

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Костромской государственный университет»

*На правах рукописи*



СУСОЕВА ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

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

**05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

**Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Кострома – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	8
<b>Глава 1. Современное состояние и проблемы использования целлюлозосодержащих отходов .....</b>	<b>19</b>
1.1. Ресурсы целлюлозосодержащих отходов и направления их использования .....	19
1.2. Достоинства и недостатки направлений использования целлюлозосодержащих отходов .....	23
1.3. Экологические последствия использования отходов .....	26
1.4. Анализ научных основ структурообразования композитов из целлюлозосодержащих отходов .....	28
1.4.1. Материаловедческие аспекты использования целлюлозо- содержащих отходов .....	28
1.4.2. Структура и химический состав растительных волокон ...	32
1.5. Обоснование рационального использования целлюлозосодер- жащих отходов.....	36
1.6. Требования к теплоизоляционным материалам .....	38
1.7. Выводы по состоянию вопроса .....	41
<b>Глава 2. Развитие теоретических основ структурообразования и свойств композиционных материалов из отходов растительного сырья.....</b>	<b>43</b>
2.1. Анализ теоретических исследований в области структурообразования теплоизоляционных композитов из растительных наполнителей .....	43
2.2. Оценка межмолекулярных связей, формирующих структуру композита .....	51
2.2.1. Вклад ковалентных связей в структурообразование композита.....	51

2.2.2. Количественная оценка межмолекулярных водородных связей.....	54
2.3. Анализ моделей проводимости.....	58
2.4. Моделирование структуры разрабатываемого композиционного материала из целлюлозосодержащих отходов .....	61
2.5. Закономерности теплопроводности композита на основе целлюлозосодержащих отходов .....	63
2.6. Решение задачи теплопроводности композита на основе метода конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics.....	71
2.7. Выводы и рекомендации .....	80
<b>Глава 3. Исследование структуры и свойств целлюлозосодержащих отходов.....</b>	<b>82</b>
3.1. Фракционный состав и физико-механические показатели растительных отходов .....	82
3.2. Геометрические размеры растительных отходов .....	84
3.3. Определение элементного состава растительного сырья .....	91
3.4. Исследования химического состава растительных материалов .	93
3.4.1. Определение содержания целлюлозы .....	94
3.4.2. Определение степени полимеризации целлюлозы .....	95
3.4.3. Определение содержания лигнина .....	95
3.4.4. Определение содержания экстрактивных веществ, эстрагируемых водой .....	99
3.4.5. Определение содержания пентозанов и фурфурола .....	100
3.4.6. Определение зольности образцов растительных материалов .....	100
3.4.7. Влажность образцов материалов .....	103
3.4.8. Водопоглощение растительных отходов .....	103
3.5. Выводы и рекомендации .....	105
<b>Глава 4. Получение композиционных плитных материалов из отходов производства растительных волокон .....</b>	<b>107</b>
4.1. Обоснование состава композиционного плитного материала ...	107
4.2. Методики определения физико-механических показателей	

композиционных материалов .....	108
4.2.1. Определение прочности плит при статическом изгибе.....	108
4.2.2. Определение физических показателей плит .....	110
4.3. Результаты определения физико-механических показателей ...	112
4.4. Показатели композитов из растительного сырья при изменении температуры и влажности .....	116
4.4.1. Методика и результаты исследований стойкости к температурно-влажностным воздействиям композиционных плитных материалов на основе наполнителей из отходов производства хлопковых и льняных волокон и матрицы из синтетических и неорганических связующих.....	121
4.5. Применение регрессионных моделей второго порядка для ана- лиза физико-механических показателей теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины хвойных пород на фенолформальдегидном связующем.....	132
4.6. Выводы и рекомендации по результатам экспериментальных исследований.....	145
<b>Глава 5. Исследование теплофизических свойств композиционных материалов из отходов производства растительных волокон.....</b>	<b>148</b>
5.1. Анализ зарубежного и отечественного опыта в формировании представлений о свойствах теплоизоляционных материалов....	148
5.1.1. Условия проведения и методика экспериментальных исследований .....	150
5.2. Результаты эксперимента .....	151
5.3. Исследование влияние влагосодержания на размерную стабильность и коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов из отходов производства хлопковых и льняных волокон .....	158
5.4. Разработка математических моделей зависимости	

теплопроводности от структуры и технологических параметров производства композита .....	165
5.4.1. Модели для композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.....	165
5.4.2. Модели для композита из отходов льна на фенолформальдегидном связующем .....	172
5.4.3. Модели для композита из отходов льна на основе жидкого стекла.....	176
5.4.4. Модели для композита из отходов льна .....	
на алюмохромфосфатном связующем.....	181
5.4.5. Модели для композита из отходов хлопка на карбамидоформальдегидном связующем .....	185
5.4.6. Модели для композита из отходов хлопка на фенолформальдегидном связующем .....	190
5.4.7. Модели для композита из отходов хлопка на основе жидкого стекла .....	195
5.4.8. Модели для композита из отходов хлопка на алюмохромфосфатном связующем .....	199
5.5. Рекомендуемые параметры процесса структурообразования теплоизоляционного композита.....	204
5.6. Исследование влияния структуры композита из целлюлозосодержащих отходов на его эксплуатационные показатели.....	209
5.7. Выводы и рекомендации по результатам исследований.....	216
<b>Глава 6. Повышение огнестойкости композиционных материа-</b> <b>лов из отходов производства растительных волокон.....</b>	<b>218</b>
6.1. Анализ процессов термодеструкции композиционных матери- алов на основе растительных отходов и влияния замедлителей горения на показатели горючести.....	218
6.1.1. Теоретическое обоснование оценки горючести компози-	

ционных материалов с растительным наполнителем .....	218
6.1.2. Термогравиметрический анализ растительных отходов и композиционных материалов на их основе .....	225
6.2. Методика определения показателей горючести .....	238
6.3. Результаты определения показателей горючести композиционных материалов .....	240
6.4. Разработка рекомендаций по снижению горючести композици- онных плитных материалов из отходов производства растительных волокон путем добавки антипиренов .....	246
6.5. Физико-механические показатели и коэффициент теплопроводности композиционных плитных материалов из отходов производства растительных волокон, изготовленных на основе синтетических и минеральных связующих с добав- ками замедлителей горения.....	257
6.6. Разработка математических моделей физико-механических по- казателей и горючести теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна с добавкой алюмохромфосфата.....	258
6.7. Выводы.....	279
<b>Глава 7. Технологическое и экономическое обоснование производ-</b> <b>ства композитов из целлюлозосодержащих отходов</b> <b>промышленных производств.....</b>	<b>282</b>
7.1. Технологическое обоснование производства композитов.....	282
7.2. Экономическое обоснование производства композитов .....	285
7.3. Обоснование экономической эффективности организации производства на российских предприятиях .....	288
7.4. Выводы.....	290
<b>Основные выводы и рекомендации.....</b>	<b>291</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>294</b>
Приложение 1. Заявка на разработку способа утилизации отходов хлопка .....	329

Приложение 2. Результаты статистической обработки значений прочности при статическом изгибе теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и хлопкового волокна и мягких отходов древесины .....	331
Приложение 3. Результаты статистической обработки значений разбухания по толщине теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и хлопкового волокна и мягких отходов древесины .....	348
Приложение 4. Результаты статистической обработки значений водопоглощения теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и хлопкового волокна и мягких отходов древесины .....	365
Приложение 5. Результаты статистической обработки значений коэффициента теплопроводности теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и хлопкового волокна и мягких отходов древесины.....	382
Приложение 6. Акты внедрения результатов исследований.....	399

## ВВЕДЕНИЕ

**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 надмолекулярной 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 M. 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; программным направлениям в сфере жилищного строительства. 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.** В работе содержатся следующие существенные результаты, имеющие научную новизну и полученные лично соискателем.

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 гидроксилами целлюлозы. Дополнительный вклад в механизм структурообразования обеспечивают ковалентные связи между гидроксилами микрофибрилл 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 целлюлозосодержащих 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, ме-

тод 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 системе 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 гидроксильными группами целлюлозы и метилольными группами связующего, а также водородных связей между гидроксильными группами 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 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 Trans-



portation Facilities and Transport 2017, EMMFT 2017 (г. Хабаровск, 2017 г.), I, II Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (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.); XXIV Международная научно-практическая конференция по продвижению в гражданском строительстве формирования среды обитания «FORM–2021» (Construction the formation of living environment) (г. Москва, 2021 г.).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 60 работ, в т.ч. 19 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.

## **Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

### **1.1. Ресурсы целлюлозосодержащих отходов и направления их использования**

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 ком-

плексах и деревоперерабатывающих комбинатах ежегодно образуется свыше 200 млн м<sup>3</sup> отходов древесины» [129].

По возможности использования древесные отходы не равноценны. К наименее используемым относятся такие мягкие древесные отходы, как опилки, кора, стружка. Технологические сложности переработки данных мягких древесных отходов в плитные материалы приводят к тому, что они чаще всего используются на топливные нужды.

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 ограниченно 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.

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.

Проблема рационального использования природных ресурсов и направленные на ее решение разработки способов утилизации промышленных отходов являются крайне актуальными. На свалках, хранилищах, полигонах РФ находится почти 700 т твердых отходов на каждого жителя России. В этих условиях рост объемов отходов становится фактором, относящимся к категории «больших вызовов». В российских и зарубежных исследованиях разрабатываются способы использования растительных отходов, в том числе и текстильных производств, в качестве наполнителя различных композиционных материалов, используемых в строительстве, автомобилестроении и т.п. Однако мягкие отходы деревообработки используются в основном для изготовления топливных пеллет, а невозвратные отходы прядильных производств (пылевидная фракция) утилизируются только путем захоронения на полигонах или сжигания. Направления использования растительных отходов представлены на рисунке 1.1.

