


На правах рукописи



СУСЛОВЕВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО
ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иваново – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет»
на кафедре «Лесозаготовительные и деревоперерабатывающие производства»

Научный консультант:

доктор технических наук, доцент
Титунин Андрей Александрович

Официальные оппоненты:

Машкин Николай Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерные проблемы
экологии» ФГБОУ ВО «Новосибирский государ-
ственный технический университет»

Сафин Руслан Рушанович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн
изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технологический университет»

Никифоров Александр Леонидович

доктор технических наук, старший научный
сотрудник, профессор кафедры «Пожарная безо-
пасность объектов защиты» ФГБОУ ВО «Иванов-
ская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС
России»


Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир

Защита состоится 19 ноября 2021 г. в 13.00 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехни-
ческий университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, д. 21,
ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО
«Ивановский государственный политехнический университет» (www.ivgpu.com).

Автореферат разослан «___» _____ 2021г.

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



Н.В.Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

На современном этапе развития индустрии строительных материалов согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года большое внимание уделяется вопросам энергоэффективности. Энергоэффективность зданий и сооружений в первую очередь зависит от выбора теплоизоляционного материала со стабильным сопротивлением теплопередаче в изменяющихся температурно-влажностных условиях эксплуатации. Применяемые в настоящее время теплоизоляционные материалы на основе минеральных волокон и термопластов, с одной стороны обладают высокими теплоизоляционными показателями, с другой стороны они имеют ряд недостатков, проявляющихся в процессе температурно-влажностных воздействий, а также исключают возможности их рециклинга.

Другой актуальной проблемой научно-технологического развития РФ в настоящее время является эффективное использование отходов, образующихся при производстве какой-либо продукции. На данный момент не находят применения неиспользуемые отходы прядильных производств, содержащие значительное количество пылевидной фракции и загрязнений, обусловленных сбором данных отходов в процессе производства растительных волокон. Также не полностью решен вопрос с утилизацией мягких отходов деревообработки. Целлюлозосодержащие отходы обладают мелкодисперсной волокнистой структурой и могут обеспечивать требуемую теплоизоляцию при определенных условиях. Данные отходы относятся к возобновляемым источникам сырья, поэтому разработка способа вовлечения их в переработку расширяет ресурсный потенциал производства теплоизоляционных материалов на основе природных биополимеров.

Вовлечение отходов в производство строительных материалов, увеличение глубины переработки природных ресурсов, обеспечение отрасли недорогими, безопасными, экологически чистыми материалами являются актуальными и нашли отражение в «Стратегии развития промышленности строительных материалов и индустриального домостроения на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу до 2030 г.». Также этим вопросам уделено большое внимание в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации. Таким образом, создание эффективных материалов за счет вовлечения в производство отходов местной промышленности направлено на решение комплекса задач, определенных в ряде нормативно-правовых документов общероссийского и местного уровня, соответствует задачам по обеспечению экологической безопасности.

Разработки теплоизоляционного композита из комбинированного наполнителя из растительных отходов и синтетических поликонденсационных или неорганических клеев до настоящего времени в отечественной и мировой практике не проводились. Это в основном объясняется сложностями создания прочной композиции с необходимыми физико-механическими и эксплуатационными показателями, а также недостаточной изученностью невозвратных отходов прядения льняных и хлопковых волокон, т.е. теоретические основы структурообразования данных композитов до настоящего времени не были разработаны.

Таким образом, решение проблемы развития теоретических основ структурообразования композиционных плитных материалов из целлюлозосодержащего сырья является важной и актуальной научной задачей. Решение этой проблемы базируется на выявлении закономерностей влияния физико-химического состава и надмолеку-

лярной структуры целлюлозосодержащих отходов на процессы формирования структуры теплоизоляционных плитных материалов.

Степень разработанности темы исследования. Развитию теории создания новых материалов и прогнозированию их свойств уделяется большое внимание в работах Ю.М. Баженова, В.И. Азарова, Ю.Б. Грунина, В.Т. Ерофеева, А.А. Леоновича, В.М. Хрулева, С.В. Федосова, А.М. Айзенштадта, А.М. Сулейманова, Е.В. Королева, И.Х. Наназашвили, Ю.В. Пухаренко, С.Н. Леоновича, А.Я. Корольченко, М.В. Акуловой, А.И. Христофорова, Н.А. Машкина, А.А. Титунина и др. Научно-практическим аспектами получения композитов из мягких древесных отходов занимались И. Г. Корчаго, Г.М. Шварцман, А.М. Айзенштадт, Р.Р. Сафин и др. Среди зарубежных исследователей отмечаются работы М. Ioelovich, Jiri Militky, K. Azra, H. Binici, D. Watkins, A.K. Mohanty и др. Основополагающими в области исследования процессов тепломассопереноса в композиционных материалах, в том числе на основе целлюлозосодержащих наполнителей, являются работы А.В. Лыкова, Н.И. Ватина, К.Ф. Фокина, Ю.М. Баженова, А.М. Айзенштадта, В.П. Исаченко, С.В. Федосова, А.М. Сулейманова, В.Т. Ерофеева, Б.Н. Кауфмана, А.А. Титунина, В.Г. Гагарина, В.Н. Куприянова, А.Д. Жукова, А.Л. Никифорова и др. Наиболее значимым в области теории обобщенной проводимости в последнее время справедливо считать обобщения и новые результаты, описанные в работах Г.Н. Дульнева, Ю.П. Заричняка, В.И. Оделевского.

На основании проведенного анализа научных трудов российских и зарубежных ученых следует вывод, что в настоящее время в отечественной науке недостаточно разработаны теоретические положения производства композиционных теплоизоляционных материалов из многокомпонентных растительных отходов. Для разработки нового материала необходимо иметь представление о взаимосвязи структуры и свойств наполнителя с теплофизическими параметрами композита и условиями его производства. При этом устойчивое развитие экономики России, организация и функционирование строительного комплекса в условиях развития концепции доступного жилья требуют создания теоретической базы и обоснованных методологических подходов к решению проблемы надежного обеспечения строительства эффективными и доступными строительными материалами, что и определяет актуальность темы диссертационной работы.

Цель и задачи. Цель настоящих исследований заключается в развитии научных основ получения композиционных материалов теплоизоляционного назначения из многокомпонентных отходов промышленных производств и разработка теоретических и методологических принципов управления их структурообразованием.

Данная цель соответствует паспорту специальности 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» пунктам:

1 – разработка теоретических основ получения различных строительных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств,

7 – разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности. В соответствии с поставленной целью в диссертационном исследовании решались следующие **задачи**, отражающие его логику:

- анализ, систематизация и научное обоснование подходов к созданию эффективных теплоизоляционных плитных материалов строительного назначения, в том числе из многокомпонентных отходов промышленных производств, для решения задач по снижению затрат на теплоизоляцию зданий;

- разработка научно обоснованного подхода к управлению структурообразованием строительных материалов на основе растительных отходов местного производства;

- экспериментальное обоснование состава и режимов производства теплоизоляционных композитов с учетом структуры и свойств растительных отходов;

- разработка алгоритма выбора рациональных технологических режимов производства для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств теплоизоляционных композитов на основе многокомпонентных отходов местной промышленности;

- разработка способов повышения огнезащищенности теплоизоляционных композитов из многокомпонентных целлюлозосодержащих отходов;

- технологическое и экономическое обоснование управлением технологическими факторами производства композитов из местных растительных отходов переработки древесины и невозвратных отходов прядения льняных и хлопковых волокон.

Объектом исследования являются теплоизоляционные строительные материалы.

Предметом исследования являются закономерности процесса структурообразования композиционных материалов на основе целлюлозосодержащих отходов и эксплуатационные свойства композитов теплоизоляционного назначения.

Научная гипотеза, выносимая на защиту: получение теплоизоляционных композиционных материалов с необходимым комплексом эксплуатационных свойств из целлюлозосодержащих отходов древесины и отходов прядения льна и хлопка может быть достигнуто в результате научно-обоснованных управляемых технологических воздействий, учитывающих особенности вида и состава многокомпонентного наполнителя и способствующих формированию фронта водородных и ковалентных связей между элементами композита. Для проверки данной гипотезы требуется проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований структуры, состава, свойств исходного сырья и получаемого на его основе композита.

Научная новизна работы. Научной новизной диссертационной работы обладают:

1. Формирование устойчивой структуры композиционного теплоизоляционного материала с требуемым комплексом свойств обеспечивается в результате экспериментально доказанного уменьшения степени полимеризации целлюлозы в отходах льна и хлопка в сравнении с показателем для исходного волокна, и увеличения подвижности микрофибрилл целлюлозы, способствующего их сближению на расстояние, необходимое для создания обширного фронта водородных связей между активными гидроксильными целлюлозы. Дополнительный вклад в механизм структурообразования обеспечивают ковалентные связи между гидроксильными микрофибриллами целлюлозы наполнителя и метилольными группами связующего.

2. Впервые разработаны структурные формулы взаимодействия гидроксильных целлюлозных микрофибрилл между собой и с метилольными группами связующего, которые достоверно отражают структурообразующую роль целлюлозодержащих отходов в формировании композита.

3. Разработанная структурная модель композиционного материала из растительных отходов позволяет управлять выбором значений факторов процесса структурообразования композита, прогнозировать изменчивость значений физико-механических свойств с учетом экспериментально подтвержденного стохастического характера распределения дискретных частиц наполнителя в композите.

4. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности применения моделей общей проводимости для дисперсных материалов применительно к расчету коэффициента теплопроводности, позволяющие прогнозировать тепловые свойства плитных материалов из многокомпонентных целлюлозосодержащих отходов. Теоретически и экспериментально определенные значения коэффициентов теплопроводности композиционных материалов из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, а также с добавкой мягких отходов древесины, которые рекомендуются к применению при проектировании теплозащиты.

5. Экспериментально определенные новые значения фракционного, элементного и химического составов отходов прядения льна и хлопка, которые вносят существенный вклад в представление о свойствах наполнителя и композита, а также служат основой для дальнейших исследований.

6. Разработанные математические модели, позволяющие прогнозировать значения физико-механических показателей композиционных материалов на основе управления технологическими параметрами их производства. Сочетания технологических факторов производства теплоизоляционных материалов, позволяющие повысить их устойчивость к циклическим термовлажностным воздействиям в сравнении с существующими теплоизоляционными материалами на основе минеральных волокон и термопластов.

7. Экспериментально полученные на основе термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии результаты по определению влияния различных замедлителей горения на низшую теплоту сгорания разработанных композитов из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, а также с добавкой мягких отходов древесины.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации изложен научно обоснованный подход к созданию строительных материалов с требуемыми эксплуатационными свойствами из мягких отходов древесины и неиспользуемых отходов прядения льна и хлопка, который заключается в разработке состава и режимов производства новых композиционных теплоизоляционных плитных материалов для различных вариантов наполнителя и связующего; определены значения эксплуатационных показателей нового композиционного материала, рекомендуемые для практического использования при проектировании ограждающих конструкций; предложен алгоритм выбора рациональных технологических режимов производства для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств теплоизоляционных композитов на основе многокомпонентных отходов местной промышленности; обоснован состав основных технологических операций и оборудование для производства композита.

Методологической основой диссертационного исследования послужили методы математического моделирования, дисперсионного и регрессионного анализа, математической статистики, научного прогнозирования, метод конечных элементов, стандартные методы определения прочностных и эксплуатационных свойств композиционных материалов.

Информационная база исследования включает научные источники в виде монографической литературы, публикаций в периодической печати, материалов научных конференций, web-сайтов Интернета. В числе информационных источников использованы законодательные и нормативные акты РФ по вопросам строительства, статистические материалы органов государственной статистики по результатам практической деятельности строительной отрасли, текстильной промышленности и деревообрабатывающего комплекса. В основу диссертации положены результаты собственных расчетов и анализа проблем исследования структурных взаимосвязей в сис-

теме связующего и растительного наполнителя из невозвратных отходов прядения льна и хлопка и мягких древесных отходов для создания композиционного плитного материала теплоизоляционного назначения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Получение теплоизоляционного материала из целлюлозосодержащих наполнителей обеспечивается без активирующего разворачивания поверхностей растительных волокон и основано на формировании необходимого, с точки зрения свойств композита, фронта ковалентных связей между гидроксилами целлюлозы и метилольными группами связующего, а также водородных связей между гидроксилами целлюлозных микрофибрилл.

2. Впервые полученные значения рациональных структурных и режимных параметров процесса получения теплоизоляционного композита из целлюлозосодержащих отходов и матрицы на основе поликонденсационного связующего

3. Разработанные регрессионные модели, отражающие взаимосвязь физико-механических показателей композиционных материалов различной структуры с основными технологическими параметрами их производства, адекватно описывающие процессы структурообразования при различном сочетании массовых долей наполнителя и видов связующего.

