На правах рукописи

СМИРНОВА Татьяна Викторовна

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДВОЙНОЙ ПЛОТНОСТИ

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Жуков Алексей Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Перфилов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой «Нефтегазовые сооружения»

Бессонов Игорь Вячеславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), заведующий лабораторией «Стройфизика-ТЕСТ »

Ведущая организация: - Научно-исследовательский институт московского строительства ОАО «НИИМосстрой»

Защита состоится «26» сентября 2016 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.138.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, ул. Ярославское шоссе, д. 26, ауд. №9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» www.mgsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Алимов Лев Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Минераловатные теплоизоляционные изделия двойной плотности, которые имеют высокую механическую прочность благодаря верхнему жесткому слою и низкую теплопроводность благодаря нижнему слою низкой плотности, являются современным и перспективным теплоизоляционным материалом. Эти изделия уже зарекомендовали себя в строительстве лучшим образом, но стойкость их, как и любых теплоизоляционных изделий, сильно зависит от условий эксплуатации. Работа теплоизоляции в наружных конструкциях осуществляется при постоянном воздействии различных нагрузок: механических, влажностных, температурных, из-за чего в течение эксплуатации происходит увеличение теплопроводности и снижение прочности материала, что в конструкциях штукатурных фасадов и плоских кровель, где теплоизоляция выполняет и несущую функцию, приводит к разрушению и необходимости ремонта или замены всей конструкции.

Чтобы отвечать современным стандартам высокие прочностные характеристики и низкая теплопроводность минераловатных теплоизоляционных изделий (МТИ) должны сохраняться в течение нескольких десятков лет эксплуатации.

Работа выполнена в соответствии с локальным проектом № 12 НИУ МГСУ по теме «Проведение центром коллективного использования научного оборудования ГР ЦКП МГСУ поисковых НИР в области энергосбережения и энергоэффективности зданий и сооружений» в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО « НИУ МГСУ».

Степень разработанности темы.

Вопросом повышения эксплуатационной стойкости минераловатных теплоизоляционных изделий, разработкой методики ее определения занимались многие Научно-исследовательские институты России и зарубежья. В настоящее время в нормативных и рекомендуемых документах, а так же методиках НИУ ВШЭ (ГАСИС), НИИСФ РААСН, ROCKWOOL и др. оценка эксплуатацион-

ной стойкости теплоизоляции оценивается по ее искусственному старению в результате испытаний в климатических камерах. Методики имеют описательный характер без введения формализующих критериев, что осложняет их сопоставление и сравнительную оценку свойств материалов.

В настоящее время в России не существует единой методики определения долговечности МТИ выраженной в годах возможной эксплуатации. Возможность прогнозирования эксплуатационной стойкости МТИ также остается предметом изучения.

Научная гипотеза.

Анализ технологии, свойств готовых изделий и методов оценки этих свойств, а также эксплуатационной стойкости МТИ позволил сформулировать **научную гипотезу**, согласно которой получение эффективных минераловатных теплоизоляционных изделий с прочностными характеристиками и теплопроводностью, удовлетворяющими заданным условиям эксплуатации, и высокой эксплуатационной стойкостью достижимо на основе изделий двойной плотности изготавливаемых с применением оптимизированных режимов тепловой обработки.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является получение МТИ двойной плотности с повышенной эксплуатационной стойкостью.

Достижение поставленной цели становится возможным путем решения следующих **задач**:

1. Обосновать возможность получения МТИ с улучшенными эксплуатационными показателями, обеспечивающими нормативные сроки безремонтного эксплуатации строительных конструкций;
2. Провести анализ и оценку условий и режимов эксплуатации теплоизоляции в различных строительных конструкциях; сформировать научно обоснованную концепцию изменения свойств МТИ двойной плотности в условиях искусственного старения;

3. Разработать и внедрить методики испытаний МТИ в условиях искусственного старения; провести исследования изменения целостности, геометрии, прочности и теплопроводности МТИ двойной плотности в условиях искусственного старения;

4. Разработать структурную модель МТИ, на основе этой модели получить зависимости изменения плотности, прочности и теплопроводности МТИ от пористости материала, диаметра волокна, толщины пленки связующего в точке контакта волокон и длины волокна между двумя точками контакта;

5. Выявить ресурсосберегающие технологические решения повышения эксплуатационной стойкости МТИ двойной плотности; разработать методику оптимизации технологических параметров и прогнозирования свойств МТИ;

6. Провести проверку результатов исследования в опытно-промышленных условиях.