Традиционно растительные отходы используются в гидролизном производстве [84, 310], с XX в. они используются на топливные нужды [37]. Как за рубежом [257], так и в России прогнозируется дальнейшее увеличение использования древесных отходов в качестве топлива. По данным Минприроды РФ, к 2030 г. треть отходов лесопромышленного производства будет перерабатываться в биотопливо [185]. Использование отходов возобновляемых растительных материалов в качестве топлива является положительным с энергетической точки зрения [82, 181], однако данное направление не снижает экологической нагрузки на окружающую среду, обусловленной сжиганием растительных материалов, даже с учетом использования современных технологий карбонизации и газификации растительных отходов [256]. С этой точки зрения более предпочтительными способами переработки растительных отходов являются биоконверсия [55, 107, 200, 213, 290] и гидролизное производство [100, 282]. Особенно перспективна переработка растительных отходов с целью получения фенольных соединений, олигосахаридов и полисахаридов с низкой степенью полимеризации [250].



Рисунок 1.1 – Направления использования растительных отходов

Технический прогресс в области химической и химико-механической переработки растительного сырья позволяет практически использовать почти всю биомассу, однако различные направления переработки имеют разную эффективность. Доля выхода конечной продукции в лесохимическом производстве (целлюлозно-бумажном и гидролизном производстве, в том числе производстве этилового спирта) составляет 62...68 %, а в плитном производстве выход продукции доходит до 90 % [107].

Технологии производства плитных материалов из мелкодисперсных растительных частиц позволяют использовать различные виды лигноцеллюлозных отходов для изготовления материалов строительного назначения, однако значительные повреждения растительных клеток в отходах [153] затрудняют их использование для производства конструкционных строительных материалов, за исключением материалов на минеральных вяжущих.

Информационный поиск не выявил разработок в области использования смеси измельченных отходов древесины и отходов прядения для производства какой-либо продукции.

## **1.2. Достоинства и недостатки направлений использования целлюлозосодержащих отходов**

Первые предположения по использованию станочной стружки для производства прессованных изделий появились еще в конце XIX и начале XX столетия (Х. Крамер, немецкий патент № 48035, 1899 г.; Х. Ватсон, патент № 796545, 1905 г. и др.). Первые практические попытки изготавливать новые материалы из станочной стружки относятся к 30-м годам прошлого столетия (Т. Сатов, 1935 г., Япония; Ф. Пфоль, 1936 г., Швейцария). Промышленное производство опилочных плит было начато в 1941 г. фирмой «Торфит-верке, Г.А.Хасеке» в г. Бремен-Хемелинген (ФРГ). Однако широкого практического использования опилки и станочная стружка в производстве древесно-стружечных плит не получили как в прошлом веке, так и в настоя-

щее время. Объясняется это тем, что не были созданы необходимые теоретические и технические предпосылки для получения изделий с необходимыми показателями из данных видов древесных частиц.

В 1964–1968 гг. во ВНИИДреве были проведены широкие исследования по изучению свойств древесно-стружечных плит (ДСтП), изготовленных из станочной стружки и опилок [180]. Однако опыт показывает, что добавка мягких отходов древесины к специальной стружке для производства ДСтП приводит к ухудшению физико-механических показателей плит [180].

Производство масс древесных прессовочных из мягких отходов деревообработки не имеет широкого распространения, производство топливных пеллет более актуально для стран с малым древесным сырьевым ресурсом.

В настоящее время расширяется область исследований, направленных на применение растительного сырья и отходов его переработки, как с использованием химических направлений [1, 72, 276, 81, 34, 97, 183, 18, 90, 132, 32, 22, 33], так и путем включения в качестве наполнителей в различные композиционные материалы [247, 145], модификаторов в производстве строительных материалов [36]. Обусловлено это, по мнению S. Kamel, в числе прочего, увеличением спроса на экологически безопасные композиционные материалы [247].

Существуют разработки по использованию отходов в производстве древесноволокнистых плит (ДВП), однако они касаются непосредственно отходов производства ДВП – отжимков импрессфайнера, отходов форматной обрезки, волокна сточных вод [179, 122].

Одним из направлений утилизации мягких древесных отходов является производство лигноуглеводных пластиков без связующего [118, 14, 8], однако данное направление переработки древесных отходов является крайне энергоемким.

Традиционно ведутся разработки по использованию древесных отходов в качестве удобрения [70].



С середины XX в. измельченные отходы переработки древесины используются для производства конструкционно-теплоизоляционных материалов, применяемых в домостроении – арболита, опилкобетона, гипсоопилочных блоков, дюризола, велокса и др. [105, 106, 108]. Исследованиями в области адгезии и физико-механических свойств композиционных материалов из отходов древесины и минерального вяжущего занимались многие ученые [279, 214, 216, 273]. Строительные материалы на основе растительного наполнителя и минерального вяжущего имеют ряд преимуществ: высокая прочность, пониженная горючесть. Многие авторы утверждают, что основными недостатками данных материалов являются большой удельный вес, низкая прочность на изгиб. Важным достоинством такого древесно-минерального композита, как арболит является высокая удельная теплоемкость. Для данного композита к сложностям формирования его из смеси органических отходов можно отнести давление набухания и наличие «цементного яда» (глюкозы, ксилозы и др.). Механизм формирования процессов твердения сложен, а его изучение, по мнению исследователей, затруднено следующими причинами: во-первых, не до конца исследованы процессы схватывания и твердения цемента, во-вторых, полностью неизвестна структура многих компонентов древесины [195].

Дополнительным ресурсом растительного сырья являются отходы прядения хлопковых и льняных волокон. Основная часть их сжигается или вывозится на свалки, негативно влияя на экологическую ситуацию в стране. Рост количества неперерабатываемых отходов относится к категории «больших вызовов». На типовых прядильных предприятиях в процессе прядения льна и хлопка образуется большое количество неиспользуемых отходов (около 150 кг в сутки), которые утилизируются путем вывоза на свалку [148]. В зарубежной практике растительные отходы однолетников используются для производства технической целлюлозы путем химико-механической или химической обработки [2, 247, 275]. По данным некоторых исследователей [294] выход целлюлозы из растительных материалов зависит от степени зре-

лости растений, по мнению Xiao-PingHu и Jiri Militky – от части растения, географического местоположения, возраста, климата, почвенных условий [307, 244]. Но кроме высокой вариативности биологических факторов, пылевидные отходы прядения характеризуются высокой степенью загрязненности.

Возможно использование данного вида отходов для производства композиционных плитных материалов, в зарубежной и отечественной научной литературе нет сведений о применении неиспользуемых отходов прядения.

### **1.3. Экологические последствия использования отходов**

Основным преимуществом сжигания отходов считается то, что объем отходов, идущих на захоронение, уменьшается в десять раз [149]. Однако, по данным Гринпис, выбросы токсичных веществ в атмосферу, образующихся при сжигании мусора, приводят к таким болезням, как рак, заболевания дыхательной и сердечно-сосудистой систем, нарушения иммунитета, рост количества аллергических реакций и врожденных аномалий [238]. Выводы многих исследований, и в первую очередь по онкологическим заболеваниям, касаются в основном старых технологий сжигания отходов [190, 267, 231, 294 287], однако, и современные технологии, введенные в действие в последние несколько лет, продолжают приносить вред здоровью человека [246]. Даже использование высокотехнологичных фильтров, сокращающих при сжигании отходов выбросы токсичных веществ в атмосферу, не может предотвратить загрязнение окружающей среды продуктами сгорания [311, 265]. Во всем мире возросла доля захоронения отходов на полигонах для мусора. В настоящее время отправляется в захоронение до 60 % отходов, производимых в странах ЕС, причем рост их объемов в 2010 г. составил 20% по отношению к 1995 г. [196]. Динамика роста объемов отходов и экологические последствия процессов складирования и сжигания заставляют искать новые методы их утилизации.

Проблема переработки растительных отходов актуальна в первую очередь с экологической точки зрения. Сжигание растительных отходов увеличивает выброс в атмосферу оксидов азота, углерода, сажи и других компонентов. При сгорании 1 тонны растительных отходов в атмосферу выбрасывается около 9 кг микрочастиц сажи. С другой стороны растительные отходы могут быть возобновляемым сырьевым ресурсом для производства строительных композитов, особенно в качестве наполнителя теплоизоляционных плит. Натуральные целлюлозосодержащие волокна имеют ряд преимуществ – низкую стоимость, возобновляемость запасов, способность к биоразложению. Это позволяет использовать их во многих отраслях, включая производство теплоизоляционных плитных материалов [207, 277, 233, 274].

В работе [304] отмечено, что большие объемы отходов от переработки хлопка накапливаются в странах по всему миру. Большинство хлопковых отходов вызывает серьезные экологические проблемы и опасности для здоровья. При этом отходы хлопка хлопкоочистительных и прядильных заводов являются очень полезным промышленным ресурсом, который может рационально использоваться.

В соответствии с Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 445 от 18 июля 2014 г. «Об утверждении федерального классификационного каталога отходов» к отходам переработки хлопкового волокна и изготовления хлопчатобумажной пряжи относятся следующие: отходы пуха хлопчатобумажной пряжи [126]: пух подвальный [126, № 3 02 112 11 23 5]; пух трепальный [126, № 3 02 112 12 23 5]; пух чесальный [126, № 3 02 112 13 23 5]; отходы орешка хлопчатобумажной пряжи [126, № 3 02 112 20 00 0]: орешек трепальный [126, № 3 02 112 21 23 5]; орешек чесальный [126, № 3 02 112 22 23 5]; отходы очеса хлопчатобумажной пряжи [126, № 3 02 112 30 00 0]; очес кардный [126, № 3 02 112 31 23 5]; очес гребенной [126, № 3 02 112 32 23 5]. Данные хлопковые отходы прядильного и ткацкого производств пользуются большим спросом для вторичной переработки (нетканого холстопрощивного полотна, матрасов).