4. Впервые полученные значения коэффициента теплопроводности композиционных материалов из целлюлозосодержащих отходов прядения льна, хлопка и мягких отходов древесины.

5. Экспериментально подтвержденная высокая стабильность размеров и стойкость к длительным температурно-влажностным воздействиям теплоизоляционного композита, которая обеспечивается в результате применения многокомпонентных целлюлозосодержащих отходов в качестве наполнителя.

6. Результаты термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии наполнителя и композита с добавкой различных замедлителей горения, подтверждающие возможность создания огнезащищенного композита и обеспечивающие безопасность их использования в строительстве.

Степень достоверности научной гипотезы, выводов и рекомендаций обеспечивается: современными средствами научных исследований, дисперсионного и регрессионного анализа, применением методов математической статистики и современных достижений вычислительной техники; удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов с данными, полученными экспериментальным путем.

Апробация результатов работы. Основные результаты и теоретические положения диссертационной работы представлены и получили одобрение на конференциях и семинарах различного уровня: межвузовской научно-технической конференции «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера» (г. Иваново, 2016 г.); международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2016) (г. Москва, 2016 г.); 67,68-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе» (г. Кострома, 2016, 2017 гг.); V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства», (г. Краснодар, 2017 г.); 19th International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport 2017, EMMFT 2017 (г. Хабаровск, 2017 г.), I, II Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и техноло-

гии» (г. Иваново, 2017, 2018 гг.); XII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной Году гражданской обороны, (г. Химки, 2017 г.); Международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (г. Челябинск, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.), Международной научно-Сибирский транспортный форум – “Транссибирь-2018” International Scientific Siberian Transport Forum «TransSiberia 2018» (г. Новосибирск, 2018); Международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (Integration, partnership and innovations in construction science and education-2018) (г. Москва, 2018 г.); V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, 2018 г.); XXVIII Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь» (Московская область, г. о. Химки, мкр. Новогорск, 2018 г.); VI Международном симпозиуме имени Б.Н. Уголева «Строение, свойства и качество древесины – 2018», посвященном 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения (г. Красноярск, 2018 г.); II Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии» (г. Калининград, 2019 г.); Международной научно-технической конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies) (г. Владивосток, 2019, 2020, 2021 гг.).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 59 работ, в т.ч. 18 статей в изданиях, рекомендованных ВАК.

Подана заявка на полезную модель «Огнезащищенный композиционный плитный материал», регистрационный № 2020127646.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, общих выводов, библиографического списка из 317 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 414 страницах машинописного текста, содержит 109 рисунков, 82 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, научная новизна, определены задачи исследований, а также представлены сведения о реализации основных результатов.

В первой главе «Современное состояние и проблемы использования целлюлозосодержащих отходов» представлен анализ состояния ресурсов растительных отходов и существующих направлений их использования и обоснована актуальность решения проблемы рационального использования образующихся растительных отходов путем создания теплоизоляционных композитов с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

Растительное сырье – лес и однолетники является самым ценным природным ресурсом. Использование этого ресурса должно быть рациональным, с обеспечением комплексной переработки. Лесной фонд России занимает второе место в мире по запасам древесины, основная масса приходит на хвойные породы – наиболее ценный вид древесного сырья. Значительный лесной ресурс имеет Костромская область, она

является самой лесообеспеченной территорией Центрального федерального округа (лесистость составляет 74,2 %) и занимает шестое место по запасам древесины в европейской части Российской Федерации. Это обуславливает развитие лесной и деревообрабатывающей промышленности. На 2018 г. на территории Костромской области зарегистрировано 740 действующих предприятий и организаций лесопромышленного комплекса. Освоение значительного лесного ресурса ЦФО и России в целом неизбежно сопровождается образованием больших объемов отходов. Распоряжением от 25 января 2018 г. № 84-р Правительство РФ утвердило Стратегию развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. В разделе "Отходы сельского и лесного хозяйства, животноводства, растениеводства, пищевые отходы" указано, что «на лесопромышленных комплексах и деревоперерабатывающих комбинатах ежегодно образуется свыше 200 млн м³ отходов древесины». Кроме древесины дополнительным ресурсом является недревесное сырье – однолетники. Потенциальный ресурс недревесного сырья в мире превышает 1 млрд т, причем в общем объеме используемого растительного сырья недревесное занимает порядка 5 %. Если измельченную солому однолетников или костру льна ограничено используют для производства теплоизоляционных плит, некоторые виды пентозансодержащего растительного сырья используют в гидролизных производствах, то пылевидные отходы прядения льна и хлопка являются невозвратными. Практически все невозвратные отходы хлопка и льна сжигаются или вывозятся в отвалы, хотя такая утилизация не только является затратной, но и негативно влияет на экологию. Образующиеся продукты сгорания и несгоревшие частицы отрицательно влияют на окружающую среду. На большинстве предприятий, особенно средней мощности, не имеющих возможность утилизировать данные отходы, скапливаются залежи отходов, захламляющих территорию, загрязняющих водоемы и представляющих определенную пожарную опасность.

Выводы многих исследований, и в первую очередь по онкологическим заболеваниям, касаются в основном старых технологий сжигания отходов, однако, и современные технологии, введенные в действие в последние несколько лет, продолжают приносить вред здоровью человека. Даже использование высокотехнологичных фильтров, сокращающих при сжигании отходов выбросы токсичных веществ в атмосферу, не может предотвратить загрязнение окружающей среды продуктами сгорания.

Сложившаяся ситуация делает совершенно необходимым поиск новых, более совершенных интенсивных способов переработки растительных отходов, в результате которых образовывалось бы меньше побочных и вредных продуктов, а сама технология была бы экологически чистой.

Комплексная совместная переработка мягких отходов древесины и пылевидных отходов прядения льна и хлопка до настоящего времени не производилась, в числе прочих причин, из-за отсутствия научно обоснованных подходов к решению задачи.

Во второй главе «Развитие теоретических основ структурообразования и свойств композиционных материалов из отходов растительного сырья» рассмотрен анализ теоретических исследований в области структурообразования теплоизоляционных композитов из растительных наполнителей. Основным структурообразующим компонентом данных наполнителей является целлюлоза. Наличие в целлюлозе системы внутри- и межмолекулярных Н-связей приводит к тому, что несколько целлюлозных цепей соединяются друг с другом посредством водородных связей между

гидроксильными группами и межмолекулярных сил с малой энергией взаимодействия (ван-дер-ваальсовыми связями) таким образом, что образуется жесткая пространственная структура. Уникальная способность растительных волокон к межволоконному связеобразованию, определяемая взаимодействием целлюлозы с водой и не требующая каких-либо дополнительных связующих, дает технологии производства материалов на основе растительных волокон неоспоримые преимущества перед любыми волокнами иного происхождения. Межволоконные силы связи являются совокупностью водородных связей, сил Ван-дер-Ваальса и сил трения между волокнами. Относительный вклад каждой составляющей в общее связеобразование обусловлен физико-химическими и структурно-морфологическими свойствами волокон, а также степенью их разработки. Получаемые при размолке отдельные древесные волокна и пучки характеризуются слабо развитой поверхностью, покрытой преимущественно лигнином, который обладает незначительными адгезионными свойствами. Развитие взаимодействия между древесными волокнами интенсивно происходит на стадии горячего прессования. Оно сопровождается химическими изменениями древесного комплекса и протекает с образованием межмолекулярных и химических связей как на границе между отдельными волокнами, так и в клеточных стенках.

С учетом выше изложенного структурообразование волокнистого композита происходит за счет создания связей двух видов: 1 – ковалентных связей между гидроксилами целлюлозы и метилольными группами связующего; 2 – водородных связей между гидроксилами целлюлозных микрофибрилл.

Схема химического взаимодействия между макромолекулой гидроксилами целлюлозы и метилольной группой карбамидоформальдегидного связующего, протекающего с отщеплением воды при воздействии температуры, представлена на рисунке 1. В результате взаимодействия формируется эфирная связь $\text{CH}_2\text{--O--CH}_2$.

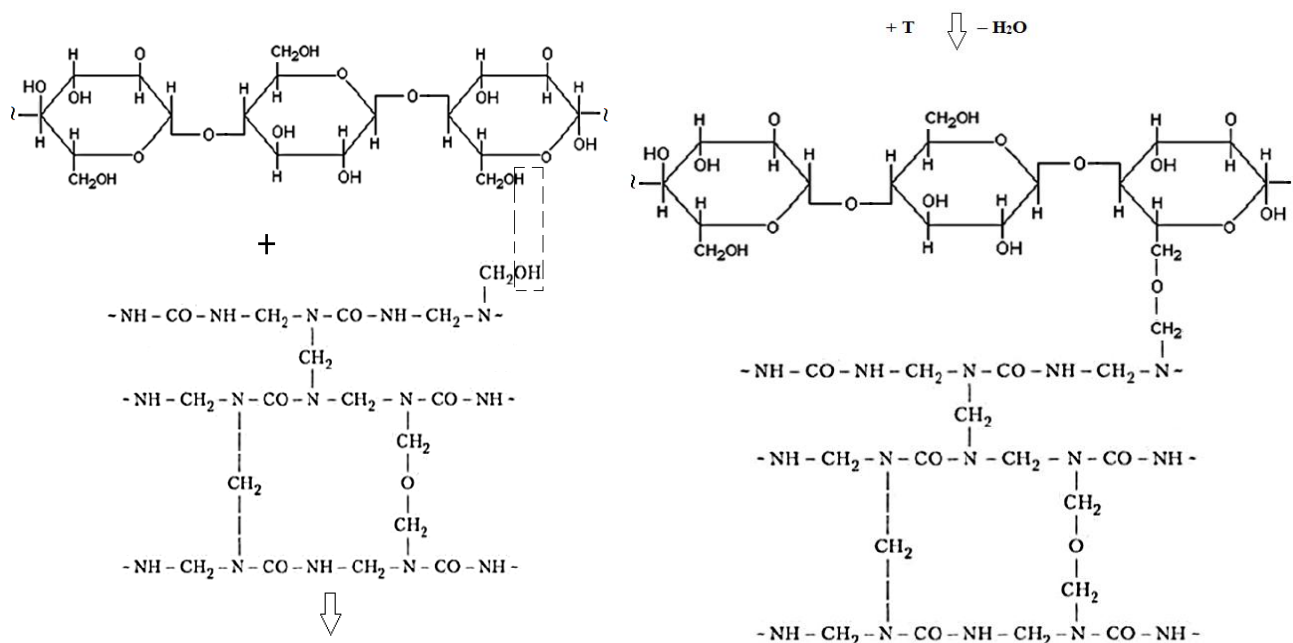


Рисунок 1 – Схема взаимодействия макромолекулы целлюлозы наполнителя композита с отверждающимся карбамидоформальдегидным связующим с отщеплением воды

Таким образом, формируется химическое адгезионное взаимодействие между растительным наполнителем и поликонденсационным связующим.

Вторая составляющая процесса структурообразования композита – формирование фронта водородных связей между гидроксилами целлюлозы растительного наполнителя, представлена на рисунке 2.

Процесс создания структуры композита зависит от структуры наполнителя и взаимодействия со связующим. Это объясняет процессы, происходящие в композите на стадиях производства и эксплуатации. Любая задача из области стационарных потоков может считаться задачей, находящейся в компетенции теории обобщенной проводимости (ТОП).

Наиболее значимым в области ТОП в последнее время справедливо считать обобщения и новые результаты, описанные в работах Г.Н. Дульнева и Ю.П. Заричняка.

Композиционный материал на основе растительных отходов и поликонденсационного связующего можно рассматривать как дисперсную систему, которую можно считать высоконаполненной, т. е. массовая доля растительного наполнителя много больше, чем массовая доля матрицы. К особенностям такой дисперсной системы, как мягкие композиты мокрого способа производства на основе растительных наполнителей и поликонденсационного связующего относится то, что они являются высоконаполненными, т. е. массовая доля растительного наполнителя много больше, чем массовая доля матрицы – поликонденсационного связующего, которое в данном случае играет роль диспергируемой фазы. С учетом выше изложенного разработана структурная модель композиционного материала (рисунок 3). Из рисунка 3 видно, что компоненты структурной модели композиционного материала расположены в хаотичном порядке и различно ориентированы относительно друг друга. Это объясняется особенностями процесса формирования композиционного материала применительно к существующим технологиям производства материала-аналога.