Научная новизна работы.

1. Обоснована возможность повышения эксплуатационной стойкости МТИ двойной плотности за счет изменения температуры и скорости теплоносителя при тепловой обработке минераловатного ковра;

2. Установлены зависимости изменения прочности и теплопроводности МТИ от условий (температура, влажность) и продолжительности искусственного старения;

3. Разработана структурная модель волокнистого материала, на основе данной модели получены математические зависимости основных эксплуатационных свойств МТИ (плотность, прочность, теплопроводность) от пористости материала, диаметра волокна, толщины пленки связующего в точке контакта волокон и длины волокна между двумя точками контакта;

4. Установлен механизм формирования структуры МТИ двойной плотности и разработаны принципы создания материалов с повышенной эксплуатационной стойкостью;

5. Разработана модель процесса тепловой обработки минераловатного ковра двойной плотности, учитывающая температуру теплоносителя и скорость теп-

лоносителя, время тепловой обработки и плотность, прочность и теплопроводность получаемых МТИ; на основании которой создана методика оптимизации технологических параметров и прогнозирования свойств МТИ.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Получены зависимости, которые позволили получить МТИ двойной плотности с повышенной эксплуатационной стойкостью. Получен материал, обладающий следующими свойствами: плотностью верхнего слоя 210 кг/м³ и нижнего слоя 110 кг/м³, прочностью при сжатии при 10 % деформации 45 кПа, теплопроводностью 0,038 Вт/(м·К), эксплуатационной стойкостью соответствующей 50 годам эксплуатации.
2. Оптимизирована технология изготовления МТИ двойной плотности за счет регулирования параметров тепловой обработки (температура и скорость теплоносителя);
3. Разработана методика оценки эксплуатационной стойкости МТИ на основе изменения свойств (геометрические размеры, плотность, прочность, теплопроводность) в результате циклического воздействия температуры и влажности;
4. Созданы рекомендации по изготовлению МТИ;
5. Разработаны компьютерные программы для выбора параметров тепловой обработки минераловатного ковра слоистой структуры. Для кровельных слоистых плит падение напора с учетом перфорации лент конвейера составляет 43,0 кПа; время тепловой обработки составляет 9,5 мин; рабочая длина камеры должна быть не менее 19,4 м; для фасадных плит соответственно: 17,1 кПа; 3,6 мин; 6,9 (м). Эти данные позволяют регулировать мощность вентиляционного оборудования камеры и ее производительность, а так же решать задачи компьютерного контроля технологии.

Методология и методы исследования.

Методологической основой исследования служат теоретико-эмпирические методы, базирующиеся на анализе, эксперименте, сравнении, ме-

тодах математического и компьютерного моделирования, применении системного подхода (состав – технология – структура – свойства).

При проведении исследований использовались теплотехнические и физико-механические методы оценки характеристик структуры и свойств МТИ, методы количественной и качественной обработки полученных данных и компьютерной статистической обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование возможности производства МТИ двойной плотности с улучшенными качественными характеристиками и высокой эксплуатационной стойкостью;
2. Методики оценки эксплуатационной стойкости МТИ в условиях искусственного старения по следующим характеристикам: средней плотности, прочностным показателям, теплопроводности;
3. Закономерности изменения основных свойств МТИ в зависимости от режимов и условий искусственного старения;
4. Структурная модель МТИ и установленные на ее основе зависимостей плотности, прочности и теплопроводности МТИ от пористости, характеристик волокна и связующего;
5. Методика выбора оптимальных параметров для процесса тепловой обработки минераловатного ковра двойной плотности, алгоритмы расчета и компьютерные программы;
6. Результаты проверки диссертационных исследований в опытно-промышленных условиях.

Личный вклад автора.

Автором выполнено научное обоснование и практическая реализация оптимизационных решений в технологии формирования минераловатного ковра и тепловой обработки, направленных на получение МТИ двойной плотности с повышенной эксплуатационной стойкостью. Выполнена разработка методики оценки эксплуатационной стойкости МТИ, проведены эксперименты, получены результаты экспериментальных исследований и проведен их анализ. Установ-

лены закономерности изменения основных качественных характеристик МТИ (плотности, прочности, теплопроводности) в зависимости от условий и продолжительности искусственного старения. Проведена оптимизация параметров тепловой обработки минераловатного ковра двойной плотности с целью повышения эксплуатационной стойкости готовых изделий. Проведена оценка технико-экономической эффективности применения МТИ двойной плотности с повышенной эксплуатационной стойкостью. Сформулированы заключения и диссертационного исследования, имеющие научную новизну и практическую значимость.