К неиспользуемым отходам текстильных производств [237] относятся также отходы производства, которые непригодны для производства текстильной продукции, такие, как подметь и пух из пыльных камер и т.п.

Экономические аспекты вопросов утилизации отходов очень сложны. Сжигание отходов экономически оправдано лишь в случае, если население оплачивает работу мусоросжигающего завода. Основную часть расходов составляют при этом финансирование работы очистных сооружений [150]. Но даже использование технологий, сокращающих выбросы токсичных веществ в атмосферу, не может предотвратить возвращение их в окружающую среду из мест захоронения золы и шлаков. Во всем мире в результате жестких мер по охране окружающей среды и норм регулирования выбросов в атмосферу загрязняющих веществ возросла доля захоронения отходов на полигонах для мусора. В настоящее время отправляется в захоронение до 60% отходов, производимых в странах ЕС, причем рост их объемов в 2010 г. составил 20% по отношению к 1995 г. [125].

#### **1.4. Анализ научных основ структурообразования композитов из целлюлозосодержащих отходов**

##### **1.4.1. Материаловедческие аспекты использования целлюлозосодержащих отходов**

Основную массу растительных материалов составляют органические вещества (около 80 %). Минеральные вещества составляют небольшую часть до 1...17 %, которые образуются при сжигании растительных материалов и прокаливании остатка от сжигания в муфельной печи. Схема химического состава растительных отходов представлена на рисунке 1.2. Целлюлоза – основной компонент растительных отходов, составляющий 40...58%.

Химический состав и плотность растительного материала значимо влияют на характеристики пожарной опасности.

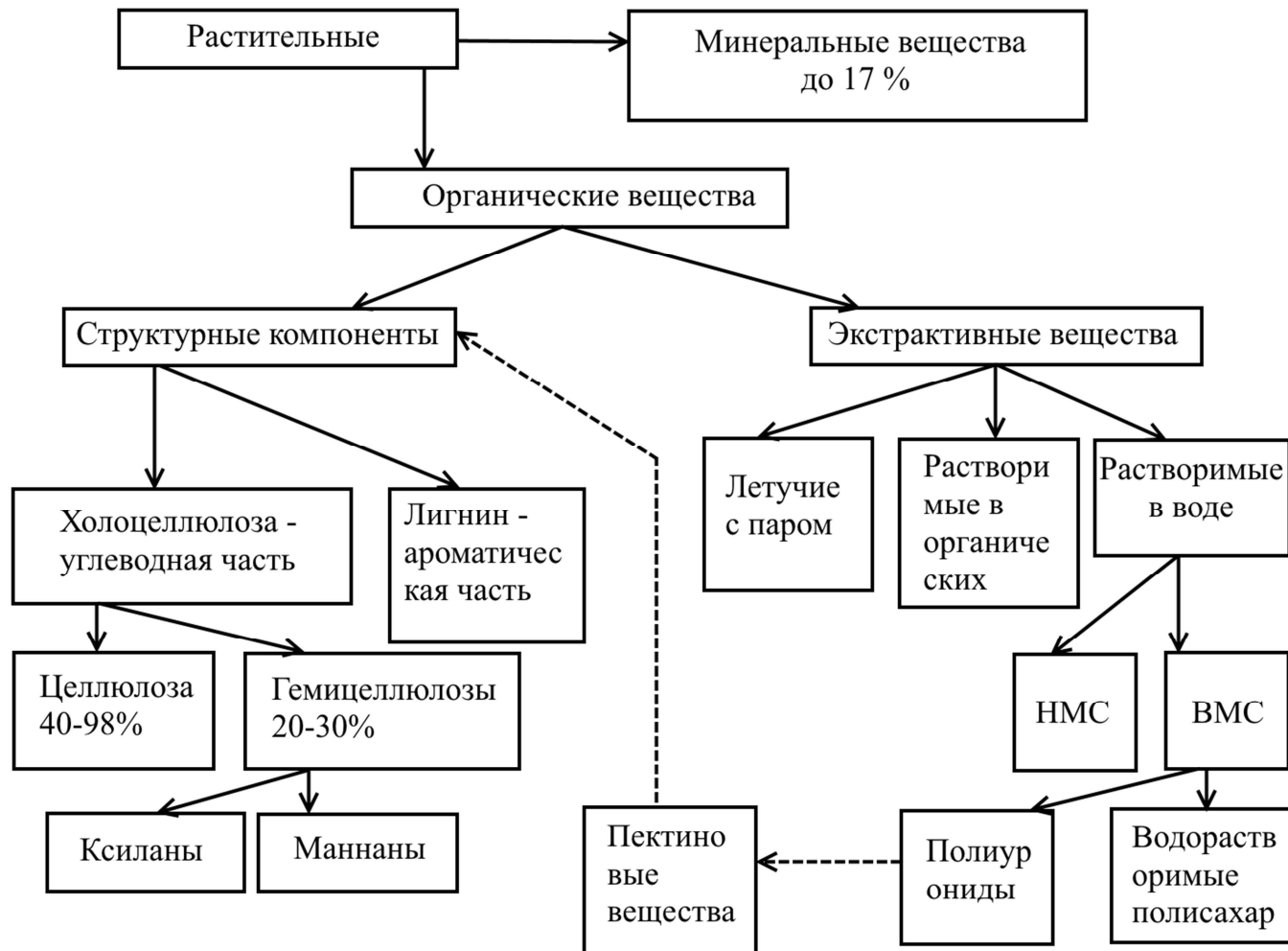


Рисунок 1.2 – Схема химического состава растительных отходов

Так лигнин, в силу своего химического строения (ароматической природы), обладает повышенной способностью к карбонизации и выходу нелетучего коксового остатка при разложении [10]. В отходах однолетников содержится меньше лигнина, чем в древесине. Особенности физико-химических свойств лигноцеллюлозных материалов приводят к предположению, что наполнитель композиционных материалов из однолетников, таких, как хлопок, будет иметь большую горючесть, чем древесина.

Layth Mohammed и коллеги отмечают [259], что химический состав и свойства растительных волокон оказывают влияние на физико-механические свойства композита. С увеличением содержания целлюлозы повышаются прочностные характеристики композита [278, 297, 289]. На свойства композитов значительно влияют такие параметры технологического процесса, как фракционный состав наполнителя, доля добавки связующего, режимы сушки материала и другие факторы [254].

Изучение химического состава, физико-химических свойств различных видов волокнистых отходов текстильной промышленности необходимо для разработки способов их дальнейшего применения. Важное значение для процессов производства композитов из лигноцеллюлозных отходов имеет содержание целлюлозы. Наличие в растительных отходах высокой доли целлюлозы, содержащей большое количество метилольных  $-CH_2OH$  и гидроксильных  $-OH$  групп, позволяет выдвинуть гипотезу о возможности использования волокон и отходов их производства в качестве наполнителя композиционных материалов. Эти группы могут взаимодействовать с образованием химических и водородных связей с метилольными группами карбаминоформальдегидных смол, а также с фенольными гидроксильными фенолоформальдегидных смол и с гидроксильными группами поликремниевых кислот, образующихся при гидролизе силикатов натрия и калия в составе жидкого стекла [64].

Данные химического состава волокон хлопка и льна по результатам различных исследований имеют значительный разброс, обусловленный вли-

янием большого количества факторов, в числе которых природные условия произрастания, особенности методик определения показателей [66, 69, 77].

Химический состав лигноцеллюлозных материалов оказывает существенное влияние на процессы структурообразования композиционного материала. При производстве композитов из неиспользуемых текстильных отходов происходят процессы термогидролитической деструкции полисахаридов, причем на эти процессы влияет надмолекулярная структура волокна. При температуре 100...160 °С деструктируют легкогидролизуемые аморфные полисахариды, образуя смесь неизменной целлюлозы с продуктами различной степени гидролиза. Кроме того, гидролитической деструкции подвергаются связи лигнина с гемицеллюлозами лигноцеллюлозного комплекса волокон, что, в совокупности со снижением средней степени полимеризации холоцеллюлозного комплекса, увеличивает подвижность макромолекул и создает дополнительные связи между элементами композита.

Таким образом, отходы переработки лигноцеллюлозных волокон могут быть утилизированы путем производства композиционных материалов на основе органических и неорганических связующих, при этом следует учитывать влияние физико-химических показателей данного сырья на процессы структурообразования материала.

Наибольшее влияние на физико-химические свойства волокон однолетних растений и отходов их переработки оказывает содержание целлюлозы и ее изменение в процессе биосинтеза в природе. В волокнах семян хлопчатника целлюлоза содержится в наиболее чистом виде. В процессе роста хлопкового волокна содержание в волокне целлюлозы непрерывно повышается, а содержание других компонентов – жиров, восков, золы и водорастворимых веществ – понижается. В начальной стадии роста хлопковое волокно содержит значительное количество пектиновых веществ, постепенно уменьшающееся в дальнейший период. Хлопковое волокно имеет высокую степень кристалличности – 66 – 68%, причем кристаллические области макромолекул перемежаются с аморфными [1].

Специфическая особенность льняных волокнистых материалов связана с низким содержанием в исходном сырье основного волокнообразующего полимера – целлюлозы. По данным различных исследований, ее содержание находится в диапазоне 64...86 % [69, 77].

#### **1.4.2. Структура и химический состав растительных волокон**

Основными достоинствами растительных отходов, как сырья для получения композиционных материалов являются экологичность, ежегодная воспроизводимость и относительно невысокая стоимость.