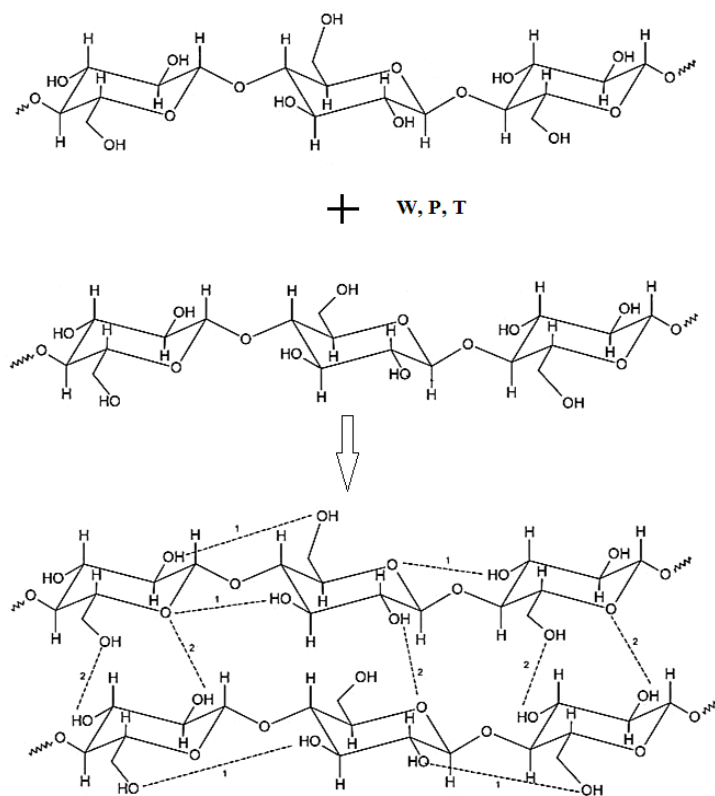


Рисунок 2 – Формирование водородных связей между микрофибриллами

Взаимодействие между компонентами композиционного материала осуществляется посредством молекул и воды, в основном, за счет водородных связей. Частицы наполнителя из отходов прядения имеют значительные повреждения и большую удельную поверхность, поэтому связующее покрывает только часть поверхности наполнителя. Частицы пылевидной фракции имеют значительную удельную поверхность – более $3 \text{ м}^2/\text{г}$.

Установление закономерностей влияния физико-химического состава и надмолекулярной структуры невозвратных отходов льна и хлопка на процессы формирования структуры теплоизоляционных плитных материалов является важной научной

задачей в решении проблемы развития теоретических основ структурообразования композиционных плитных материалов из целлюлозосодержащего сырья.

С учетом особенностей структурообразования композиционного материала и наличия связей объясняются его физико-механические и эксплуатационные показатели, в том числе – теплопроводность.

Для оценки коэффициента теплопроводности композиционного материала из невозвратных растительных отходов прядения льняных и хлопковых волокон и синтетических поликонденсационных связующих были использованы методы теории обобщенной проводимости.

Коэффициент теплопроводности двухкомпонентного материала можно определить по формуле В.И. Оделевского:

$$\lambda_{эфф} = \frac{2(1-n)\lambda_1 + (1+2n)\lambda_2}{(2+n) + (1-n)\lambda_2/\lambda_1}, \quad (1)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности непрерывной (большей по объему) фазы, Вт/(м·К); λ_2 – коэффициент теплопроводности диспергируемой фазы, Вт/(м·К); n – массовая доля диспергируемой фазы, $n \leq 0,4$.

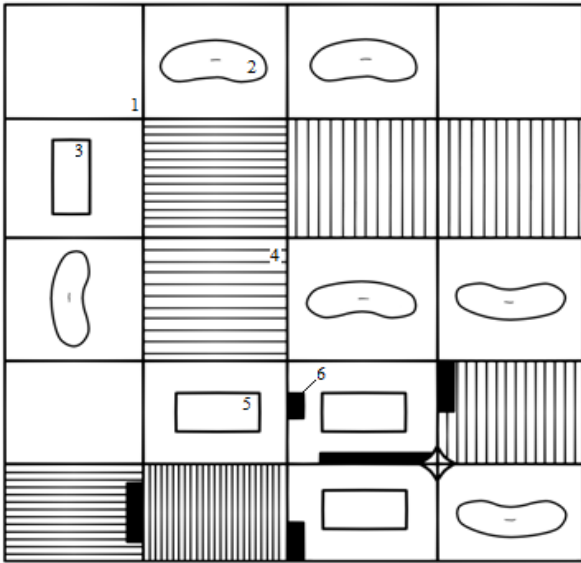


Рисунок 3 – Структурная модель композиционного материала (один слой): 1 – воздух; 2, 3, 5 – наполнитель (отходы хлопкового волокна, отходы льняного волокна, отходы древесины); 4 – вода; 6 – связующее

Коэффициент теплопроводности трехкомпонентного материала можно определить по формуле В.И. Оделевского:

$$\lambda = \lambda_{св} \left\{ \frac{V_1}{1-V_{св}} \left[1 - \frac{1-V_{св}}{\frac{1}{(1-\nu_1)} - \frac{V_{св}}{3}} \right] + \frac{V_2}{1-V_{св}} \left[1 - \frac{1-V_{св}}{\frac{1}{(1-\nu_1)} - \frac{V_{св}}{3}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\nu_1 = \lambda_1 / \lambda_{св}$; $\nu_2 = \lambda_2 / \lambda_{св}$; λ , $\lambda_{св}$, λ_1 , λ_2 – коэффициенты теплопроводности композиции, связующего, первого и второго наполнителя соответственно; $V_{св}$, V_1 , V_2 – объемные доли связующего, первого и второго наполнителя соответственно.

Для анализа влияния исходных компонентов на теплопроводность композита, в частности – определения температуры, возникающей в материале при воздействии приложенных к системе источников тепловой энергии предлагается использовать модуль тепловых расчетов COMSOL.

Решение этой задачи возможно при наличии соответствующего программного обеспечения. В данном случае использовался программный модуль тепловых расчетов в среде COMSOL Multiphysics.

В работе рассмотрен однослойный элемент материала в виде тонкой пластины. Длина пластины соответствует толщине теплоизоляционного слоя композита в некоторой ограждающей конструкции. Результат генерации взаимного расположения компонентов в композите представлен на рисунке 4.

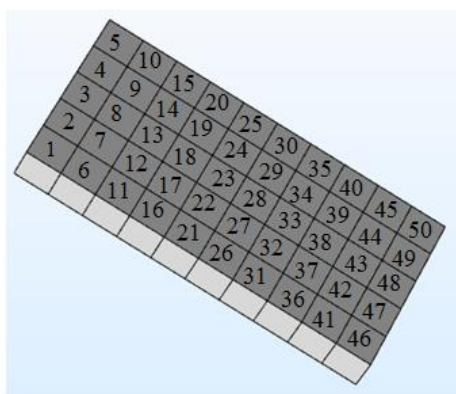
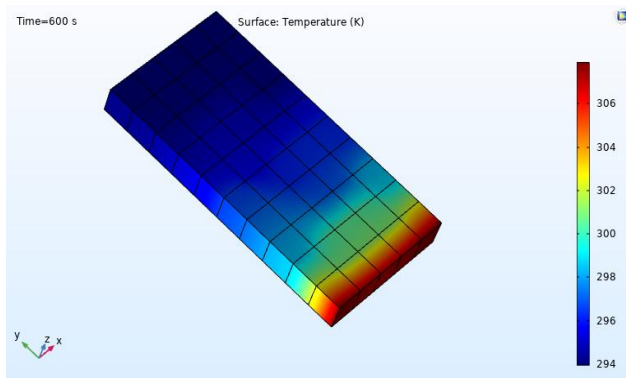
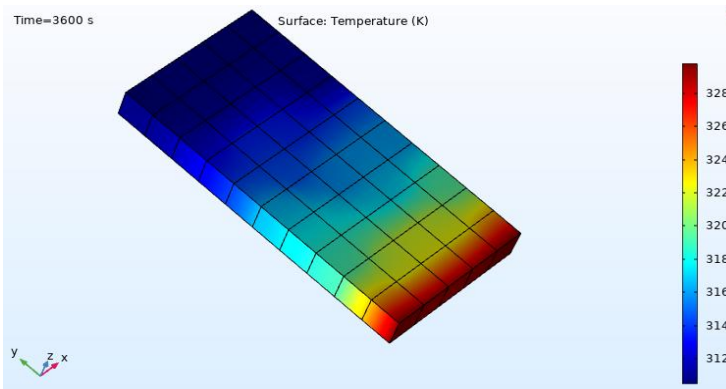


Рисунок 4 – Схема расположения компонентов:

9, 20, 27, 38 – воздух; 3, 15, 22, 29, 36 – вода; 2, 4, 7, 10, 17, 18, 26, 28, 30, 31, 34, 40, 42, 43, 44 – связующее; 1, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 23, 24, 25, 32, 33, 35, 37, 39, 41, 45, 46, 47, 48, 49, 50 – наполнитель

В эксперименте использовались следующие параметры временного анализа: время моделирования – 3600 с, шаг моделирования – 600 с, начальная температура 20 °С, мощность теплового потока 10 Вт.

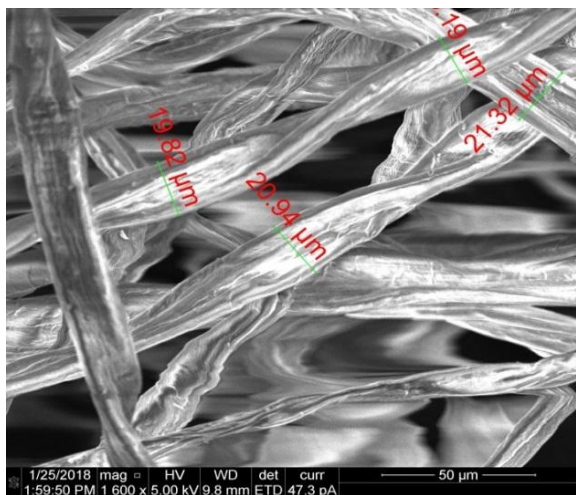
В данном случае рассматривается нестационарный процесс, соответствующий реальным условиям работы конструктивного элемента. Получена графическая интерпретация результатов расчета температурных полей в различные моменты времени в пределах заданного временного интервала (рисунки 5, 6). Анализ результатов показал, что компоненты, состоящие из воды и связующего, интенсивнее проводят тепло, чем из воздуха и наполнителя, что подтверждает общие положения теплопроводности.

Рисунок 5 – Результаты расчета, $\tau=600$ с.Рисунок 6 – Результаты расчета, $\tau=3600$ с.

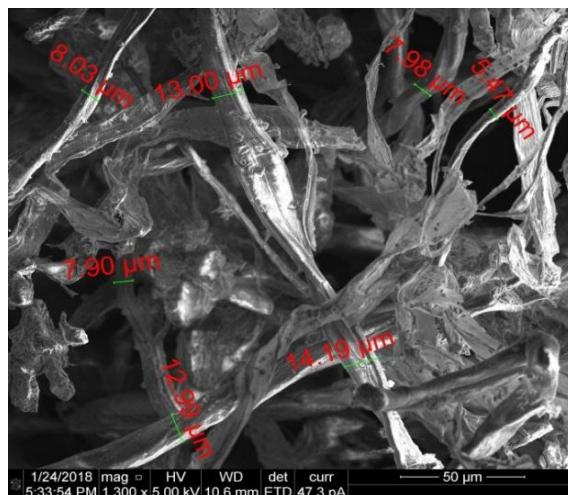
Полученные значения температуры использованы для расчета коэффициента температуропроводности, характеризующего скорость изменения температуры в материале и зависящего от теплофизических свойств исходных компонентов. Для ДВП мокрого способа прессования с плотностью $\rho=300$ кг/м³ коэффициент температуропроводности $a=1,01 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Таким образом, для композита на основе растительных отходов значение коэффициента температуропроводности почти в 6,5 раз ниже, чем для материалов аналогов.

В третьей главе «Исследование структуры и свойств целлюлозосодержащих отходов» определены значения показателей ранее не исследованного сырьевого ресурса для производства композиционных плит – неиспользуемых отходов прядения льняных и хлопковых волокон: химический и поэлементный состав; физические показатели – фракционный состав, геометрические размеры, водопоглощение. При использовании растительных отходов для производства плитных материалов строительного назначения необходимо учитывать основные параметры сырья – форму, геометрические размеры, фракционный состав. Различия в параметрах сырья существенно сказываются на значении физико-механических показателей производимого из него материала.