Степень достоверности результатов работы.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением методик, обеспечивающих достаточную точность полученных результатов, проведением экспериментов на современной оборудовании с достаточной воспроизводимостью результатов, статистической обработкой полученных данных с необходимым количеством повторных испытаний, положительными результатами опытного внедрения технологии изготовления МТИ.

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании»; Международной молодежной конференции «Оценка рисков и безопасность в строительстве. Новое качество и надежность строительных материалов и конструкций на основе высоких технологий»; 15-й Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности»; Международной научной конференции V академических чтений, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных материалов и экологическая безопасность»; Международной конференции «Российские дни сухих строительных смесей».

Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории ка-

федры ТКМиПХ, производственной лаборатории ЗАО «Минеральная вата», научно-образовательном центре (НОЦ) Новых строительных технологий и материалов МГСУ. Разработанные методики прошли проверку в условиях действующего производства на предприятии ЗАО «Минеральная вата».

Основные теоритические положения и практические результаты исследований используются в учебном процессе, а так же опубликованы в двух учебных пособиях: «Теплоизоляция из каменной ваты»; «Практикум по технологическому моделированию». Компьютерные программы GJ-STAT-06, WD-22, WD-25 опробованы при решении технологических задач, обработке результатов эксперимента и используются в учебном процессе.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 работ в рецензируемых научных изданиях согласно перечню ВАК РФ; две работы в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. По результатам научных исследований опубликована монография «Повышение эффективности минераловатных изделий».

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Работа содержит 141 страницу машинописного текста, 44 рисунка, 23 таблицы, библиографический список, включающий 57 наименований и 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для проведения исследования использовались образцы теплоизоляционных плит из минеральной каменной ваты линейной структуры (ГОСТ 9573-2012); объемно ориентированной структуры (ТУ 5762-005-45757203-99 с изм. 1-10); комбинированной структуры (ТУ 5762-017-45757203-05 с изм. 1-4).

Комплекс требований, предъявляемых к МТИ, определяется, прежде всего, условиями их работы в строительных системах. Наиболее интенсивные

нагрузки испытывают МТИ, применяемые в системах утепления фасадов и кровель.

Проанализированы методы оценки эксплуатационной стойкости изделий и методик её прогнозирования, разработанных специалистами ВНИИТеплоизоляции, НИИСФ, ROCKWOOL, ГАСИС (ВШЭ), ОАО «Теплопроект», ЦНИИПромзданий, ЦМИПКС, УралНИИСтромпроект. Согласно этим методам срок эффективной эксплуатации МТИ оценивают по изменению линейных размеров, теплопроводности, коэффициента воздухопроницаемости и прочностных показателей.

Сформирована общая схема исследований, которые проводились на лабораторной базе Центра НСМ МГСУ, производственной базе в г. Железнодорожный. На основе анализа существующих на сегодняшний момент методик прогнозирования эксплуатационной стойкости, а также учитывая важность каждого эксплуатационного показателя и возможность различных условий эксплуатации, была разработана специальная методика «МГСУ-РОКВУЛ».

Согласно методике «МГСУ-РОКВУЛ» испытания на искусственное старение проводят в климатической камере в течении 180 циклов (z): замораживание-оттаивание-нагрев. Прочность при 10 % деформации (σ) принимают в качестве параметра оптимизации, то есть основного параметра, по которому определяют эксплуатационную стойкость изделий. Теплопроводность (λ) является фактором, значение которого определяют наравне с прочностью при 10 % деформации.

Общая модель волокнистого материала создана на использовании концепции «элементарного объема» и принципов правилом, сформулированным для теплопроводности неизотропных структур. Модель, основанная с учетом этих положений, представляет собой трехмерную сетку, пересекающихся стержней. В этом случае трехмерная структура материала может быть представлена проекцией на вертикальную плоскость.