К преимуществам растительного сырья можно также отнести высокую прочность и хорошую совместимость с большим количеством природных и синтетических веществ. Растительное сырье является источником ряда ценных продуктов природного происхождения, в том числе целлюлозы, лигнина и других компонентов.

Особенностью натуральных волокон, как и других растительных материалов на основе целлюлозы, является их вариативность. Свойства растительных волокон зависят от многих внешних факторов, таких как климатические условия, состав почвы [261].

Подробно строение и свойства льняных и хлопковых волокон рассмотрены во многих работах [261, 271, 287]. Анализ работ показал, что биомасса растительных отходов состоит из органических полимеров – целлюлозы, гемицеллюлоз, а также из ароматического полимера – лигнина. Следует отметить, что сведения о составе растительного сырья, приводимые в российских и зарубежных публикациях, носят статистически неоднородный характер. Отечественные и зарубежные исследователи оперируют, как правило, результатами определения среднего арифметического для ряда значений того или иного показателя [27], который, в свою очередь зависит от большого числа факторов – вида растительного материала, части растения, из которой получен материал, географической зоны и условий произрастания.



По данным Н. Khanjanzadeh и его коллег, лигноцеллюлозные отходы из стеблей хлопка содержат около 48 % целлюлозы, что близко к содержанию этого биополимера в древесине [249]. При этом исследователи отмечают, что содержание лигнина в древесине лиственных пород составляет от 30 % до 35 %, в то время как по данным Б. Н. Уголева [20], содержание лигнина в лиственной древесине 19–24 %.

В публикации N. I. Naikir с коллегами приведено значение содержания целлюлозы в стебле хлопка 41 %, лигнина – 25 %, а в хлопке-сырце содержание целлюлозы 80–95 %, лигнин в хлопковых коробочках не обнаружен [227]. С. Ververis также отмечает, что содержание лигнина и целлюлозы зависит от степени зрелости волокна, причем содержание лигнина в стебле хлопка составляет 15,4 % [302]. В исследовании D. L. Brink выполнен сравнительный химический анализ стеблей хлопчатника, волокна и угаров первичной обработки хлопка [204]. Результаты эксперимента показали отсутствие содержания лигнина и гемицеллюлоз в волокне хлопка, в то время как в стеблях хлопчатника доля лигнина составляет 24 %, а в угарах первичной обработки 20,56 %.

Такой же разброс результатов характерен и для анализа химического состава льна. По данным исследований Deresa Watkins и коллег в льняном волокне содержится около 15 % лигнина [209]. По результатам анализа состава образцов волокна льна, выращенного в разных областях России, выполненного С. А. Кокшаровым с коллегами, содержание целлюлозы (63,3–65,2 %), лигнина (5,5–11,4 %) и других компонентов зависит от региона произрастания, вида льнотресты, зоны стебля [77]. Содержание целлюлозы в стеблях льна менее зависит от территориального признака и зоны стебля, в целом оно больше, чем в стебле хлопка.

Строение льняного и хлопкового волокон под микроскопом представлено на рисунке 1.3.

Клеточная стенка (оболочка клетки) льна, как и древесины состоит из нескольких слоев, отличающихся друг от друга строением и химическим со-

ставом (рисунок 1.4). Первичная (внешняя) клеточная стенка (P) толщиной 0.2 мкм толщиной [202]. В период формирования клеточной стенки (утолщения) образуется вторичная стенка (S1, S2, S3), которая в свою очередь состоит из трех слоев: наружного слоя S1, среднего слоя S2 и внутреннего слоя S3, которая обеспечивает прочность волокна.

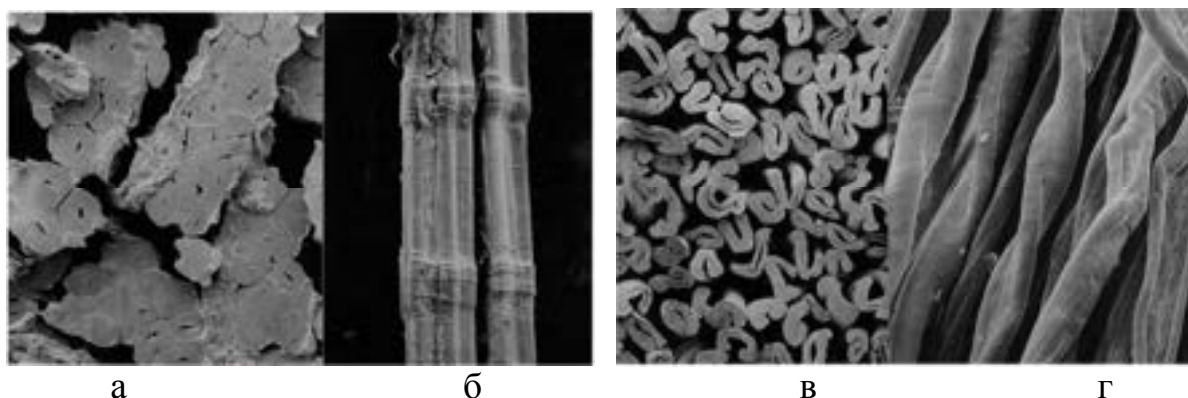


Рисунок 1.3 – Строение льняного и хлопкового волокон под микроскопом:  
а – поперечный разрез, б – продольный вид, в – поперечный разрез, г –  
продольный вид [50]

В клеточных стенках целлюлоза находится в виде тончайших волоконцев – целлюлозных микрофибрилл. Длинные цепные молекулы целлюлозы проходят вдоль микрофибрилл на ряде участков ориентированно (т. е. параллельно друг другу и на близких расстояниях), а на ряде других участков их ориентация менее совершенна. Большая часть волокна состоит из вторичной клеточной стенки, содержащей множество прозрачных микроволокон целлюлозы и аморфной гемицеллюлозы, обеспечивающие волокну высокую прочность [303]. Модель хлопкового волокна по современным представлениям представлена на рисунке 1.5.

Но элементарное волокно льна отличается от древесной стружки по строению и размерам. Элементарные волокна льна имеют среднюю длину 10...24 мм, длина волокна либриформа около 1 мм, поперечный размер их сопоставим – 11...20 мкм. Древесная стружка, кроме волокон либриформа,

содержит водопроводящие элементы – сосуды диаметром порядка 200 мкм, объем которых занимает 10...55 % [19].

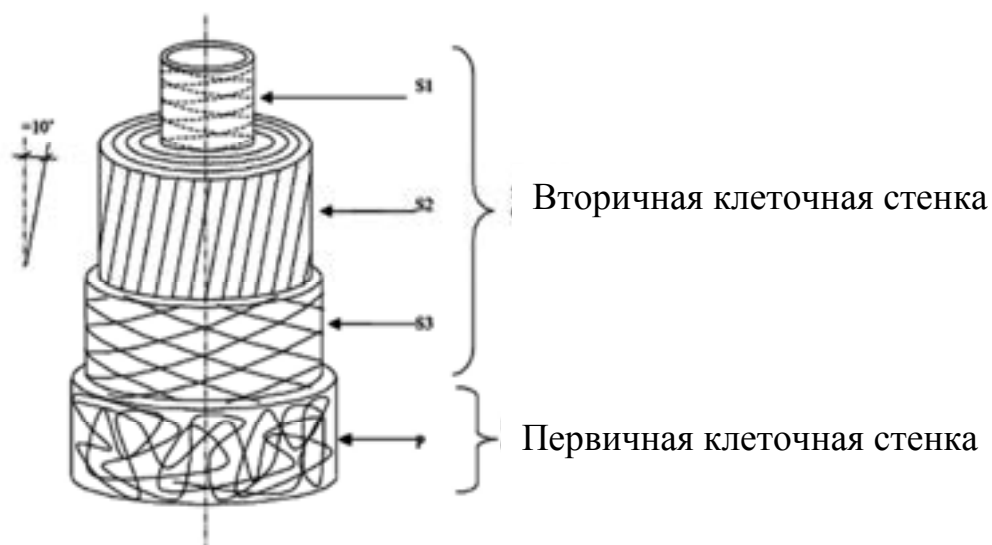


Рисунок 1.4 – Модель древесного и льняного волокна по современным представлениям [199]



Рисунок 1.5 – Модель хлопкового волокна по современным представлениям

Элементарные волокна хлопка, так же как и льна, имеют слоистое строение (рисунок 1.5) вследствие постепенного послойного отложения целлюло-

зы на стенках волокон в виде суточных концентрических слоев. По мере созревания волокна остатки протоплазмы в канале засыхают, волокно сплющивается. При этом наружный диаметр волокон остается неизменным, а диаметр канала вследствие утолщения стенок уменьшается, повышается прочность волокон, их упругость, улучшаются сорбционные свойства.

### **1.5. Обоснование рационального использования целлюлозосодержащих отходов**

Проблема переработки отходов путем использования для производства продукции актуальна во всем мире. По данным Росприроднадзора, в России образуется около 4,5 млн т в год древесных отходов, и хотя за последние три года наметилась тенденция к снижению количества древесных отходов, их количество превышает данные 2012 г. [114]. Ежегодно около 1 млн тонн древесных отходов в России не используется [68]. Но не только в России, богатой древесными ресурсами, образуются значительное количество неиспользуемых древесных отходов. По данным Статистического бюро Европейского Союза (Евростат), в таких странах, как Германия, Франция, Великобритания и др., ежегодно образуются большие объемы древесных отходов [206], лидером является Германия – около 400 тыс. тонн [309]. Это обуславливает высокую актуальность работ по утилизации отходов.