Фотографии растительных отходов и композита из них, выполненные авторами с использованием микроскопа Quanta 3D FEG FEI Company, представлены на рисунках 7–10.

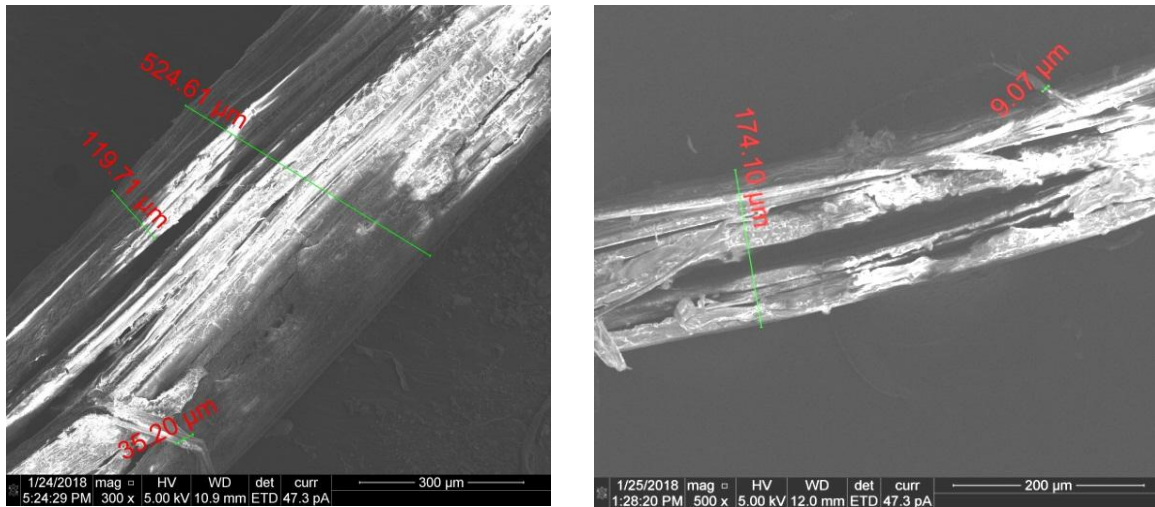


а



б

Рисунок 7 – Изменение структуры и размеров растительного наполнителя при переработке: а – волокна хлопка; б – отходы переработки хлопка

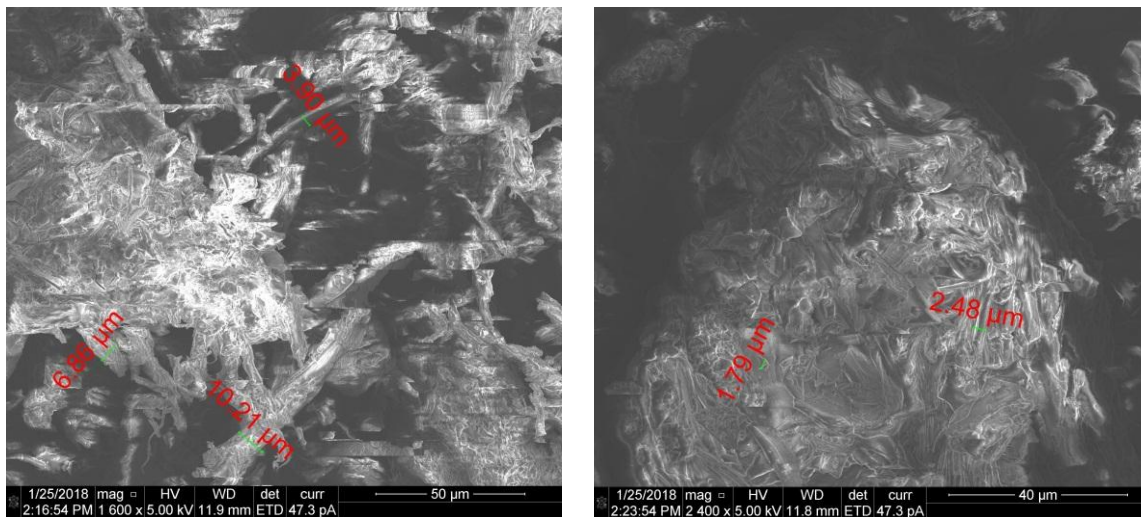


а

б

Рисунок 8 – Изменение структуры и размеров растительного наполнителя при переработке: а – волокна льна; б – отходы переработки льна

Сложности использования отходов в качестве наполнителя композиционных плит обусловлены значительным повреждением растительных волокон, увеличением впитываемости связующего в наполнитель, большой удельной поверхностью частиц. Об этом можно судить по фотографиям растительных отходов, полученным в ходе исследований.



а

б

Рисунок 9 – Структура и размеры растительного наполнителя: а – стружка сосны; б – кора сосны

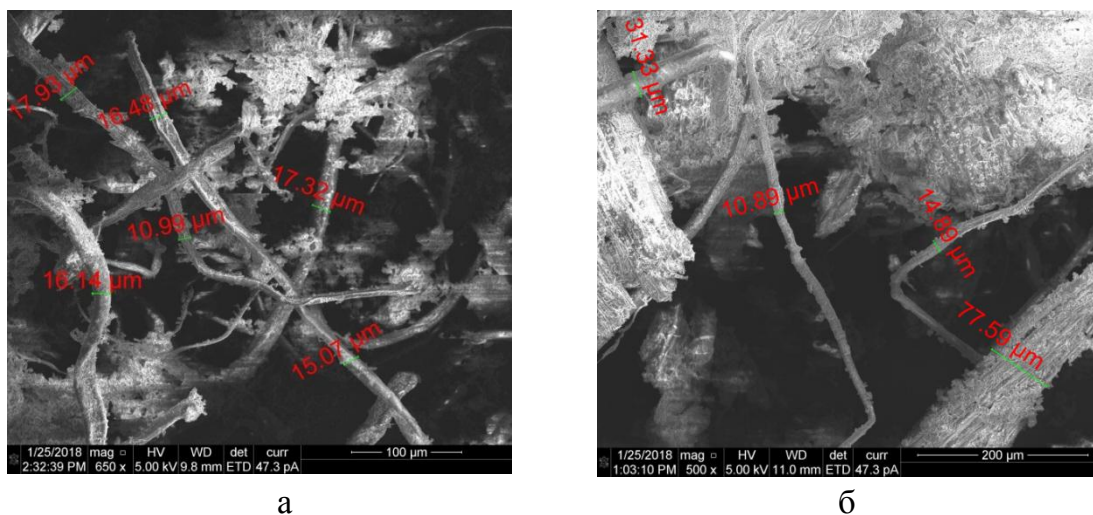


Рисунок 10 – Структура и размеры растительного наполнителя в композите: а – отходов хлопкового волокна на фенолформальдегидном связующем; б – отходов льняного волокна на карбамидоформальдегидном связующем

В настоящее время информация о химическом составе отходов хлопко- и льно-пряжильных производств отсутствует. В ходе исследований определено содержание целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблицах 1, 2.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о целесообразности использования отходов прядения льняных и хлопковых волокон в качестве наполнителя композиционных плитных материалов теплоизоляционного назначения.

В четвертой главе «Получение композиционных плитных материалов из отходов производства растительных волокон» представлены результаты экспериментальных исследований по разработке состава плитных композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами и изучена целесообразность их использования.

Таблица 1 – Средние значения содержания целлюлозы и лигнина в образцах

Растительное сырье	Показатели целлюлозы		Содержание лигнина, %
	Содержание, %	Степень полимеризации	
Стружка-отходы (сосна)	42,0	150	25,7
Стружка-отходы (ель)	53,8	150	28,0
Стружка-отходы (береза)	33,6	200	23,0
Кора (сосна)	16,5	-	24,0
Кора (береза)	18,0	-	20,5
Хлопковое волокно	93,20	2600	0,10
Льняное волокно	84,79	4700	2,58
Отходы хлопка	43,96	310	22,69
Отходы льна	53,97	970	24,93
Коробочки, стебель	36,46	1130	27,23
Костра	50,80	2290	29,72

Таблица 2 – Средние значения содержания экстрактивных и минеральных веществ в образцах, %

Растительное сырье	Водорастворимые вещества*	Пентозаны/фурфурол	Зольность
Стружка-отходы (сосна)	1,85	12,14/6,74	0,3
Стружка-отходы (ель)	1,70	9,5/5,27	0,2
Стружка-отходы (береза)	19,3	21,8/12,1	0,3
Кора (сосна)	6,88	9,67/5,2	5,5
Кора (береза)	0,9	3,1/1,72	3,5
Хлопковое волокно	1,60	1,12/0,62	1,30
Льняное волокно	4,05	5,85/3,25	0,50
Отходы хлопка	0,01	0,73/0,40	17,02
Отходы льна	0,02	2,07/1,15	5,18
Коробочки, стебель	0,80	7,08/3,77	17,90
Костра	0,20	15,49/8,61	1,50

* растворимые в горячей воде

Из растительных материалов были изготовлены образцы композитов по технологии древесноволокнистых плит мокрого способа производства. В качестве вариантов связующего для композиционного материала были выбраны: смола фенолформальдегидная марки СФЖ-3014; жидкое стекло – $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$, (модуль $n = 1,6 \dots 3,75$) и алюмохромфосфатное связующее $\text{CrAl}_3(\text{H}_2\text{PO}_4)_n$, ($n = 8,8 \dots 9,6$). Композиционный материал теплоизоляционного назначения изготавливался средней плотности 275 кг/м^3 , расход связующих варьировался от 0 % до 30 % от массы наполнителя. Образцы материала сушились при 20 °С, 100 °С, 160 °С до влажности $(8 \pm 1) \%$.

На рисунках 11–13 представлены зависимости средних значений предела прочности при статическом изгибе, разбухании по толщине, водопоглощения для композиционных материалов от массовых долей добавки связующего для образцов при сушке 100 °С.

В таблице 3 приведены зависимости прочности, разбухания по толщине, водопоглощения композиционных плитных материалов (Y) от доли добавки связующего (x). Повышение прочности, как правило, выражается функцией разной сложности, начиная от простой показательной функции. В работе получены зависимости, начиная с показательной функции и до полиномов четвертой степени, для каждой модели приведены значения достоверности аппроксимации.

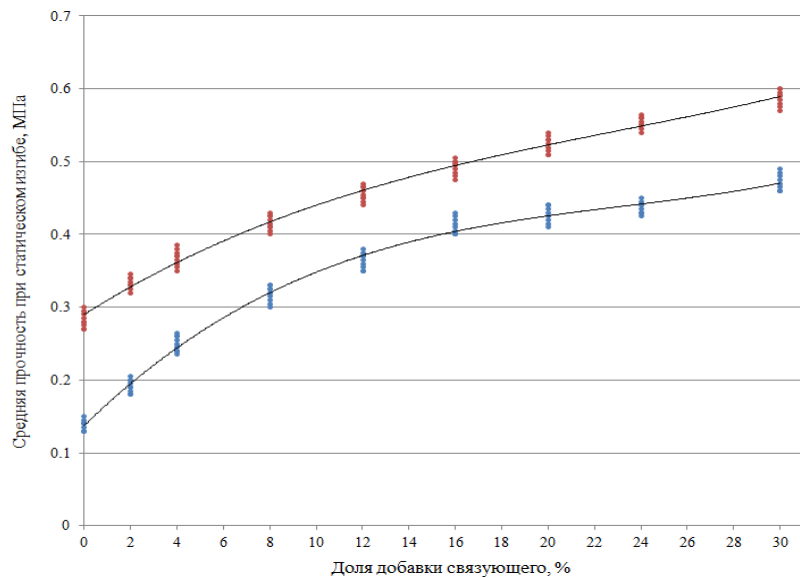


Рисунок 11 – Зависимость предела прочности от массовых долей добавки фенолформальдегидного связующего, где • – для плит из хлопка, • – для плит из льна

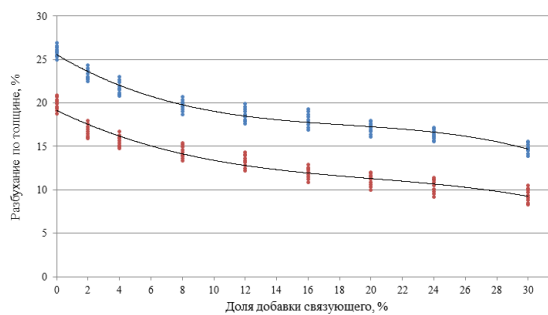


Рисунок 12 – Зависимость разбухания по толщине от массовых долей добавки фенолформальдегидного связующего, где • – для плит из хлопка, • – для плит из льна

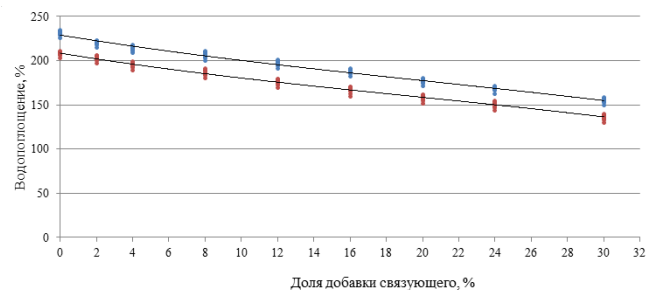


Рисунок 13 – Зависимость водопоглощения от массовых долей добавки фенолформальдегидного связующего, где • – для плит из хлопка, • – для плит из льна

Доказано, что компоненты композита по-разному реагируют на колебания температуры и влажности. Лигноцеллюлозный наполнитель в данных условиях длительное время является достаточно стойким. Значительный вклад в представления о структурообразовании древесных композиционных материалов строительного назначения внес В.М. Хрулев. Следует отметить, что теплоизоляционные материалы как элемент строительных конструкций также подвергаются воздействию изменений температуры и влажности. Применительно к условиям использования, они должны сохранять эксплуатационные показатели при изменениях температуры и влажности, обусловленных атмосферными воздействиями.