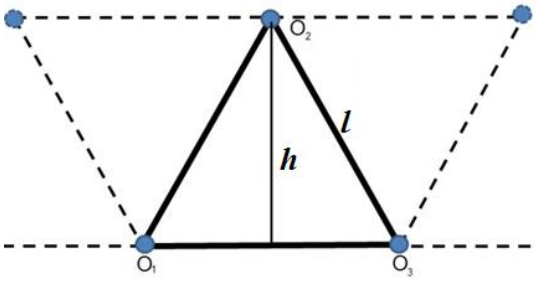

Рисунок 1 – Структурный элемент двухмерной модели

Геометрическими характеристиками модели являются: d – диаметр волокна, δ – толщина пленки связующего в точке контакта (пересечения волокон); l – длина волокна между двумя точками контакта.

Исходя из сформированной структурной модели высокопористого волокнистого материала (рис. 1) установлены основные зависимости между пористостью МТИ и их свойствами:

Прочность при сжатии при 10 % деформации:

$$R_{сж} = R_B k_{сж} \cdot \left(1 - \frac{1 - m'_0}{1 - m'}\right) \quad (1)$$

Предел прочности на отрыв слоев:

$$R_{ос} = (0,7 \div 1,0) \frac{(1 - m')}{l_b} \quad (2)$$

Сжимаемость под нагрузкой:

$$\varepsilon_h = \frac{R_{сж}}{R_B} k_{ус} m' \quad (3)$$

Теплопроводность

$$\lambda = K_O \lambda_M \cdot (1 - m')^{2/3} + K_Ф \lambda_Г (m')^{2/3} \quad (4)$$

Средняя плотность

$$\rho_0 = \rho_M (1 - m') \quad (5)$$

где m', m'_0 – пористость материала начальная и текущая; $R_{сж}$, $R_{ос}$, $R_в$ – прочности при сжатии, при отрыве слоев, прочность минерального волокна; ε_h – сжимаемость под нагрузкой; $\lambda_м$, $\lambda_г$ – теплопроводность вещества матрицы и газа в пространстве между волокнами; ρ_0, $\rho_м$ – средняя плотность материала и вещества матрицы; l_b – длина волокна между точками отврждённого контакта; $K_о$, $K_ф$ – коэффициент «угла атаки» и коэффициент учитывающий фильтрационные характеристики среды; 2/3 – коэффициент учитывающий особенности характеристик пористой структуры материала и изменение этих характеристик

при переходе от 3-х мерной к двухмерной модели; (0,7÷1,0) – коэффициент, учитывающий степень отверждения связующего.

Исследования изменения свойств МТИ при искусственном старении проводились в условиях циклических температурных воздействий. При этом в качестве дополнительных нагрузок использовались вибрация, соляной туман, продувание материала воздухом с целью оценки эмиссии волокон.

После проведения 180 циклов климатических воздействий замораживания – оттаивания – нагрев по результатам визуального осмотра опытных образцов установлено, что внешний вид образцов не меняется. Изменение в результате циклических воздействий теплопроводности (λ_{25}), прочности при сжатии при 10 % деформации (R_{10}), точечной нагрузки (P); прочности при изгибе ($R_и$) представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты испытаний минераловатных плит комбинированной структуры для плоских кровель

Циклы	**Показатели для условий испытаний**								
	В условиях влажности 65 %			**В условиях влажности 90 %**			**В условиях влажности – 65 % в соляном тумане**		
	λ_{25}, Вт/(м· К)	**R_{10}, кПа**	**P, Н**	**λ_{25}, Вт/(м· К)**	**R_{10}, кПа**	**P, Н**	**λ_{25}, Вт/(м· К)**	**R_{10}, кПа**	**P, Н**
0	0,0401	60,2	626	0,0401	60,2	626	0,0401	60,2	626
60	0,0408	58,5	625	0,0423	57,4	624	0,0431	56,3	623
120	0,0414	56,4	624	0,0442	54,6	622	0,0463	52,4	620
180	0,0420	54,4	623	0,0461	51,1	620	0,0491	48,6	657

Таблица 2 – Результаты испытаний минераловатных плит комбинированной структуры для вентилируемых фасадов

Циклы	**Показатели для условий испытаний**								
	В условиях влажности 65 %			**В условиях влажности 90 %**			**В условиях влажности – 65 % в соляном тумане**		
	λ_{25}, Вт/(м· К)	**R_{10}, кПа**	**$R_и$, кПа**	**λ_{25}, Вт/(м· К)**	**R_{10}, кПа**	**$R_и$, кПа**	**λ_{25}, Вт/(м· К)**	**R_{10}, кПа**	**$R_и$, кПа**
0	0,0362	23,8	5,20	0,0362	23,8	5,20	0,0362	23,8	5,20
60	0,0367	23,4	5,17	0,0369	23,3	5,14	0,0368	23,2	5,12
120	0,0373	23,0	5,14	0,0376	22,8	5,08	0,0374	22,6	5,04
180	0,0382	22,6	5,11	0,0384	22,3	5,02	0,0380	22,0	4,96

