созданы опытные образцы теплоизоляционного покрытия НКТ нового поколения диаметром 60 мм в виде манжет, цилиндрических колец и скорлуп с толщиной стенки 25 мм и средним коэффициентом теплопроводности в диапазоне температур 63...420 °С равным 0,0413 Вт/(м К).

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Анализ свойств и особенностей функционирования высокопористых теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна / Ю.В. Ермакова [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. №4. С. 120-129. (0,6 п.л./0,2 п.л.)

2. Комков М.А., Баданина Ю.В., Тимофеев М.П. Разработка и исследование термостойких покрытий трубопроводов из коротких базальтовых волокон [Электронное издание] // Инженерный журнал: наука и инновации. Эл. № ФС77-53688. 2014. № 2. 10 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2014-2-1203. (0,63 п.л./0,2 п.л.)

3. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формования базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб [Электронное издание] / Ю.В. Баданина [и др.] // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эл. № ФС77-48211. 2015. №4. 16 с. DOI: 10.7463/0315.0761820. (1 п.л./0,2 п.л.)

4. Денисов Н.П., Баданина Ю.В. Исследование и подготовка гидромассы для формования из коротких базальтовых волокон теплоизоляционного покрытия насосно-компрессорных труб [Электронное издание] // Молодежный научно-технический вестник: электронный журнал. Эл. № ФС77-51038. 2015. № 4. 11 с. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/777145.html> (дата обращения: 10.05.2015). (0,7 п.л./0,4 п.л.)

5. Баданина Ю.В. Разработка и исследование теплоизолирующих конструкций трубопроводов на основе коротких базальтовых волокон // Достижения науки и образования. 2016. №4(5). С. 13-17. (0,25 п.л./0,25 п.л.)

6. Создание насосно-компрессорных труб с высокоэффективным композиционным термобарьерным покрытием для паротепловой обработки скважин / Ю.В. Баданина [и др.] // Фундаментальные исследования. 2016. № 11 (часть 3). С. 461-466. (0,3 п.л./0,1 п.л.)

7. Анализ структурных и теплофизических характеристик высокопористой базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб / Ю.В. Баданина [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. Эл. № ФС77-53688. 2017. № 1. 14 с. DOI: 10/18698/2308-6033-2017-1-1575. (0,9 п.л./0,2 п.л.)