На рисунках 14, 15 представлены зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит из отходов льна и хлопка после циклов температурно-влажностных воздействий, на рисунке 16 – зависимости данного показателя для ДСтП, плит из отходов льна и хлопка на фенолоформальдегидном связующем.

Таблица 3 – Зависимости показателей композиционных плитных материалов от доли добавки фенолформальдегидного связующего

Композиционный материал	Зависимости показателей плит Y , % от доли добавки связующего x	Достоверность аппроксимации R^2
-------------------------	---	-----------------------------------

	прочности	
Композиты из хлопка на ФФС	$Y = -0,0001x^2 + 0,0119x + 0,0479$	0,9771
Композиты из льна на ФФС	$Y = -0,0002x^2 + 0,0119x + 0,1954$	0,6969
	разбухание по толщине	
Композиты из хлопка на ФФС	$Y = -0,0077x^2 - 0,5352x + 28,108$	0,7791
Композиты из льна на ФФС	$Y = 0,0084x^2 - 0,543x + 22,944$	0,7928
	водопоглощение	
Композиты из хлопка на ФФС	$Y = 0,0306x^2 - 3,4353x + 273,09$	0,9801
Композиты из льна на ФФС	$Y = 0,026x^2 - 3,2501x + 217,8$	0,9841

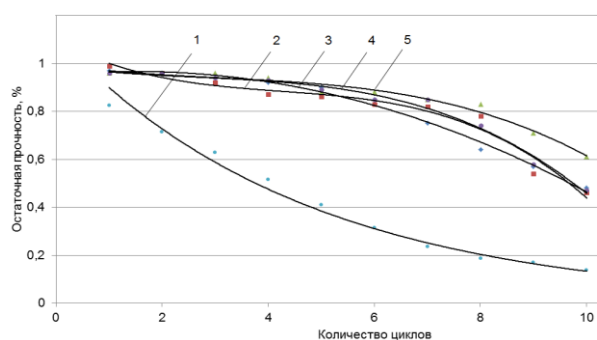


Рисунок 14 – Зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит из отходов льна после циклов температурно-влажностных воздействий:

1 – ДСтП на ФФС; 2 – композит из льна на АХФ; 3 – композит из льна на ЖС; 4 – композит из льна на КФС; 5 – композит из льна на ФФС

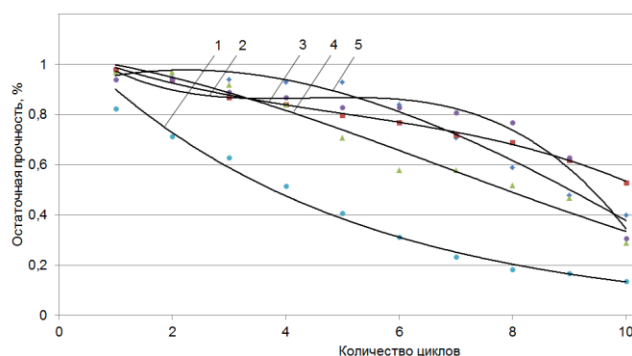


Рисунок 15 – Зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит из отходов хлопка после циклов температурно-влажностных воздействий: 1 – ДСтП на ФФС; 2 – композит из хлопка на АХФ; 3 – композит из хлопка на ЖС; 4 – композит из хлопка на КФС; 5 – композит из хлопка на ФФС

По результатам экспериментального исследования установили, что композиты имеют намного более высокую стойкость к циклическим воздействиям температуры и влажности, чем древесно-стружечные плиты.

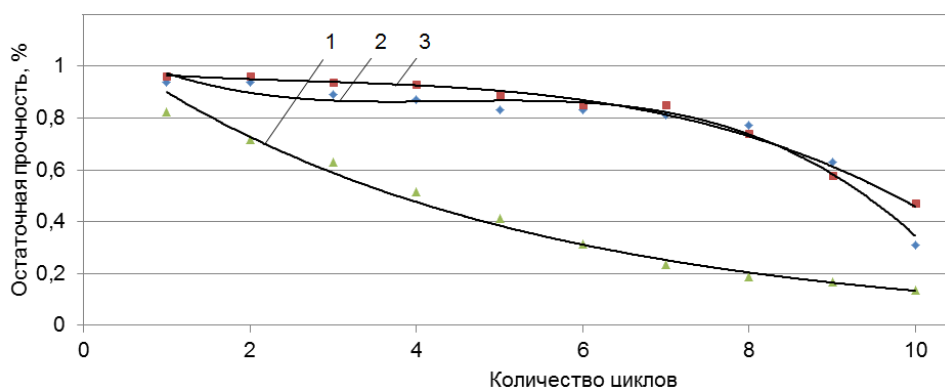


Рисунок 16 – Зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит на ФФС после циклов температурно-влажностных воздействий:

1 – ДСтП; 2 – композит из хлопка; 3 – композит из льна

После обработки экспериментальных данных были получены регрессионные модели для анализа физико-механических показателей теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины хвойных пород на фенолформальдегидном связующем: $\sigma_{\text{и}}$ – прочность при статическом изгибе, МПа; h – разбухание по толщине за 24 часа, %; W – водопоглощение, %. в зависимости от доли добавки связующего X_1 , температуры сушки X_2 , доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя X_3 :

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{\text{и}} = 0,6 - 0,0006 P_{\text{св}} - 0,004 T_{\text{суш}} - 0,002 D_{\text{др}} + 0,00006 P_{\text{св}}^2 + 0,00002 T_{\text{суш}}^2 + + 0,00004 D_{\text{др}}^2 - 0,00001 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} - 0,00002 P_{\text{св}} D_{\text{др}} - 0,00001 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}. \quad (3)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$h = 28,43 - 0,21 P_{\text{св}} - 0,16 T_{\text{суш}} + 0,1 D_{\text{др}} - 0,001 P_{\text{св}}^2 + 0,0004 T_{\text{суш}}^2 - - 0,0009 D_{\text{др}}^2 + 0,0004 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} + 0,0005 P_{\text{св}} D_{\text{др}} - 0,0003 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}. \quad (4)$$

- водопоглощение

$$W = 181,83 - 0,83 P_{\text{св}} + 0,79 T_{\text{суш}} + 0,82 D_{\text{др}} - 0,016 P_{\text{св}}^2 - 0,0034 T_{\text{суш}}^2 - - 0,0078 D_{\text{др}}^2 - 0,002 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} + 0,0022 P_{\text{св}} D_{\text{др}} - 0,0015 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}. \quad (5)$$

При увеличении доли добавки связующего и температуры сушки композита снижается разбухание плит по толщине и водопоглощение после пребывания в воде. Причиной повышения водостойкости композита является увеличение числа клеевых связей и углубление степени поликонденсации фенольного связующего. Увеличение содержания мягких древесных отходов в наполнителе вызывает рост разбухания плит по толщине. Большое количество поврежденных растительных клеток в древесных отходах приводит к увеличению впитываемости связующего в полости клеток. Это явление уменьшает число клеевых контактов между частицами наполнителя.

С увеличением доли добавки ФФС прочность композитов растет. При максимальной доле добавки ФФС плиты имеют наибольшее значение предела прочности при любой температуре сушки композита. Это объясняется тем, что увеличивается количество клеевых связей между частицами наполнителя и растет число закрытых пор. С увеличением доли добавки мягких отходов древесины прочность композита снижается. При максимальной температуре сушки плит и максимальной доле связующего добавка в наполнитель 50 % мягких древесных отходов позволяет обеспечить прочность плит при статическом изгибе более 0,4 МПа, что отвечает требованиям, предъявляемым к материалу-аналогу (теплоизоляционным мягким ДВП). При этом разбухание по толщине ниже, чем у материала-аналога и не превышает 7...8 %. Следует также учитывать то, что большее содержание полимера в композите будет снижать сорбцию влаги в процессе эксплуатации теплоизоляционного материала. Повышение водостойкости композита препятствует снижению теплоизоляционных свойств при росте влажности.

Более низкие значения физико-механических показателей теплоизоляционных композиционных плит из древесных отходов также объясняются различиями в струк-

туре растительных отходов. Значительное измельчение древесных стружек по длине и ширине, большое количество перерезанных древесных волокон вызывает повышенное впитывание связующего в поврежденные древесные клетки. Сказывается также наличие аморфной составляющей лигнина и гемицеллюлоз между микрофибриллами целлюлозы. Это затрудняет формирование водородных связей и создание прочной структуры композита.

Процесс разрушения образца обусловлен одновременным разрывом некоторого количества химических связей между активными группировками лигноцеллюлозного наполнителя и макромолекул связующего. Вклад в прочность образцов композита вносят также водородные связи между макромолекулами целлюлозы частиц наполнителя, однако на данную составляющую вид связующего не влияет, она обусловлена режимами изготовления образцов. Поскольку на всех уровнях эксперимента используется связующее, по сути, являющееся полимерной системой, то прочность сопротивления разрушающей нагрузке является следствием не только межмолекулярного взаимодействия, но и жесткости цепи. Для жесткосетчатых связующих, таких как КФС и ФФС, большее число макромолекул вовлекается в ориентационное движение под действием внешней нагрузки, что приводит к разрыву большого числа связей.

Уменьшение степени полимеризации целлюлозы в отходах прядения льна и хлопка не приводит к ухудшению физико-механических показателей композиционных плит, изготовленных из данных растительных наполнителей. Уменьшение длины жесткоцепной полимерной цепочки придает ей большую подвижность и обеспечивает более обширный фронт водородных связей при структурообразовании композита.

В пятой главе «Исследование теплофизических свойств композиционных материалов из отходов производства растительных волокон» представлены результаты определения коэффициента теплопроводности, как одного из основных показателей теплофизических свойств материалов.

В работе экспериментально определен коэффициент теплопроводности композиционных материалов из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, мягких отходов древесины, производимых по технологии мягких древесноволокнистых плит. Приведены значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные с использованием математических моделей. Композиты на основе отходов льна как на основе терморезистивных связующих, так и неорганических, имеют большее значение теплового сопротивления и более низкий коэффициент теплопроводности в сравнении с плитами из отходов хлопка.

При использовании массовой доли диспергируемой фазы – отвержденного связующего в пределах 0,01...0,13 сходимость теоретических расчетных и экспериментальных значений коэффициента теплопроводности композитов составляет 0...5,26 %. Это подтверждает выдвинутую гипотезу о возможности использования математической модели теплопроводности для дисперсных двухкомпонентных и трехкомпонентных систем при расчете коэффициента теплопроводности композиционных плит из растительных наполнителей и синтетических связующих.

Оценить размерную стабильность материала внутри ограждающей конструкции неразрушающими методами невозможно, поэтому при исследовании теплопроводности материала необходимо также учитывать изменение его геометрических показателей при воздействии влаги.

Зависимости разбухания по толщине и коэффициента теплопроводности материала от влагопоглощения представлены на рис. 17, 18.