Для всех изделий слоистой структуры характерно повышение теплопроводности и проницаемости в результате климатических испытаний и некоторое

снижение прочности. Отметим. Что для однородных плит объемно ориентированной структуры плотностью более 100 кг/м^3 эта тенденция сохраняется, но для особо легких плит характерно снижение теплопроводности и проницаемости, связанное, как видимо, с разуплотнением структуры.

Оценка результатов с использованием экспресс-методики проведена по прочности и по теплопроводности плит двойной плотности. Характерные дифференциалы (коэффициенты при зависимостях, характеризующих изменение свойств в результате климатических испытаний) не превышают критических значений, что позволяет считать эксплуатационную стойкость слоистых плит соответствующей нормативным требованиям.

В системном анализе технологии изготовления плит двойной плотности основной акцент был сделан на технологические переделы, определяющие и отличающие процесс от традиционных: на формирования ковра двойной плотности и его тепловую обработку (рис. 2).

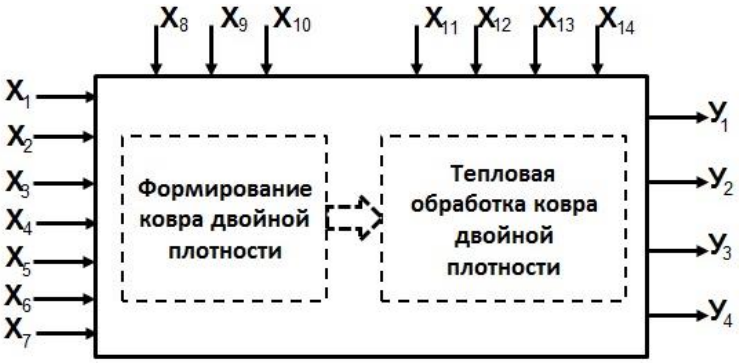

Рисунок 2 – Структурная схема

X_1 – средняя плотность минераловатного ковра, кг/м^3; X_2 – толщина минераловатного ковра, м; X_3 – содержание связующего компонента в сыром ковре, % по массе; X_4 – однородность минераловатного ковра, %; X_5 – сжимаемость сырого ковра, %; X_6 – диаметр минерального волокна, мкм; X_7 – средняя длина минерального волокна, мм; X_8 – относительная толщина разрезки сырого ковра на слои; X_9 – степень уплотнения верхнего слоя, %; X_{10} – степень уплотнения двухслойного ковра, %; X_{11} – температура теплоносителя, ^{o}C; X_{12} – скорость прососа теплоносителя сквозь ковер, м/с; X_{13} и X_{14} – время тепловой обработки и охлаждения соответственно, мин

В качестве функций отклика для выбранных двух переделов были приняты: прочность на сжатие при 10%-ой деформации ($У_1$), кПа; прочность на отрыв

слоев ($У_2$), кПа; средняя плотность двухплотностной плиты ($У_3$) кг/м^3; характеристика теплопроводности – вспомогательная функция $У_4$ равная $\lambda \cdot 10^3$ ($У_4$), Вт/(м·К).

На первом этапе был проведен эксперимент, направленный на оценку значимости факторов и получение линейных уравнений регрессии. Обработка результатов первого этапа позволила вычислить уровень влияния каждого из фактора на конечный результат. Толщина минераловатного ковра (X_2), толщина его продольной разрезки (X_8) и параметры процесса тепловой обработки (X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}) оказались малозначительными факторами.