По мнению многих исследователей, в будущем потребности в энергии будут только возрастать [191, 192, 193, 291, 308], работы по повышению эффективности конструкций для теплоизоляции зданий и сооружений будут все более актуальными с точки зрения энергосбережения. Рост цен на тепловую энергию также является существенным основанием для разработки новых теплоизоляционных материалов. Создание эффективных теплоизоляционных плитных материалов строительного назначения, в том числе из отходов местной промышленности, дает возможность снизить затраты на теплоизоляцию зданий. Хорошим основанием для данных работ являются низкие зна-

чения теплопроводности растительных материалов. По данным Zhou с коллегами, коэффициент теплопроводности плит из стеблей хлопка без связующего имеет значения в диапазоне 0,0585...0,0815 Вт/м·К (в зависимости от плотности плит 150...450 кг/м<sup>3</sup>) [316].

Перспективным направлением для утилизации растительных отходов является производство теплоизоляционных плитных материалов. Традиционным теплоизоляционным материалом являются мягкие ДВП. T. Tabarsa отмечает, что их производство важно с позиций ресурсосберегающих технологий, но затруднено в европейских странах ввиду ограниченности запасов лесных ресурсов вблизи промышленно освоенных районов, поэтому требует использования альтернативных растительных волокон [296]. Существует много исследований в области производства композиционных материалов из недревесных растительных волокон и отходов, в том числе с комбинированным наполнителем из древесных отходов с добавлением растительных волокон. G. Nan с коллегами [223] и S. Halvarsson и соавторы [221, 222] исследовали показатели древесноволокнистых плит с добавкой пшеницы и тростника на карбамидоформальдегидном (КФС) и меламиноформальдегидном (МФС) связующих. J. E. G. Van Dam и др. использовали в качестве наполнителя композита кокосовое волокно [301, 220]. Существуют разработки композитов из бамбука и рисовой соломы [284]. J. Kanagaraj и соавторы [248] исследовали композиционные материалы из волокна хлопка и кукурузных стеблей. В работе [288] Saad M. J. и Kamal I. исследовали физико-механические показатели композиционных материалов из волокна кенаф с карбамидоформальдегидным связующим. Известны результаты исследований по использованию в производстве композитов отходов переработки льняного волокна [296, 293].

Законодательное регулирование работ по повышению энергоэффективности началось в нашей стране более 10 лет назад – с введения в действие федерального закона № 261–ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении ...». Важность использования эффективных утеплителей, в числе прочих факто-

ров, обусловлена тем, что на потери тепловой энергии через стены приходится до 30...49 %, в зависимости от этажности, типа здания и срока его эксплуатации [166].

Развитие концепции доступного жилья требует создания теоретической базы и обоснованных методологических подходов к решению проблемы надежного обеспечения строительства эффективными и доступными строительными материалами, что и определяет выбор темы диссертационной работы.

Несмотря на широкий спектр исследований по переработке растительных отходов в отечественной и зарубежной исследовательской практике не отмечено разработок по применению мягких отходов переработки древесины и неиспользуемых отходов прядения льна и хлопка в качестве наполнителя теплоизоляционных композиционных плитных материалов. Все выше сказанное свидетельствует об актуальности проведения исследований по созданию эффективных теплоизоляционных плит из растительных отходов.

### **1.6. Требования к теплоизоляционным материалам**

В России теплоизоляционные материалы в соответствии с требованиями ГОСТ 16381–77 [51] должны обладать теплопроводностью не более 0,175 Вт/(м·К), иметь плотность (объемную массу) не более 500 кг/м<sup>3</sup>, обладать стабильными физико-механическими и теплотехническими свойствами и не выделять токсических веществ и пыли в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации.

Исследованиями процесса теплообмена применительно к композиционным материалам, в том числе растительного происхождения, занимаются зарубежные [226, 292] и отечественные ученые – А. А. Леонович, Н. И. Ватин, С. В. Федосов, А. В. Христофоров, В. Г. Хозин, И. Х. Наназашвили, И. Г. Корчаго, Л. В. Мельникова, В. Г. Гагарин, В. Н. Куприянов, А. Д. Жуков, Т. Н. Вахнина и др. [24, 162, 154, 30, 31, 85, 134]. Этими и другими иссле-

дователями было установлено, что теплообмен (главным образом, его интенсивность и количество переносимой теплоты) зависит от формы тела, его размеров, химического состава, времени процесса, физических свойств тел: плотности, пористости, характера пор (открытые или закрытые), а также от влажности и температуры, при которых происходят процессы передачи теплоты. В частности, было доказано, что чем меньше плотность материала, тем меньше коэффициент теплопроводности, следовательно – тем эффективнее материал будет выполнять функцию замедления теплового потока [59, 73]. Эта закономерность характерна для идеального материала с закрытыми порами в условиях постоянной влажности. На практике тепловые свойства материала существенно зависят от влажности окружающей среды, и как следствие – от влажности материала. С увеличением влажности материала резко снижаются его теплоизоляционные свойства [194, 312, 17], поэтому при разработке структуры и состава теплоизоляционного материала важно спрогнозировать и оценить влияние влагосодержания на его теплопроводность. Значительное влияние на теплопроводность материала также оказывает изменение его геометрических характеристик [39].

Согласно «Стратегии развития промышленности строительных материалов и индустриального домостроения на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу до 2030 г.» в рамках обеспечения реализации Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации предусматривается обеспечение отрасли недорогими, безопасными, экологически чистыми материалами, вовлечение отходов в производство строительных материалов, увеличение глубины переработки природных ресурсов [128]

При этом строительство жилых, общественных и большинства промышленных зданий должно осуществляться в соответствии с требованиями к тепловой защите [141]. Нормами [141] наряду с другими требованиями установлен такой показатель тепловой защиты здания, как

приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций.

Процессы производства древесноволокнистых плит включают стадию термообработки, математически описываются в виде уравнения теплового баланса.

В последние десятилетия активизировались работы в области теории структурообразования лигноцеллюлозных материалов [1, 35, 163], как природных, так и композиционных, исследования их физико-химических показателей [159, 235, 236].

Однако существующие описания процессов тепломассопереноса при сушке различных растительных материалов не могут быть применимы к производству мягких теплоизоляционных плит из отходов переработки древесины и неиспользуемых отходов прядения льна и хлопка [94, 86, 119, 21, 136].

Таким образом, разработку теоретических основ процесса производства композиционных теплоизоляционных плит из отходов древесины, льна и хлопка необходимо проводить с учетом теплофизических параметров материала наполнителя и самих композитов.

В связи с большой долей отходов и низким уровнем их использования, связанными с этим негативными воздействиями на окружающую среду, прогнозируемым ростом объемов промышленного производства и потребления продукции из древесины становится очевидной актуальность решения насущной проблемы, которая заключается в установлении закономерностей, взаимосвязи свойств отходов и показателей композитов, получения материала, который будет востребован строительным комплексом (рисунок 1.6).

Преимущества:

- удовлетворение потребностей строительного комплекса в композитах теплоизоляционного назначения на основе местного сырья;
- есть необходимость решения экологических вопросов, которые возникают при утилизации растительных отходов;



- выполнить задачи, поставленные Правительством РФ «большие вызовы» и импортозамещения, развития наукоемкого производства.

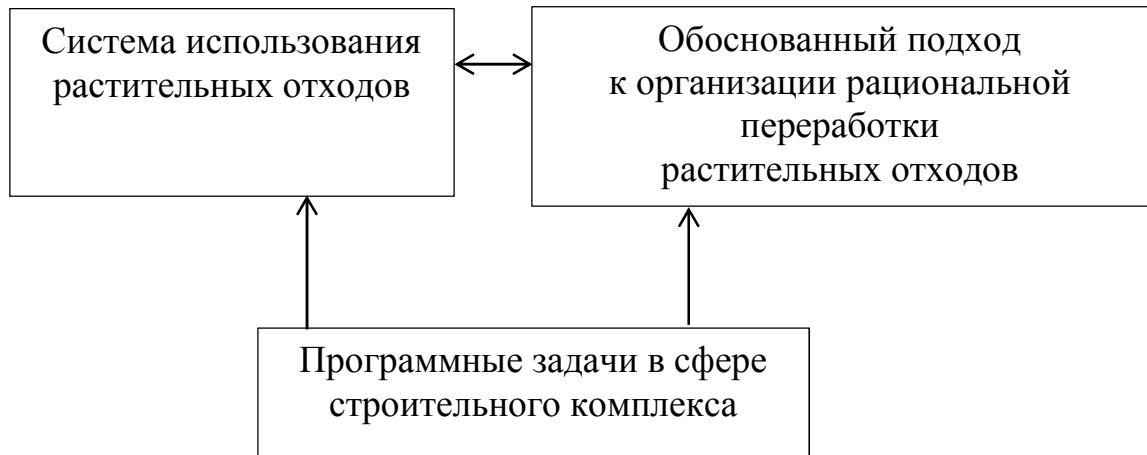


Рисунок 1.6 – Насущная проблема создания строительных материалов из растительных отходов

На основании проведенного анализа научных трудов российских и зарубежных ученых следует вывод, что в настоящее время в отечественной науке недостаточно разработаны теоретические основы процесса структурообразования композиционных теплоизоляционных плитных материалов из мягких отходов деревообработки и невозвратных отходов прядения льна и хлопка. Практическая реализация разработки данных композиционных материалов позволит наряду с удовлетворением потребностей строительства в недорогих теплоизоляционных материалах решать также и экологическую задачу по очистке территорий от производственных отходов.

Решение проблемы рационального использования образующихся растительных отходов возможно путем создания теплоизоляционных композитов с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

### **1.7. Выводы по состоянию вопроса**

1. Анализ состояния ресурсов растительных отходов показал, что на лесопромышленных комплексах и деревоперерабатывающих комбинатах ежегодно образуется свыше 200 млн м<sup>3</sup> отходов древесины, а потенциальный ресурс недревесного сырья в мире превышает 1 млрд т.