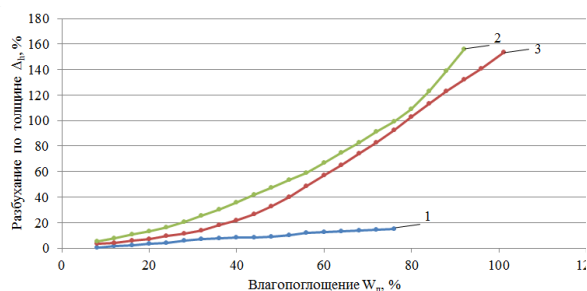


Рисунок 17 – Зависимости разбухания плит по толщине Δh от влагопоглощения: 1 – композиты из хлопка на ФФС; 2 – ДСтП на ФФС; 3 – минеральная вата

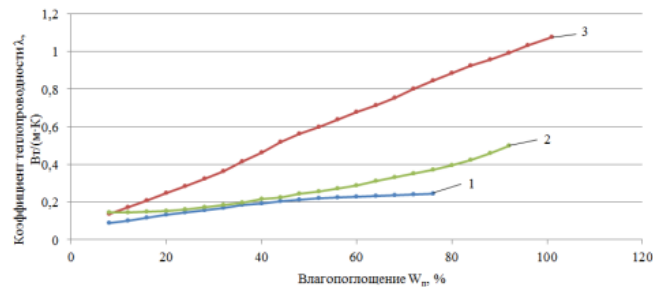


Рисунок 18 – Зависимости коэффициента теплопроводности плит от влагопоглощения: 1 – композиты из хлопка на ФФС; 2 – ДСтП на ФФС; 3 – минеральная вата

Увлажнение теплоизоляционного материала, т.е. замещение содержащегося в его порах воздуха водой, имеющей коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,5 \text{ Вт/(м·К)}$, т.е. в 23 раза больше, чем у воздуха, приводит к возрастанию теплопроводности. При этом по мере заполнения полостей клеток водой скорость изменения функции $\lambda = f(W)$ постепенно уменьшается.

Кроме того, влага в порах плитных материалов увеличивает размеры контактных площадок между частицами, что также повышает коэффициент теплопроводности. На влагопоглощение материала влияет также вид связующего и его способность создавать связи с активными группировками наполнителя, способными химически связывать воду.

Минеральные волокна не имеют химических или водородных связей с фенолоформальдегидным связующим, их адгезионное взаимодействие является механическим. Поэтому при поглощении материалом влаги частицы расходятся на значительные расстояния, с ростом влагопоглощения увеличивается толщина образцов материала и коэффициент теплопроводности.

Связи между гидроксильными группами частиц целлюлозного волокнистого наполнителя и отвержденным термореактивным (или минеральным) связующим создают большее количество закрытых пор, снижая поглощение влаги материалом. Это улучшает размерную стабильность и снижает рост коэффициента теплопроводности при поглощении влаги композитами на основе растительных наполнителей.

При моделировании процессов, протекающих в теплоизоляционном материале при увеличении содержания влаги, необходимо учитывать, что взаимосвязь увлажнения и размерной стабильности материала оказывает существенное влияние на теплопроводность. Моделирование показателей теплоизоляционного материала без учета данных взаимодействий не позволяет адекватно описывать состояние системы в процессе эксплуатации. Полученные в исследовании зависимости позволяют моделировать показатели теплоизоляционных плитных материалов в условиях переменного влагосодержания.

После обработки экспериментальных данных были получены регрессионные модели зависимости теплопроводности от структуры и технологических параметров производства композита, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины хвойных пород на карбамидоформальдегидном связующем в зависимости от доли добавки связующего X_1 , температуры сушки X_2 , доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя X_3 :

$$\lambda = 0,06494 + 0,0004 P_{\text{св}} - 0,000007 T_{\text{суш}} + 0,00012 D_{\text{др}} - 0,000005 P_{\text{св}}^2 - 0,0000016 D_{\text{др}}^2 - 0,000002 P_{\text{св}} D_{\text{др}}. \quad (6)$$

На рис. 19 представлены поверхности отклика зависимости выходной величины – коэффициента теплопроводности плиты от варьируемых факторов – доли добавки связующего (X_1) и температуры сушки (X_2). Поверхность отклика на рис. 19а приведена для максимальной доли содержания в наполнителе мягких отходов древесины ($X_3 = +1$), 19б – без содержания в наполнителе мягких отходов древесины ($X_3 = -1$).

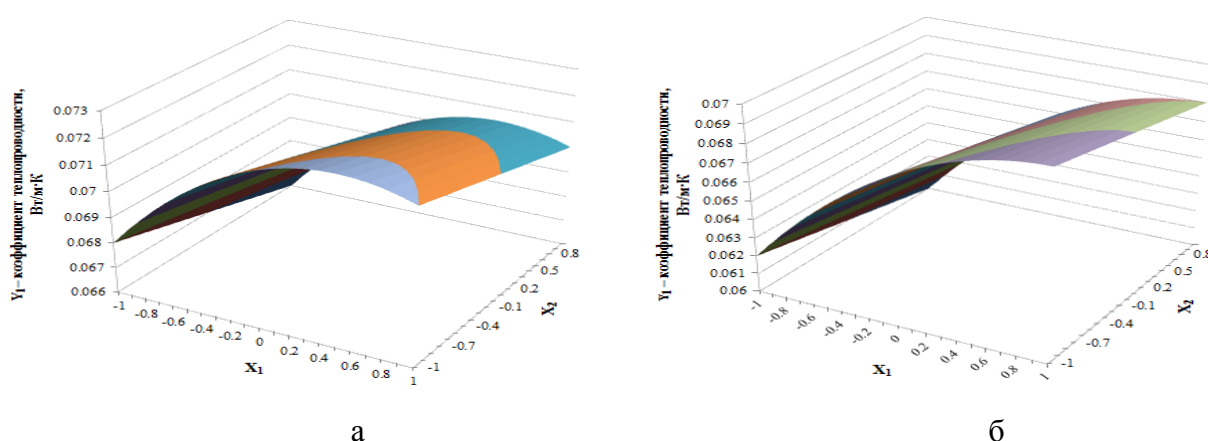


Рисунок 19 – Поверхности отклика зависимости коэффициента теплопроводности плиты от доли добавки связующего (X_1) и температуры сушки (X_2)

С увеличением доли добавки КФС коэффициент теплопроводности композитов растет, и при максимальной доле добавки КФС обеспечивается наибольшее значение коэффициента теплопроводности плит, как при минимальной, так и при максимальной температуре сушки. Это объясняется тем, что увеличивается количество клеевых связей между частицами наполнителя и растет число закрытых пор. С увеличением доли добавки мягких отходов древесины теплофизические показатели увеличиваются. Однако, при максимальной температуре сушки плит и максимальной доле связующего даже добавка в наполнитель 50 % мягких древесных отходов позволяет обеспечить коэффициент теплопроводности композитов, отвечающий нормативным требованиям, предъявляемым к материалу-аналогу – мягким теплоизоляционным ДВП.

Для обеспечения необходимых теплофизических показателей композиционного теплоизоляционного материала из растительных отходов рекомендуются разные значения факторов процесса производства в зависимости от состава наполнителя.

При использовании в качестве наполнителя только невозвратных отходов льна рекомендуемая температура сушки 170 °С, доля добавки КФС не менее 25 %.

При использовании комбинированного наполнителя из 50 % мягких древесных отходов и 50 % отходов прядения льняного волокна необходимо увеличить массовую долю КФС до 40 % ввиду увеличения удельной поверхности наполнителя.

При доле добавки КФС 20 % и более при любой температуре сушки и максимальной доле добавки мягких отходов древесины коэффициент теплопроводности материала составляет 0,06...0,07 Вт/(м·К), что свидетельствует о высоких теплоизоляционных свойствах материала.

Таким образом, данное сочетание технологических факторов можно рекомендовать для производства теплоизоляционных плит на карбамидоформальдегидном связующем с комбинированным наполнителем из мягких отходов древесины и невозвратных отходов прядения льна.

На основании представленных результатов исследования разработаны рекомендации по составу композитов и режимов их производства, которые обеспечивают минимальное значение коэффициента теплопроводности при требуемых прочностных показателях ($\sigma_{и} = 0,4$ МПа). Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Минимальные значения коэффициента теплопроводности, $\sigma_{и} = 0,4$ МПа

Вид наполнителя/ Вид связующего	Коэффициент теплопроводности, Вт /($\text{м} \cdot \text{К}$)	Параметры процесса	
		Доля добавки связующего, %	Температура сушки, °С
<u>Хлопок/КФС</u>	<u>0,075</u>	$\frac{16}{8}$	100
Лен/КФС	0,061		
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	<u>0,077</u>		
Лен + древесина/КФС	0,064		
<u>Хлопок/ФФС</u>	<u>0,072</u>		
Лен/ФФС	0,062		
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	<u>0,074</u>		
Лен + древесина/ФФС	0,063		
<u>Хлопок/ЖС</u>	<u>0,079</u>		
Лен/ЖС	0,063		

По результатам выполненных исследований для практического применения разработан комплекс номограмм, позволяющих оперативно выбирать структурообразующие компоненты композита с заданными свойствами. В качестве примера на рисунке 20 представлена зависимость водопоглощения и коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего (ФФС) для композита из отходов льна с добавкой различных видов мягких отходов древесины.

В шестой главе «Повышение огнезащищенности композиционных материалов из отходов производства растительных волокон» выполнен анализ процессов термодеструкции композиционных материалов на основе растительных отходов и влияния замедлителей горения на показатели горючести.

Основным недостатком растительных материалов является их горючесть, способность легко воспламеняться и распространять пламя с выделением большого количества тепла, дыма и токсичных газообразных продуктов.

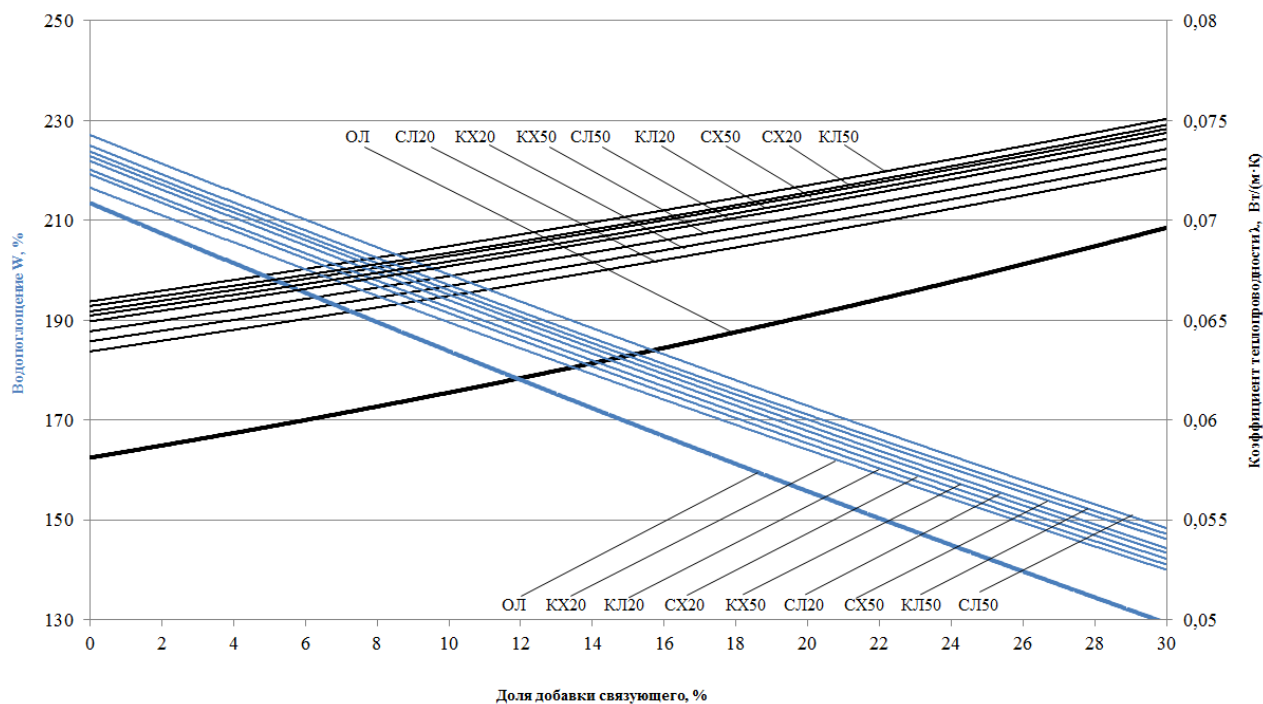


Рисунок 20 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (ФФС) для композита из отходов льна с добавкой мягких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОЛ – отходы льна; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

Основным горючим компонентом отходов является целлюлоза – органический полимер биологического происхождения, макромолекула которого построена из глюкопиранозных звеньев. Вопросы разработки новых композиционных строительных материалов с лигноцеллюлозными наполнителями должны решаться системно, в комплексе с исследованием их пожароопасных свойств. Противоречивость данных о термическом сопротивлении волокон и дискретных частиц однолетников свидетельствует о необходимости проведения экспериментальных исследований пожароопасных свойств применительно к каждому конкретному виду лигноцеллюлозного наполнителя композиционных материалов.