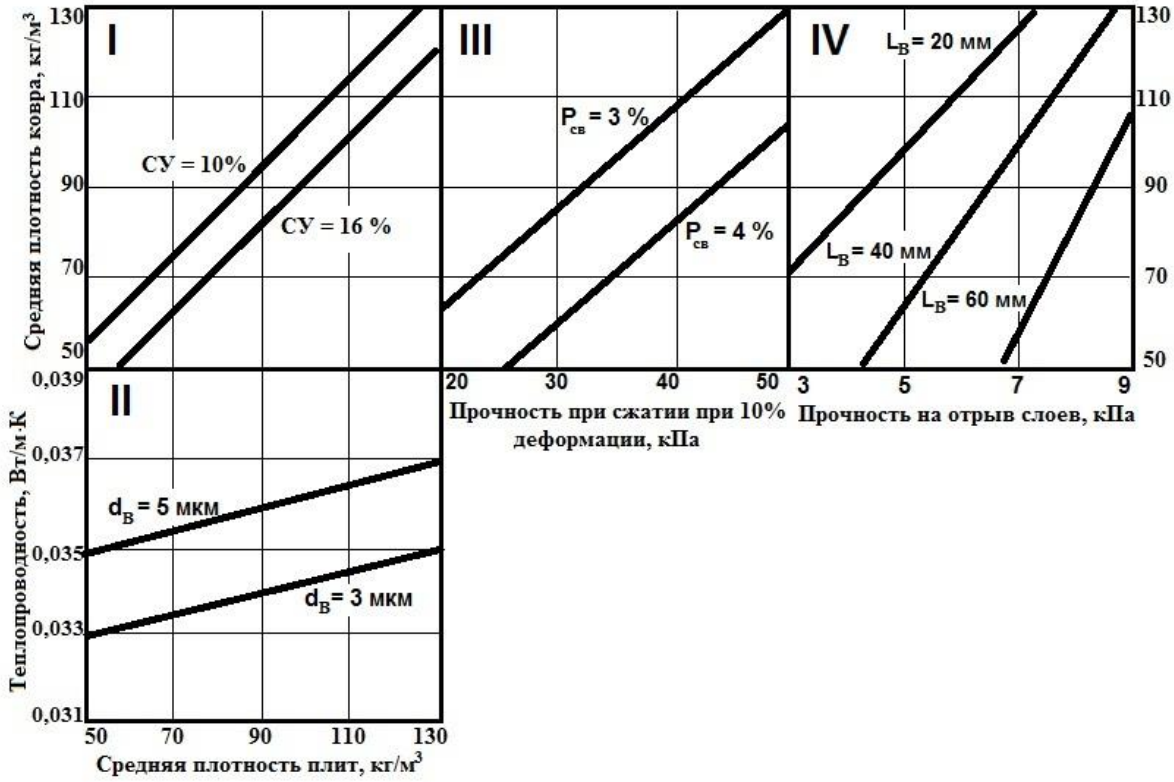

Рисунок 3 – Номограмма для выбора параметров изготовления двухплотнотных минераловатных плит. Зависимость основных качественных показателей изделий от средней плотности и степени уплотнения двухплотностного ковра (СУ), расхода связующего вещества ($Р_{св}$), диаметра ($d_в$) и средней длины ($L_в$) минерального волокна

По результатам экспериментов второго этапа были получены следующие уравнения регрессии:

$$У_1 = 38 + 18X_1 + 6X_3 + 5X_6 + 5X_7 + 5X_{10} + 4X_{11} + 4X_1X_{10} - 2X_1X_7 + 3X_1X_{11} - 2X_6X_{10}\ ; \quad \Delta b = 1{,}6$$

$У_2 = 6,5 + 2,2X_1 + 0,9X_3 + 1,2X_7 + 0,9X_{10} + 0,8X_{11} – 0,3X_1X_7 + 0,3X_1X_{11} + 0,4X_3X_7 – 0,5X_{10}^2$; $\Delta b = 0,2$

$У_3 = 96 + 36X_1 + 9X_7 + 8X_{10} + 4X_1X_{10} – 5X_7^2$; $\Delta b = 3,2$

$У_4 = 37,5 + 0,8X_1 + 0,3X_6 + 0,4X_{10} + 0,2X_1X_{10} - 0,2X_6^2$; $\Delta b = 0,12$

Графическая интерпретация оптимизационных решений, по результатам эксперимента и аналитической оптимизации представлена на рис. 3. В результате по четырем секторам номограммы можно установить взаимосвязь между свойствами волокна, основными характеристиками ковра, расходом связующего, параметрами формования и основными качественными показателями готовых изделий.

Результатом оценки параметров тепловой обработки минераловатного ковра стала методика подбора параметров тепловой обработки минераловатного ковра двойной плотности, на основании которой были разработаны алгоритмы и соответствующие им программы расчета.