2. Анализ существующих направлений использования растительных отходов показал, что расширяется область исследований, направленных на применение растительного сырья и отходов его переработки, как с использованием химических направлений, так и путем включения в качестве наполнителей в различные композиционные материалы.

3. Существующая система утилизации растительных отходов не может предотвратить загрязнение окружающей среды продуктами сгорания. Тем самым растительные отходы являются полезным промышленным ресурсом, который может рационально использоваться.

4. Вопросы разработки структуры и состава теплоизоляционного материала на основе растительных отходов отечественными и зарубежными учеными проработаны не в полной мере, что обуславливает актуальность исследований химического и фракционного составов исходного сырья, а так же установление взаимосвязи эксплуатационных свойств композита от его состава и технологических режимов производства, в том числе - способы повышения огнезащиты.

## Глава 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### 2.1. Анализ теоретических исследований в области структурообразования теплоизоляционных композитов из растительных наполнителей

Существующие теплоизоляционные композиты на основе дискретных растительных наполнителей разделяются на наполненные (дисперсные) системы на основе непрерывной матрицы и дисперсной фазы наполнителя и высоконаполненные системы, содержащие большое количество наполнителя, образующего непрерывную сетку. По классификации Л. В. Мельниковой такие системы разделяются на коагуляционные (рисунок 2.1а) и конденсационные (рисунок 2.1б) [102].

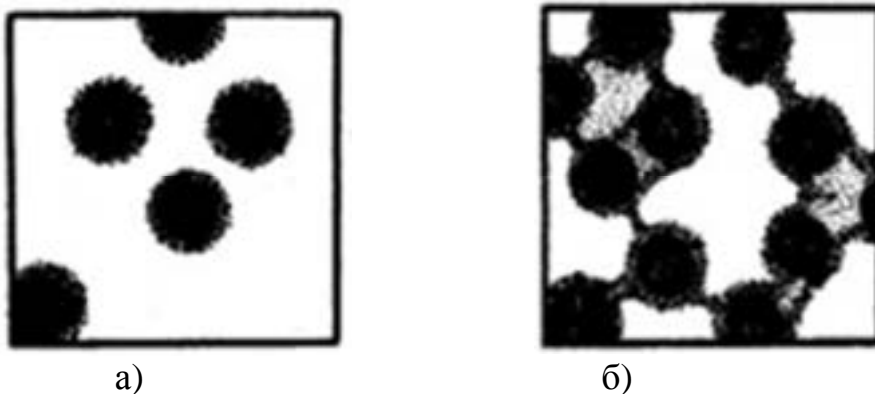


Рисунок 2.1 – Схемы структуры композитов:

а – коагуляционная; б – конденсационная

При значительных различиях в структуре общим является наличие граничного межфазного слоя между матрицей (связующим или вяжущим) и дискретным наполнителем. Композиты из растительных наполнителей –

невозвратных отходов прядения льняных и хлопковых волокон и мягких древесных отходов относятся к системам с конденсационной структурой. Основным структурообразующим компонентом данных наполнителей является целлюлоза.

Целлюлоза — биополимер, макромолекулы которого имеют линейное строение, вследствие чего целлюлозосодержащие материалы характеризуются повышенной скелетной жесткостью.

Элементарной единицей макромолекулы целлюлозы является целлобиозный остаток, состоящий из двух глюкопиранозных циклов (рисунок 2.2). Макромолекулы нативной (природной) целлюлозы состоят только из звеньев D-глюкозы, это подтверждено данными хроматографического анализа [158, 164, 172].

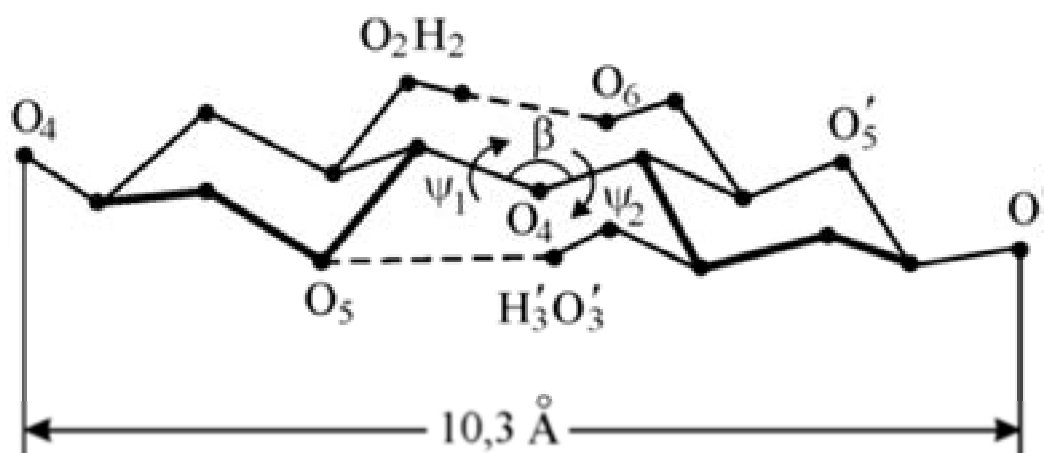


Рисунок 2.2 – Макромолекулярное целлобиозное звено целлюлозы

В природной целлюлозе все гликозидные связи между звеньями считаются равноценными. Однако такие исследователи, как В. И. Азаров, Дж. Оудиан, Н. И. Никитин, З. А. Роговин допускают существование в цепях древесной целлюлозы слабых связей между звеньями, появление которых обусловлено частичным окислением глюкозных звеньев с образованием карбонильных групп, ослабляющих обычные гликозидные связи [1, 117, 110, 131].

Современная точка зрения на структуру целлюлозы имеет в своей основе теорию аморфнокристаллического строения и основывается на данных

электронографических, рентгенографических и других исследований [1, 117, 110, 131]. Целлюлоза обладает склонностью к образованию первичных (элементарных) фибрилл, в которых группы параллельно расположенных цепей макромолекул связаны между собой множественными внутри- и межмолекулярными водородными связями. Первичная фибрилла представляет собой наименьшее надмолекулярное звено целлюлозы.

Выдвинутое такими исследователями, как Х. Долметч, О. Элlefсен и др. предположение, что существуют фибриллы со складчатыми цепями – [211, 264, 299] не согласовывается с механическими свойствами целлюлозных волокон [111]. В результате электронно-микроскопических и других исследований было установлено, что фибриллы целлюлозы имеют выпрямленную конформацию цепей [240]. Целлюлоза является кристаллическим полимером (среднее значение степени кристалличности в зависимости от вида растительного материала составляет 40...70 %). Согласно результатам рентгенографического анализа, степень кристалличности для древесной целлюлозы около 65 %, для хлопковой – около 75 % [109]. Наряду с кристаллическими областями макромолекула целлюлозы содержит и аморфные.

Наиболее широкое признание в настоящее время получила модель, предложенная Гессом с сотрудниками (рисунок 2.3), предполагающая регулярное чередование кристаллических и аморфных областей постоянных размеров вдоль оси элементарной фибриллы [230].

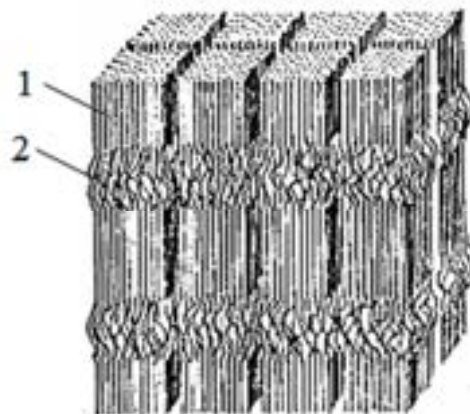


Рисунок 2.3 – Модель аморфно-кристаллических фибрилл гидратцеллюлозных волокон: 1 – кристаллические области, 2 – аморфные области

Модель аморфно-кристаллических фибрилл продолжает уточняться и совершенствоваться. Последняя версия такой модели была предложена М. Я. Иоловичем в работах [239, 240].

Для объяснения влияния воздействия воды на свойства целлюлозных волокон Херль разработал модель бахромчатых фибрилл [228]. Согласно этой модели фибрилла – это длинный и тонкий кристалл с выпрямленными цепями, на поверхности которой имеется «бахрома» – аморфная фаза, отвечающая за набухание и сорбционные свойства целлюлозы. Присоединение воды идет по гидроксилам как полностью, так и частично аморфизированных участков макромолекул целлюлозы.

Вид частично аморфизированных областей представлен в модели Денниса и Престона (рисунок 2.4) [12, 208].

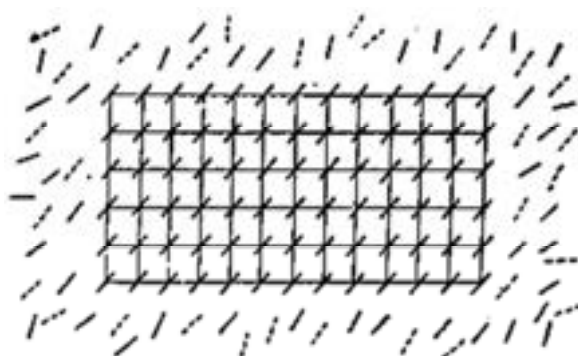


Рисунок 2.4 – Модель элементарной фибриллы природной целлюлозы

Согласно данной модели элементарные фибриллы имеют прямоугольное сечение размерами около  $5 \times 10$  нм, в центре которого имеется кристаллический стержень, окруженный паракристаллической частью из менее упорядоченной целлюлозы и гемицеллюлоз. Несмотря на меньшую степень упорядоченности, по мнению В. И. Азарова, М. Я. Иоловича данную область нельзя считать чисто аморфной [1, 67].