В работе получены впервые результаты термогравиметрического анализа и ИК продуктов горения композитов из отходов льняного волокна на основе синтетических и неорганических связующих без добавки антипирена, которые позволили оценить тепловые эффекты термолитиза материалов, что вносит существенный вклад в теоретические представления о процессах горючести и огнезащиты композитов.

В качестве связующих использовались: ФФС – фенолоформальдегидное связующее; КФС – карбамидоформальдегидное связующее; ЖС – жидкое стекло; АХФ – алюмохромфосфатное связующее. Для огнезащиты композиционного материала использовались составы: NH_4Cl – хлорид аммония; NH_4F – фторид аммония; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – тригидрат оксида алюминия; Na_2CO_3 – карбонат натрия.

Использование замедлителей горения позволяет снизить потерю массы при горении композитов до 15,8...20 %, при удалении пламени образцы не поддерживают горения. Данные показатели соответствуют группе горючести Г1, Г2. Наилучшие показатели для снижения горючести дает добавка в композицию 30 % замедлителя горения тригидрата алюминия, что позволяет получить композит с показателями, соот-

ветствующими группе горючести Г1. В работе представлены кривые ИК, ТГ и ДСК композитов из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего с добавкой тригидрат оксида алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Для изготовления теплоизоляционных композиционных плитных материалов из невозвратных отходов производства хлопкового и льняного волокон с добавкой мягких отходов древесины рационально использовать карбонат натрия десятиводный или тригидрат алюминия в количестве 30 % от массы растительного наполнителя. Это позволяет получить материал с продолжительностью самостоятельного горения 0 с и со степенью повреждения по массе не более 20 %.

После обработки экспериментальных данных были получены регрессионные модели для анализа физико-механических показателей и горючести теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины хвойных пород на карбамидоформальдегидном связующем с добавкой алюмохромфосфата: $\sigma_{\text{и}}$ – прочность при статическом изгибе, МПа; h – разбухание по толщине за 24 часа, %; W – водопоглощение, %. в зависимости от доли добавки связующего X_1 , температуры сушки X_2 , доли добавки алюмохромфосфата X_3 :

- коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,067 + 0,0004 P_{\text{св}} - 0,000007 T_{\text{суш}} + 0,00012 D_{\text{др}} - 0,000005 P_{\text{св}}^2 - 0,0000016 D_{\text{др}}^2 - 0,000002 P_{\text{св}} D_{\text{др}}; \quad (7)$$

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{\text{и}} = 0,331 + 0,0017 P_{\text{св}} - 0,0023 T_{\text{суш}} + 0,002 D_{\text{др}} + 0,00005 P_{\text{св}}^2 + 0,0001 T_{\text{суш}}^2 + 0,0001 D_{\text{др}}^2; \quad (8)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$h = 18,2 - 0,158 P_{\text{св}} + 0,063 T_{\text{суш}} - 0,004 D_{\text{др}} - 0,001 P_{\text{св}}^2 - 0,0005 T_{\text{суш}}^2 - 0,003 D_{\text{др}}^2 - 0,0004 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} - 0,0004 P_{\text{св}} D_{\text{др}} + 0,0003 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}; \quad (9)$$

- степень повреждения по массе

$$\Delta m = 76,8 - 0,157 P_{\text{св}} + 0,103 T_{\text{суш}} - 0,196 D_{\text{др}} - 0,003 P_{\text{св}}^2 - 0,0007 T_{\text{суш}}^2 - 0,007 D_{\text{др}}^2 + 0,0006 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} + 0,0024 P_{\text{св}} D_{\text{др}} + 0,0008 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}. \quad (10)$$

При максимальной доле добавки КФС обеспечивается наименьшая потеря массы при горении плит как при минимальной, так и при максимальной температуре сушки. Это объясняется тем, что увеличивается количество клеевых связей между частицами наполнителя и растет число закрытых пор. С увеличением доли добавки АХФ потеря массы при горении материалов снижается.

При увеличении доли добавки связующего и температуры сушки композита снижается разбухание плит по толщине после пребывания в воде из-за большего числа клеевых связей и углубления степени поликонденсации фенольного связующего. Увеличение содержания АХФ в композите вызывает снижение разбухания плит по толщине.

С увеличением доли добавки КФС коэффициент теплопроводности композитов растет, и при максимальной доле добавки КФС плиты имеют наибольшее значение коэффициента теплопроводности как при минимальной, так и при максимальной тем-

пературе сушки. Это объясняется тем, что коэффициент теплопроводности полимера больше, чем значение параметра для растительного наполнителя. С увеличением доли добавки АХФ теплопроводность композита увеличивается. При доле добавки КФС 20 % и более, при любой температуре сушки и максимальной доле добавки АХФ коэффициент теплопроводности плит не превышает 0,08 Вт/м·К, что отвечает требованиям, предъявляемым к материалу-аналогу (теплоизоляционным мягким ДВП). С увеличением доли добавки АХФ теплофизические показатели растут.

При доле добавки КФС 20 % и более, при любой температуре сушки и максимальной доле добавки АХФ прочность плит при статическом изгибе превышает 0,4 МПа, что отвечает требованиям, предъявляемым к материалу-аналогу (теплоизоляционным мягким ДВП). При этом разбухание по толщине минимально и не превышает 10...11 %.

В седьмой главе «Технологическое и экономическое обоснование производства композитов из целлюлозосодержащих отходов» приведены результаты обоснования экономической эффективности организации производства композитов на российских предприятиях. С учетом имеющихся ресурсов для производства композита теплоизоляционного плитного (КТП) принимается годовой выпуск плит толщиной 25 мм в объеме 8 млн м². Для деревянного двухэтажного дома 6×8 м общая площадь утепления стен составляет 140 м². С учетом требований по теплозащите для условий ЦФО потребуются применение трехслойных плит. В этом случае 8 млн м² плит хватит для утепления стен более 19 тыс. двухэтажных домов общей площадью 1 827 млн м², что соответствует 57 % всех ежегодно возводимых деревянных домов в Российской Федерации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В результате комплекса научных исследований получен новый эффективный теплоизоляционный плитный материал из целлюлозосодержащих отходов древесины и отходов прядения льна и хлопка, отличающийся от известных тем, что структурообразование композита обеспечивается без активирующего разворачивания поверхностей растительных волокон и основано на формировании необходимого фронта ковалентных связей между гидроксилами целлюлозы и метилольными группами связующего, а также водородных связей между гидроксилами целлюлозных микрофибрилл.

2. В ходе исследований получены новые данные о значительном уменьшении степени полимеризации целлюлозы в отходах льна и хлопка в сравнении с исходными волокнами, что увеличивает подвижность элементов целлюлозных микрофибрилл и способствует формированию большего количества межмолекулярных водородных связей в созданном композите.

3. В работе доказана возможность применения теоретических положений общей проводимости для дисперсных систем при определении коэффициента теплопроводности разработанных композиционных материалов и прогнозировании их тепловых свойств. Установлена высокая сходимость теоретических значений коэффициента теплопроводности и результатов, полученных экспериментально.

4. Разработана структурная модель композиционного материала из целлюлозосодержащих отходов позволяющая управлять выбором значений факторов процесса структурообразования композита, прогнозировать изменчивость значений физико-механических свойств с учетом экспериментально подтвержденного стохастического

характера распределения дискретных частиц наполнителя в композите. На основе этой модели представлена физико-математическая постановка задачи теплопроводности и выполнено ее решение методом конечных элементов с использованием программного комплекса COMSOL.

5. Теоретически обоснованы и экспериментально определены значения физико-механических показателей композиционных материалов. Установлено, что при любом виде связующего (синтетического или неорганического) более прочными являются композиционные материалы из отходов переработки льна. Это объясняется высоким содержанием в отходах льна лигнина и целлюлозы (в сравнении отходами хлопка), более высокой степенью полимеризации целлюлозы и меньшим засорением минеральными веществами. Экспериментально установлено, что прочность при статическом изгибе плит из хлопка, изготовленных при температуре сушке 100 °С при добавке связующего 16 % и более, для плит из льна 8 % и более соответствует требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам строительного назначения. В ходе экспериментальных исследований впервые получены значения коэффициентов теплопроводности композиционных материалов из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, а также с добавкой мягких отходов древесины, производимых по технологии мягких древесноволокнистых плит. Коэффициент теплопроводности материала составляет 0,06...0,07 Вт/(м·К).

6. Изучены закономерности влияния вида наполнителя и связующего, а также значений технологических факторов на эксплуатационные показатели нового теплоизоляционного композита. Разработаны адекватные регрессионные модели, позволяющие прогнозировать физико-механические показатели композиционных материалов на основе управления технологическими параметрами их производства. Установлено, что коэффициент теплопроводности в большей степени зависит от доли добавки связующего и вида растительного наполнителя – лен/хлопок (при условии сопоставимости прочих технологических факторов).

7. Доказано, что разработанный теплоизоляционный материал имеет преимущества перед существующими благодаря лучшей стабильности формы и показателя теплопроводности при длительных переменных термовлажностных воздействиях.

8. В ходе исследования впервые экспериментально определены значения показателей степени повреждения по массе, температуры дымовых газов, позволяющие отнести разработанный композиционный материал к группе горючести Г3, Г4. Для обеспечения безопасности использования в строительстве разработаны составы композита с добавкой различных замедлителей горения: Результаты термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии наполнителя и композита подтвердили возможность создания огнезащищенного композита с группой горючести Г1 при использовать жидкого стекла и алюмохромфосфатного связующего с добавкой замедлителя горения $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (30 %).

9. При внедрении полученных результатов и производстве композита теплоизоляционного плитного ресурсов хватит для получения 8 млн м² готовой продукции, что позволит только за счет экономии сырья и материалов получить экономический эффект в размере 50 млн. руб. в год.

Основные публикации автора, отражающие содержание работы
Статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, индексируемых в базе
Scopus и Web of Science:

1. Сусоева, И.В. Анализ влияния структуры композита из целлюлозосодержащих отходов на его эксплуатационные показатели / И.В. Сусоева, А.А. Титунин, Т.Н. Вахнина, Ю.Б. Грунин, Б.Е. Нармания // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6. С. 55–62.
2. Титунин, А.А. Влияние факторов процесса производства на свойства теплоизоляционных плит из растительных отходов / А.А. Титунин, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 6. С. 99–106.
3. Сусоева, И.В. Оценка ресурсного потенциала использования пылевидных лигноцеллюлозных отходов для производства строительных композиционных материалов / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.М. Ибрагимов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2019. – № 3. – С. 37–41.
4. Сусоева, И.В. Статистическое моделирование зависимости интенсивности пылеосаждения от показателей хлопкового волокна в прядении с целью использования при оценке пожарной опасности производства / И.В. Сусоева, Г.К. Букалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2018. – № 3 (375). – С. 167–170.
5. Vahnina, T.N. Thermal-insulation boards from fibrous plant wastes and urea-formaldehyde binder / T.N. Vahnina, **I.V. Susoeva**, A.A. Titunin // Инженерно-строительный журнал – 2018. – № 7 (83). – С. 137–148.
<https://www.researchgate.net/publication/332549245>
6. Сусоева, И.В. Влияние вида связующего на прочность композиционных плитных материалов из лигноцеллюлозных отходов / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.А. Титунин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2017. – № 1 (367). – С. 109–111.
7. Титунин, А.А. Анализ прочности и водостойкости теплоизоляционных композиционных плит из отходов льняного волокна / А.А. Титунин, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2017. – № 5 (371). – С. 49–52.
8. Сусоева, И.В. Химический состав и способ утилизации отходов производства хлопковых и льняных волокон / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.В. Свиридов // Химия растительного сырья – 2017. – № 3. – С. 211–220.
9. Susoeva, I.V. The performance of composites from vegetable raw materials with changes in temperature and humidity / I.V. Susoeva, T.N. Vahnina, A.A. Titunin, J.A. Asatkina // Инженерно-строительный журнал – 2017. – № 3 (71). – С. 39–50.
10. Сусоева, И.В. Исследование интенсивности образования пылевидных отходов текстильных предприятий, используемых для производства строительных лигноцеллюлозных композиционных материалов / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.М. Ибрагимов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2016. – № 2 (362). – С. 219–223.
11. Сусоева, И.В. Исследование свойств лигноцеллюлозных волокон и отходов их переработки / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.А. Титунин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2016. – № 6 (366). – С. 221–226.