Программы составлены на языке *C#* для компьютера (ПК) на базе процессора Intel×86 или AMD 64 для операционной системы Microsoft Windows XP и выше. Для стабильной работы программы, необходима платформа Microsoft.Net Framework 4.0. Программы «WD-22», «WD-25» и «WD-28» предназначены для расчета гидравлического сопротивления слоистого минераловатного ковра, для расчета продолжительности тепловой обработки и для определения минимальной длины камеры тепловой обработки.

Проверка технико-экономической эффективности показала, что эффект может быть получен: при производстве – за счет оптимизации параметров тепловой обработки; при применении – за счет увеличения срока эффективной эксплуатации изделий из каменной ваты в строительных конструкциях. Расчеты показали, что экономической эффективность повышения эксплуатационной стойкости теплоизоляционных решений составляет 22-48 % в зависимости от требования по сроку службы от 50 до 100 лет. При минимальном нормативном требовании по сроку службы 25 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Теоретически и экспериментально подтверждена рабочая гипотеза о возможности получения МТИ с прочностными характеристиками и теплопроводностью, удовлетворяющими заданным условиям эксплуатации, и высокой эксплуатационной стойкостью на основе изделий двойной плотности изготавливаемых с применением оптимизированных режимов тепловой обработки.
2. Сформулированы принципы повышения эксплуатационной стойкости МТИ двойной плотности, основанные на оценке прочностных характеристик волокон, отвержденного связующего и поверхностей контактов. Получен материал, обладающий следующими свойствами: плотностью верхнего слоя 210 кг/м³ и нижнего слоя 110 кг/м³, прочностью при сжатии при 10 % деформации 45 кПа, теплопроводностью 0,038 Вт/(м·К), эксплуатационной стойкостью соответствующей 50 годам эксплуатации.
3. Разработана методика «МГСУ-РОКВУЛ» оценки эксплуатационной стойкости теплоизоляционных изделий и опробована для МТИ линейной объемно-ориентированной структуры и двойной плотности.
4. Установлены зависимости изменения теплофизических и физико-механических свойств МТИ двойной плотности в условиях искусственного старения. В результате климатических испытаний, соответствующих 50 годам эксплуатации, теплопроводность контрольных плит увеличивается на 7-12 %, а плит, изготовленных по оптимизированным параметрам – на 3-6 %.
5. Установлены зависимости влияния структуры материала на свойства готовых изделий; рекомендованы технологические пути оптимизации свойств и строения материала, основанные на увеличении количества контактов между волокнами за счет их совершенного объемного естественного переплетения.
6. Выявлены ресурсосберегающие технологические решения, направленные на повышение эксплуатационной стойкости изделий. Значение технологических параметров определяют в процессе оптимизационных решений и по номограмме.

7. Разработана методика выбора параметров тепловой обработки минераловатного ковра: гидравлического сопротивления минераловатного ковра, продолжительности тепловой обработки и минимально необходимой длины камеры в зависимости от характеристик минераловатного ковра с введенным связующим и характеристик теплоносителя; составлены компьютерные программы и зарегистрированы как объекты интеллектуальной собственности.

8. Прогнозируемый экономический эффект от оптимизационных технологических решений и повышения срока эффективной эксплуатации МТИ (в зависимости от средней плотности изделий, производственных затрат и нормируемой долговечности) составляет 22-48 % в зависимости от требования по сроку службы от 50 до 100 лет. При минимальном нормативном требовании по сроку службы 25 лет.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Созданы рекомендации для определения оптимальных параметров производства МТИ. Оптимальные прочность, плотность и теплопроводность достижимы при диаметре минерального волокна 4,55÷4,95 мкм; длина волокна – от 44÷54 мм; степень уплотнения двухслойного минераловатного ковра в камере тепловой обработки должна составлять 12,9÷14,5 %. Значения остальных параметров определены по номограмме и проверены в условиях производства.

2. Результаты диссертационной работы использованы при разработке рекомендаций по контролю и компьютерному регулированию технологических процессов и при разработке методики прогнозирования свойств минераловатных изделий при их искусственном старении.

3. В результате выполнения теоретических и экспериментальных исследований изучены возможности получения эффективных теплоизоляционных материалов, которые являются перспективой для дальнейших исследований.

Список научных трудов, в которых изложены основные результаты диссертационной работы:

- в российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Теплопроводность высокопористых материалов. Вестник МГСУ 2012 №3. С.108—114

2. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Энергетическая эффективность и методология создания теплоизоляционных материалов. Интернет-вестник ВолгГАСУ №4. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4(35).

3. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Смирнова Т.В. Технологические аспекты эксплуатационной стойкости минеральных волокон. Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 32—36

4. Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Теплоизоляция в огнезащитных конструкциях / Вестник МГСУ 2011 №1. Том 2. С. 268—272

5. Жуков А.Д., Рудницкая В.А., Смирнова Т.В. Армирующие волокна в технологии бетонов. Вестник МГСУ 2012 №4.С.160—164

6. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Гудков П.К. Тепловая обработка минераловатного ковра двойной плотности. Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 3(23).

7. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Чугунков А.В. Перенос тепла в высокопористых материалах. Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 3(23).

8. Жуков А.Д. Смирнова Т.В., Гудков П.К. Изделия двойной плотности в изоляционной оболочке зданий. Журнал «Промышленное и гражданское строительство». 2013 № 3.С. 21-23

9. Жуков А.Д. Смирнова Т.В., Еременко А.О., Копылов Н.А. Системное моделирование в технологии минераловатных изделий. Вестник МГСУ 2013. № 6. С. 92-99

10. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Смирнова Т.В. Методология долговечности минераловатных изделий. Интернет-вестник ВолгГАСУ №4. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4(35).

11. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Еременко А.А., Копылов Н.А. Технологические аспекты обеспечения эксплуатационной стойкости эффективной теплоизоляции. Интернет-вестник ВолгГАСУ №4. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4(35).

12. Жуков А.Д., Зеленщиков Д.Б., Боброва Е.Ю., Смирнова Т.В. Изоляция фальцевой кровли. Интернет-вестник ВолгГАСУ №4. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4(35).

- в иностранных изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Zhukov A.D., Smirnova T.V., Zelenshchikov D. B., Khimich A.O. Thermal treatment of the mineral wool mat / Advanced Materials Research. Vols. 838—841 (2014) pp. 196-200.

2. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu, Smirnova T.V. Evaluation of Durability of Mineral Wool Products / Advanced Materials Research. Vol. 1077 (2015) pp. 109—112.

- в трудах научных конференций:

1. Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Двухслойная теплоизоляция в строительстве. Международная научная конференция «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании». М. МГСУ. 2011. С. 309-312.

2. Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Эксплуатационная стойкость минераловатных материалов. 15-я Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». М. МГСУ. 2012. С 83-86.

3. Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Состояние производства минераловатных изделий. Международная молодежная конференция «Оценка рисков и безопасность в строительстве. Новое качество и надежность строительных материалов и конструкций на основе высоких технологий» М. МГСУ. 2012. С. 156-159.

4. Смирнова Т.В., Химич А.О., Еременко А.О., Копылов Н.А. Технологические аспекты обеспечения эксплуатационной стойкости эффективной теплоизоляции. Международная научная конференция V академические чтения, по-

священные памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных материалов и экологическая безопасность». НИИСФ РААСН, МГСУ, РААСН. М. НИИСФ. 2013. С. 254-257.

5. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Зеленщиков Д.Б., Химич А.О. Прогнозирование эксплуатационной стойкости минераловатных изделий. Международная научная конференция «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» М. МГСУ. 2013. С. 312-316.

6. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Смирнова Т.В. Системы теплоизоляции и отделки фасадов с применением сухих строительных смесей. Международная конференция «Российские дни сухих строительных смесей». МГСУ, МС ССС, СП ССС, РГА. М. МГСУ. 2014. С. 98-102.

- в учебных пособиях и монографиях:

1. Рахимов Р.З., Шелихов Н.С., Смирнова Т.В. Теплоизоляция из каменной ваты. Учебное пособие. М. : Издательство «АСВ». 2010 г. 312 с.

2. Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Смирнова Т.В., Гудков П.К. Повышение эффективности минераловатных изделий. Монография. М. : Издательство МГСУ. 2012. 160 с.

3. Жуков А.Д., Смирнова Т.В., Гудков П.К. Практикум по технологическому моделированию. Учебное пособие. М. : Издательство МГСУ. 2014. 128 с.

- в объектах интеллектуальной собственности:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618742 от 26 сентября 2012. / Жуков А.Д. Гудков П.К., Чугунков. А.В., Смирнова Т.В., Рудницкая В.А. «GJ-STAT-06. Обработка и аналитическая оптимизация результатов эксперимента». Реестр программ для ЭВМ 26.09. 2012