Мономерное звено целлюлозы содержит три гидроксильных группы (у С2, С3 и С6), которые образуют водородные связи, как внутримолекулярные, так и межмолекулярные (рисунок 2.5).

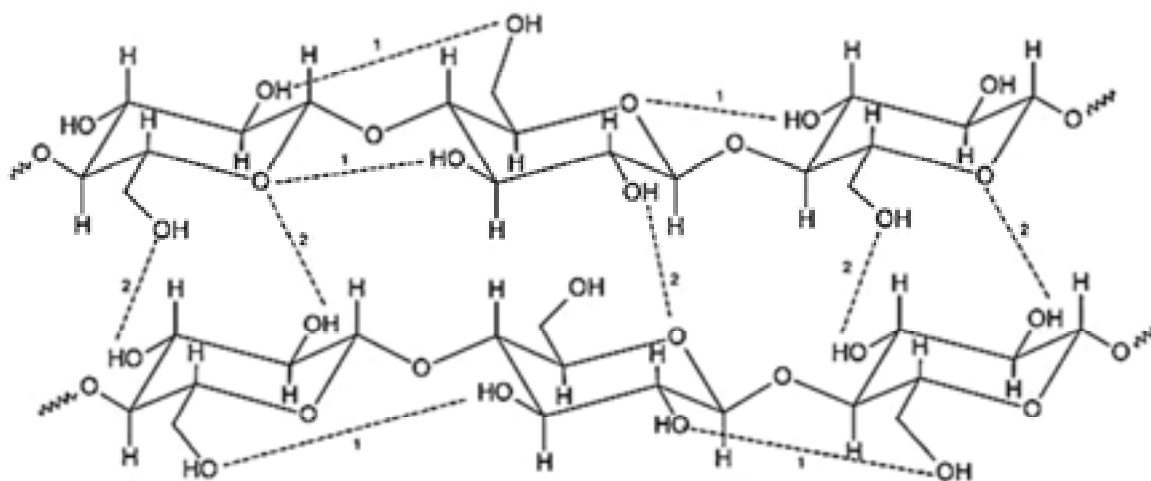


Рисунок 2.5 – Водородные связи в целлюлозе:

1 – внутри молекулы; 2 – между молекулами

Внутри- и межмолекулярные водородные связи в целлюлозе влияют на структуру и свойства композитов из материалов, построенных на основе волокон целлюлозы.

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. Водородные связи определяют практически все свойства целлюлозы из-за высокой энергии когезии, обусловленной Н-связями, превышающей прочность ковалентных связей в макромолекулах.

Для образования Н-связи электроотрицательные атомы должны сблизиться на расстояние около 0,25...0,28 нм, сопоставимое с размером мономерного звена. Чем расстояние меньше, тем прочнее водородная связь. Энергия Н-связей у целлюлозы составляет в среднем 28 кДж/моль, что относится к «средним связям». При расстояниях 27...28 нм образуются слабые связи, при расстояниях порядка 25 нм – «сильные».

Даже небольшое количество воды разрыхляет структуру целлюлозного волокна, увеличивает его внутреннюю поверхность, переводит аморфные участки целлюлозы из стеклообразного в высокоэластическое релаксационное состояние и, тем самым, способствует проникновению растворителей и реагентов. На рисунке 2.6 представлена схема изменения участка элементарной фибриллы при набухании в воде и происходящего при этом уменьшения степени кристалличности.

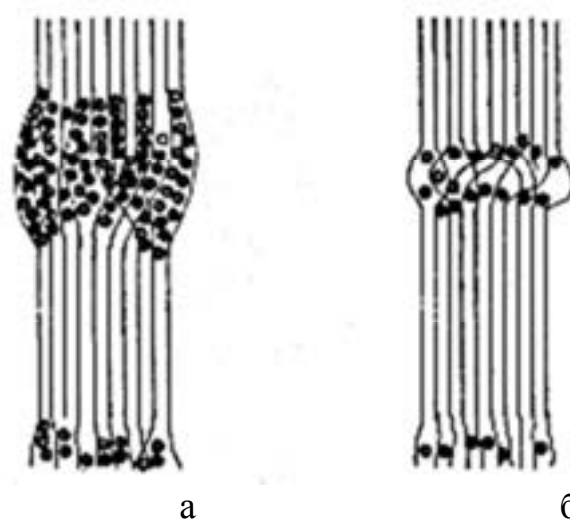


Рисунок 2.6 – Изменение степени кристалличности целлюлозы в зависимости от влажности: а – элементарная фибрилла, набухшая в воде; б – сухая целлюлоза; • – молекулы воды и их ассоциаты

При набухании вода в виде ассоциатов раздвигает некоторую часть кристаллического участка элементарной фибриллы, уменьшая его. Соответственно увеличивается аморфный участок. Наоборот, при усыхании вода создает силу капиллярной контракции, которая вновь стягивает молекулярные цепи, приводя их к расположению близкому к параллельному. Между ними остается незначительное количество молекул воды, связанных с целлюлозой водородными связями.

Конфигурация макромолекулы целлюлозы дает возможность реализации межмолекулярных взаимодействий при формировании структуры композитов из целлюлозосодержащих наполнителей. Большое количество исследований структурообразования материалов из растительных волокнистых



частиц выполнено применительно к целлюлозно-бумажному производству, меньше работ в области производства древесноволокнистых плит.

Исследуя образование структуры бумаги и картона, А. С. Смолин выдвинул предположение, что при удалении большей части воды, присутствующей в волокнистой массе, формируется структура волокнистого слоя, начинается освобождение межволоконных пространств от воды, в материал начинает проникать воздух. Образуется трехфазная система, в которой получает развитие граница раздела фаз воздух–вода. С этого момента межволоконные связи зависят от сил поверхностного натяжения воды, влияние которых увеличивается с развитием межфазной границы. По мере удаления воды силы поверхностного натяжения обеспечивают сближение волокон и увеличение прочности системы. При достижении влажности 40...45 % межволоконные прослойки [139] воды практически исчезают, вода сохраняется в виде мономолекулярных или близких к ним по толщине слоев, а также внутри волокон. С этого момента начинается интенсивное образование межволоконных водородных связей, что в результате сушки приводит к получению композита. А. С. Смолин считает, что по мере удаления внутриволоконной влаги увеличивается и прочность самих волокон, поскольку относительно сухое волокно прочнее гидратированного, так как образующие волокно фибриллы представляют менее подвижную связанную внутриволоконную структуру [138, 139, 140].

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.

В работе [78] отмечено, что силы связи между волокнами традиционно считаются наиболее слабым звеном структуры капиллярно-пористого и полидисперсного материала [65, 171].

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. По данным исследований [167] водородные связи в отливках из хорошо размолотой целлюлозы обеспечивают примерно 75 % прочности от всех связей между волокнами, а у неразмолотых они составляют только 20 %.

Получаемые при размоле отдельные древесные волокна и пучки характеризуются слаборазвитой поверхностью, покрытой преимущественно лигнином, который обладает незначительными адгезионными свойствами [123]. На стадии формирования древесноволокнистого ковра создается структура будущих плит. Последняя в значительной мере предопределяет прочность готового материала [15].

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.

Вопросы химических и физико-химических процессов формирования структуры древесноволокнистых плит исследованы в работах [89, 143].

Многие исследователи занимались методами ИК-спектроскопии древесноволокнистых плит [63, 115, 160]. На тот период существовало мнение [91], что невозможна оценка образуемых межмолекулярных связей в процессе образования композита. Это утверждение изменилось с появлением современных средств измерений.

## 2.2. Оценка межмолекулярных связей, формирующих структуру композита

### 2.2.1. Вклад ковалентных связей в структурообразование композита

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 карбаминоформальдегидного связующего, протекающего с отщеплением воды при воздействии температуры, представлена на рисунке 2.7. В результате взаимодействия формируется эфирная связь  $\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$ .

Диметилэфирная связь  $\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2$  в цепях карбаминоформальдегидного связующего на первой стадии отверждения является неустойчивой (рисунок 2.8).

В процессе сушки при температурном воздействии из метилэфирных связей отщепляется формальдегид  $\text{CH}_2\text{O}$ , при этом метилэфирная связь переходит в метиленовую  $\text{-CH}_2$  (рисунок 2.8).