12. Сусоева, И.В. Оценка пожарной опасности технологического процесса получения хлопчатобумажной пряжи путем анализа дисперсности пыли / И.В. Сусоева, Г.К. Букалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2015. – № 5 (358). – С. 206–211.

13. Сусоева, И.В. Новый способ измерения интенсивности пылеосаждения на текстильном предприятии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности – 2014. – № 5 (353). – С. 134–137.

Статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Сусоева, И.В. Неиспользуемые растительные отходы и теплоизоляционные композиционные плиты на их основе / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина // Известия высших учебных заведений. Строительство – 2019. – № 7. – С. 49–59.

2. Сусоева, И.В. Физико-механические показатели теплоизоляционных материалов из отходов растительного сырья // Известия высших учебных заведений. Строительство – 2018. – № 5 (713). – С. 71–79.

3. Ибрагимов, А.М. Использование вторичных полимеров в производстве композиционных плитных материалов строительного назначения / А.М. Ибрагимов, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // Строительные материалы – 2018. – № 1–2. – С. 95–100.

4. Вахнина, Т.Н. Оценка термодеструкции лигноцеллюлозных наполнителей и композиционных материалов на их основе / Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева**, Е.Б. Аносова, А.В. Капранов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета – 2017. – № 1 (39). – С. 188–197.

5. Титунин, А.А. Исследование свойств теплоизоляционных материалов из отходов производства хлопковых и льняных волокон / А.А. Титунин, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // Научный журнал строительства и архитектуры – 2017. – № 2 (46). – С. 37–45.

Статьи в журналах и изданиях, индексируемых в базе Scopus и Web of Science:

1. Vakhnina, T.N. Improvement of fire protection of wood board and textile materials for premises with a massive stay of people / T.N. Vakhnina, **I.V. Susoeva**, A.A. Titunin // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. C 022008.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/962/2/022008>

2. Ibragimov, A.M. Use of mineral flame retardants to reduce the combustibility of thermal insulating board composites from plant waste / A.M. Ibragimov, T.N. Vakhnina, **I.V. Susoeva** // В сборнике: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2020. C. 062115

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/459/6/062115/pdf>

3. Vakhnina, T.N. Results of determination of thermal conductivity coefficient for board materials from plant waste / T.N. Vakhnina, **I.V. Susoeva**, A.A. Titunin // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. C. 022005.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/687/2/022005>

4. Ibragimov, A.M. Use of irretrievable waste flax and cotton for production of heat-insulating plates / A.M. Ibragimov, T.N. Vakhnina, **I.V. Susoeva** // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018. C. 012005.

<https://www.researchgate.net/publication/329661165>

5. Ibragimov, A. The decline of combustibility of heat-insulating composite plates from plant wastes / A. Ibragimov, A. Titunin, T. Vachnina, **I. Susoeva** // В сборнике: MATEC Web of Conferences 2018. C. 01019.

<https://www.researchgate.net/publication/329648262>

6. Ibragimov, A. The improvement of composite plates' indicators from cotton and flax spinning waste by modification of raw materials / A. Ibragimov, T. Vachnina, **I. Susoeva** // В сборнике: MATEC Web of Conferences 2018. С. 01009.

<https://www.researchgate.net/publication/329212224>

7. Ibragimov, A. Influence of cyclic influences of temperature and humidity of the environment on durability of a lignotsellyulozny composite / A. Ibragimov, A. Titunin, T. Vachnina, **I. Susoeva**, V. Vershinin // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 19. Сер. "Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017" 2017. С. 012063.

<https://www.researchgate.net/publication/320846943>

Статьи в научных журналах, сборниках и других изданиях:

1. Аносова, Е.Б. Снижение горючести композиционных теплоизоляционных материалов из отходов производства растительных волокон / Е.Б. Аносова, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты – 2020. – № 1 (44). – С. 32–39.

2. Смирнова, В. Н. Использование растительных отходов в качестве наполнителя для теплоизоляционных плит сухого способа производства / В.Н. Смирнова, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // В сборнике: Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Кострома – 2020. – Ч.2 – С. 83–85.

3. Сусоева, И.В. Снижение горючести материалов для помещений с массовым пребыванием людей / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, Румянцев В.А. // В сборнике: Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Кострома – 2020. – Ч.2 – С. 85–89.

4. Вахнина, Т.Н., Сусоева И.В. Исследование показателей теплоизоляционных плитных материалов из растительных отходов / Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // В сборнике: Современные строительные материалы и технологии. Сборник научных статей II международной конференции. Под редакцией М. А. Дмитриевой – 2020. – С. 30–40.

5. Вахнина, Т.Н. Тепловые свойства плитных материалов из растительных отходов / Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева**, А.А. Титунин, А.В. Куликов // В сборнике: Актуальные вопросы естествознания. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2019. – С. 102–106.

6. Вахнина, Т.Н. Влияние модификаторов на время отверждения фенолоформальдегидного связующего для прессования фанеры при низкотемпературном режиме / Т.Н. Вахнина, А.А. Федотов, А.А. Титунин, **И.В. Сусоева** // Лесотехнический журнал – 2019. – № 4. – С. 99–108.

7. Титунин, А.А. Изменчивость свойств композиционных плит из растительного сырья при циклических температурно-влажностных воздействиях / А.А. Титунин, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина // Сибирский лесной журнал – 2019. – № 3. – С. 33–40.

8. Вахнина, Т.Н. Оценка влияния структуры и химического состава растительного наполнителя на свойства композитов теплоизоляционного назначения / Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева**, А.А. Титунин // Лесной вестник. Forestry Bulletin – 2019. – Т. 23. – № 1. – С. 94–101.

9. Сусоева, И.В. Исследование горючести плитных композитов из растительных отходов, модифицированных карбонатом натрия / Сусоева И.В., Вахнина Т.Н. // В сборнике: Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспече-

ния пожарной безопасности объектов. Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 344–348.

10. Аносова, Е.Б. Современные решения по переработке растительных отходов / Е.Б. Аносова, С.М. Ляшенко, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты – 2017. – № 4 (35). – С. 116–120.

11. Смирнова, В.Н. Снижение горючести композитов на основе отходов прядильных производств / В.Н. Смирнова, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // В сборнике: Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Кострома – 2019. – С. 288–291.

12. Титунин, А.А. Влияние циклических температурно-влажностных воздействий на свойства композитов из растительного сырья / А.А. Титунин, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина // В сборнике: строение, свойства и качество древесины – 2018 Материалы VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения – 2018. – С. 196–200.

13. Сусоева, И.В. Повышение огнезащищенности композитов на основе пылевидных отходов прядения растительных волокон / И.В. Сусоева, Е.Б. Аносова, С.М. Ляшенко, Т.Н. Вахнина // В сборнике: Проблемы и перспективы пожарно-технической экспертизы и надзора в области пожарной безопасности Сборник трудов XXVIII Международной научно-практической конференции – 2018. – С. 54–58.

14. Сусоева, И.В. Влияние добавки фторида аммония на физико-механические и пожаробезопасные свойства композитов из отходов прядения льна и хлопка / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.А. Титунин // В сборнике: Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий материалы региональной научно-практической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации; Костромской государственный университет – 2018. – С. 96–100.

15. Свиридов, А.В. Создание композиционных материалов на основе модифицированных отходов производства льняного волокна / А.В. Свиридов, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина // В сборнике: Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе Сборник статей 69-й международной научно-практической конференции : в 3-х томах. Под ред. С.В. Цыбакина, С.А. Полозова, А.В. Рожнова – 2018. – С. 58–62.

16. Смирнова, В.Н. Снижение горючести композитов на основе пылевидных отходов прядильных производств / В.Н. Смирнова, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // В сборнике: Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием Сборник материалов конференции. В 3-х частях. – 2018. – С. 899–903.

17. Смирнова, В.Н. Исследование физико-механических показателей композитов из отходов растительного сырья / В.Н. Смирнова, Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева** // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика – 2018. – Т. 6. № 3 (39). – С. 180–183.

18. Смирнова, В.Н. Разработка теплоизоляционного композиционного плитного материала из отходов прядильных производств / В.Н. Смирнова, **И.В. Сусоева** В сборнике: IX Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство" Белгород – 2017. – С. 108–112.

19. Сусоева, И.В. Снижение горючести композитов на основе растительного сырья / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина // В сборнике: Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году гражданской обороны – 2017. – С. 148–152.

20. Сусоева, И.В. Модификация отходов льняного и хлопкового волокна для производства композиционных плитных материалов / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, В.Н. Смирнова, Е.А. Жаворонкова // В сборнике: проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства сборник научных трудов по материалам V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ – 2017. – С. 531–533.

21. Сусоева, И.В. Свойства плитных материалов из отходов деревообработки и льнопрядильных производств / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, В.Н. Смирнова, Е.А. Жаворонкова // В сборнике: проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства сборник научных трудов по материалам V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ – 2017. – С. 534–536.

22. Свиридов, А.В. Разработка способа утилизации отходов хлопка в сборнике: проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства / А.В. Свиридов, **И.В. Сусоева**, Я.А. Цветкова, Ю.С. Ляпина // Сборник научных трудов по материалам V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ. – 2017. – С. 654–656.

23. Сусоева, И.В. Создание композиционных материалов на основе модифицированных невозвратных отходов производства хлопкового волокна / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.В. Свиридов, С.Н. Румянцев // В сборнике: Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе сборник статей 68-й международной научно-практической конференции в трех томах. – 2017. – С. 58–61.

24. Susoeva, I.V. Effect of retardants on ognegasitelem composites on the basis of vegetative raw materials / I.V. Susoeva, Vahnina T.N. // International Journal of Recent Scientific Research – 2017. – Vol. 8, Issue, 11. – Pp. 21367-21369

25. Сусоева, И.В. К проблеме получения композиционных материалов из отходов текстильных предприятий / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.В. Свиридов // В сборнике: актуальные проблемы науки в технологиях текстильной и легкой промышленности Сборник трудов международной научно-технической конференции – 2016. – С. 223–225.

26. Белов, В.Н. К вопросу об использовании отходов текстильных предприятий / Белов В.Н., Сусоева И.В., Вахнина Т.Н. // Материалы 68-й межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству». – Кострома: КГТУ, 2016. – С. 129–130.

27. Ибрагимов, А.М. Опыт использования пылевидных лигноцеллюлозных отходов текстильных предприятий в качестве наполнителя для строительных композиционных материалов / Ибрагимов А.М., Вахнина Т.Н., **Сусоева И.В.** // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2015 году : Сб. науч. тр. РААСН. – М.: Издательство АСВ, 2016. – 483–488 с.

28. Румянцев, С.Н. Исследование свойств отходов переработки хлопкового волокна / С.Н. Румянцев, **И.В. Сусоева**, Т.Н. Вахнина, А.В. Свиридов // В сборнике: Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе сборник статей 67-й международной научно-практической конференции : в 3 томах – 2016. – С. 94–98.

29. Сусоева, И.В. Разработка способа переработки отходов производства лигноцеллюлозных волокон / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, Е.Н. Покровская, А.В. Свиридов // В сборнике: Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промыш-

ленности (ИННОВАЦИИ-2016) сборник материалов международной научно-технической конференции. Москва – 2016. – С. 297–300.

30. Сусоева, И.В. Исследование физико-механических свойств строительных композиционных материалов на основе пылевидных лигноцеллюлозных отходов текстильных предприятий / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, А.М. Ибрагимов // Вестник Костромского государственного технологического университета – 2016. – № 1 (36). – С. 73–75.

31. Сусоева, И.В. Современное использование отходов переработки лигноцеллюлозных волокон / И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина, В.Н. Белов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика – 2016. – Т. 4. – № 5-2 (25-2). – С. 300–302.

32. Вахнина, Т.Н. Экономические аспекты использования безвозвратных отходов прядения льна и хлопка для производства композиционных материалов / Т.Н. Вахнина, **И.В. Сусоева**, С.Н. Румянцев, С.В. Цыбакин // Вестник Костромского государственного технологического университета. Серия: Экономические науки – 2016. – Т. 1. – № 6. – С. 28–30.

33. Сусоева, И.В. Исследование свойств композиционных материалов на основе пылевидных лигноцеллюлозных отходов текстильных предприятий / И.В. Сусоева, А.М. Ибрагимов, Т.Н. Вахнина // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОЙСК). – 2016. – № 1. – С. 55–57.

34. Сусоева, И.В. Использование нового метода определения интенсивности пылеосаждения для расчета показателей пожарной опасности текстильного предприятия / И.В. Сусоева, Г.К. Букалов // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2015. – № 2 (35). – С. 74–77.