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

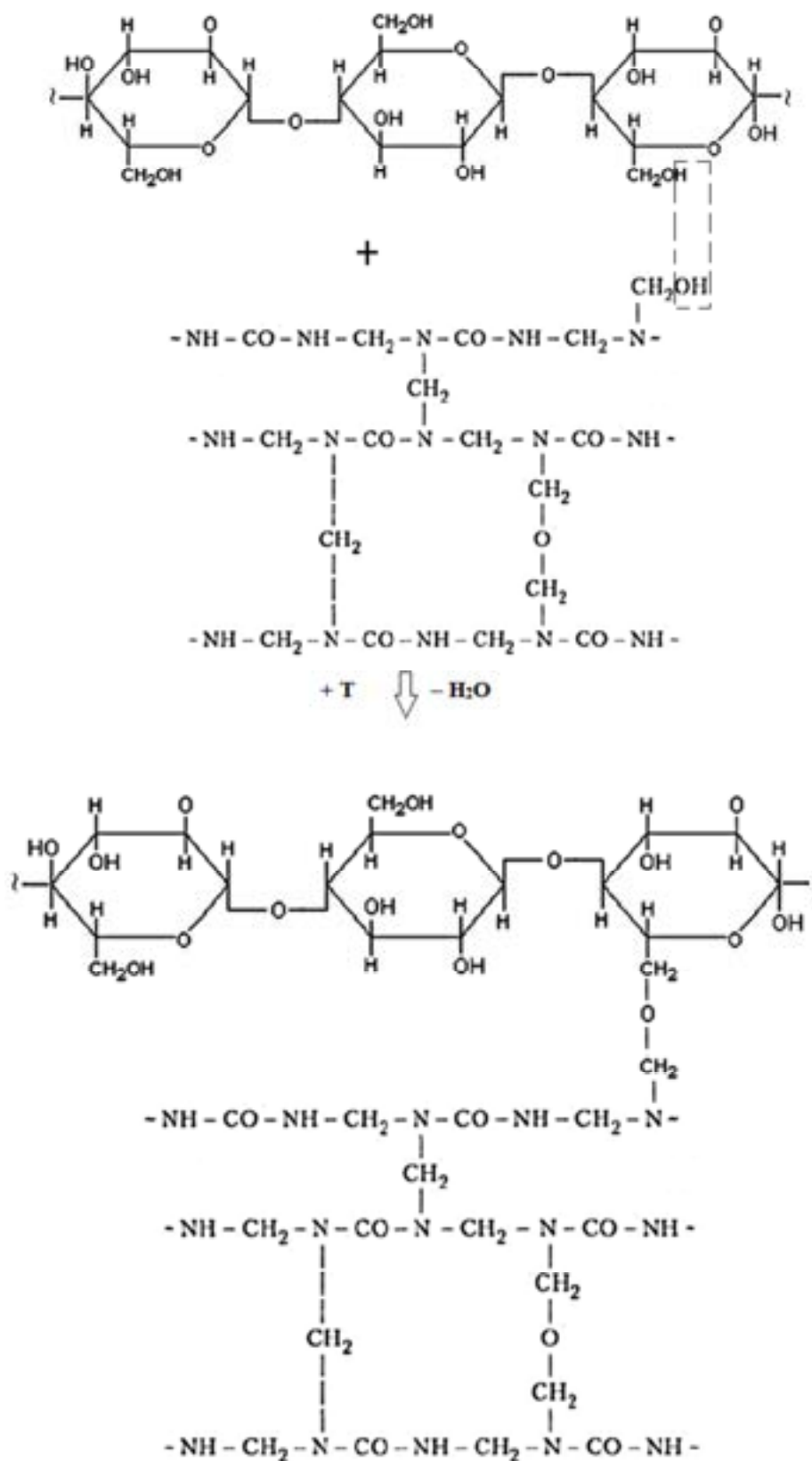


Рисунок 2.7 – Схема образования метиленэфирной связи между осажденным связующим и целлюлозной микрофибриллой

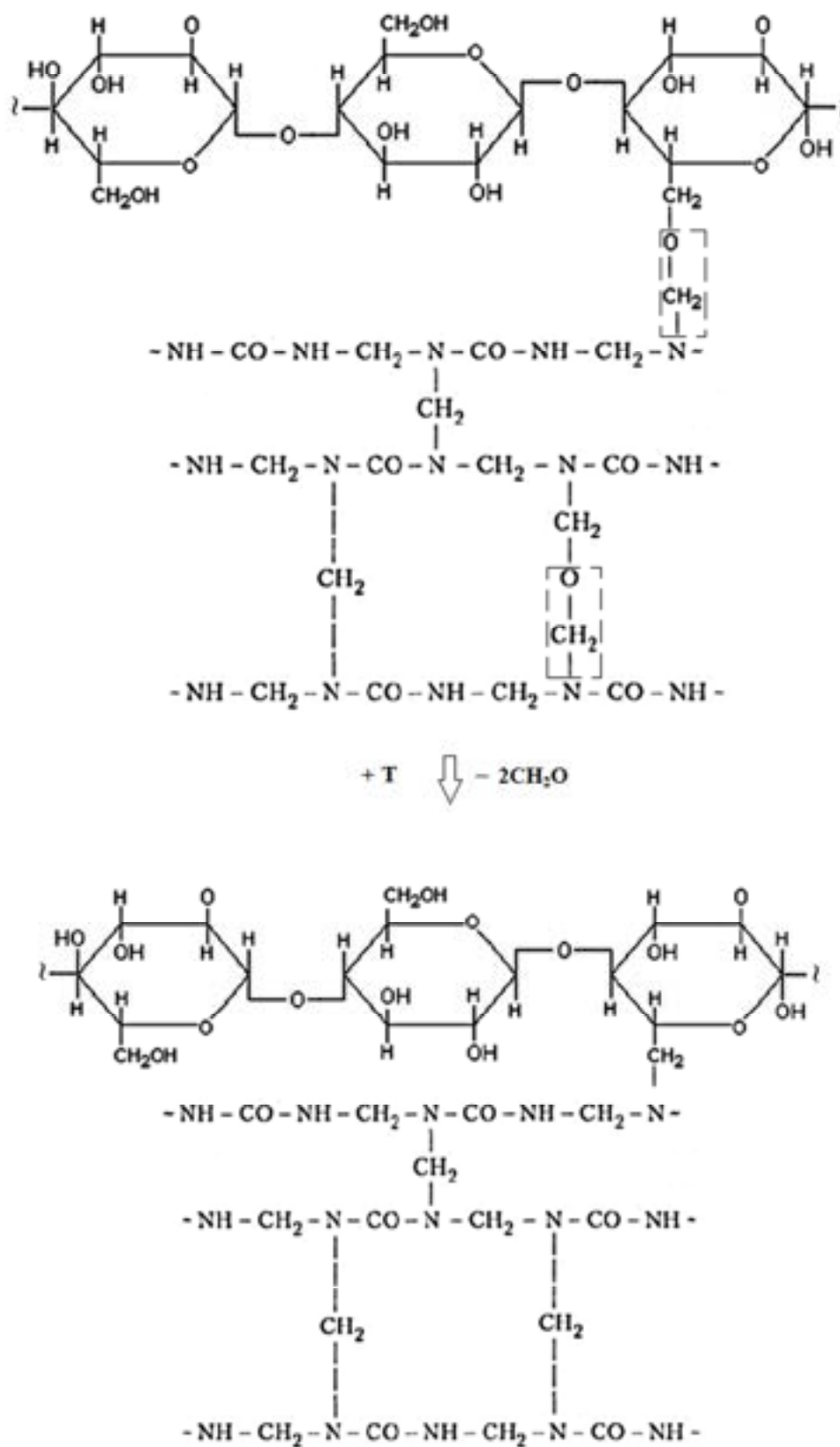


Рисунок 2.8 – Схема перехода метиленэфирных связей в метиленовые с отщеплением формальдегида

### 2.2.2. Количественная оценка межмолекулярных водородных связей

Для количественной оценки межмолекулярных водородных связей использовались методы ИК-спектроскопии. ИК-спектроскопия основана на явлении поглощения химическими веществами инфракрасного излучения с одновременным возбуждением колебаний молекул. Инфракрасное излучение представляет собой электромагнитную волну и характеризуется длиной волны  $\lambda$ , частотой  $\nu$  и волновым числом  $\bar{\nu}$ , которые связаны следующей зависимостью:

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{(c/n)} = \frac{1}{\lambda}, \quad (2.1)$$

где  $c$  – скорость света,  $n$  – показатель преломления среды [258].

В спектроскопии поглощения, частным случаем которой является ИК-спектроскопия, происходит поглощение молекулами фотонов определенной энергии, которая связана с частотой электромагнитной волны через постоянную Планка:

$$E_p = h \cdot \nu, \quad (2.2)$$

При поглощении фотона происходит возбуждение — увеличение энергии молекулы: она переходит из основного колебательного состояния  $E_1$  в некоторое возбуждённое колебательное состояние  $E_2$  так, что энергетическая разница между этими уровнями равна энергии фотона [258].

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu = hc\bar{\nu}, \quad (2.3)$$

Энергия поглощенного инфракрасного излучения расходуется на возбуждение колебательных переходов для веществ в конденсированном состо-

янии. Для газов поглощение кванта ИК-излучения приводит к колебательным и вращательным переходам.

ИК-спектроскопия представляет собой экспресс-метод установления структурных особенностей органических соединений. С помощью ИК-спектроскопии быстро и надежно идентифицируются разнообразные функциональные группы: карбонильная, гидроксильная, карбоксильная, амидная, амина, циано и др.; а также различные непредельные фрагменты: двойные и тройные углерод-углеродные связи, ароматические или гетероароматические системы. Методами ИК-спектроскопии изучают внутри- и межмолекулярные взаимодействия, например, образование водородных связей.

При воздействии на смесь растительных частиц и воды температуры и давления увеличивается подвижность микрофибрилл. При сближении микрофибрилл на расстояние 25...28 нм возникают водородные связи между микрофибриллами наполнителя.

Вторая составляющая процесса структурообразования композита – формирование фронта водородных связей между гидроксилами целлюлозы растительного наполнителя, представлена на рисунке 2.9.

Традиционно считается, что невозможно выделить долю межмолекулярных связей в общем числе водородных связей целлюлозы наполнителя. Однако сравнение интенсивности поглощения в области внутри- и межмолекулярных водородных связей  $3360...3400\text{ см}^{-1}$  для образцов растительного наполнителя и композита на его основе позволяет численно вычленить вклад межмолекулярных водородных связей, обусловленных взаимодействием между гидроксилами микрофибрилл наполнителя.

ИК-спектры образцов снимали на установке синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3 Jupiter, совмещенной с приставкой ИК-Фурье.

На рисунках 2.10, 2.11 приведены результаты спектроскопического анализа для наполнителя и композита из отходов хлопкового и льняного волокон.

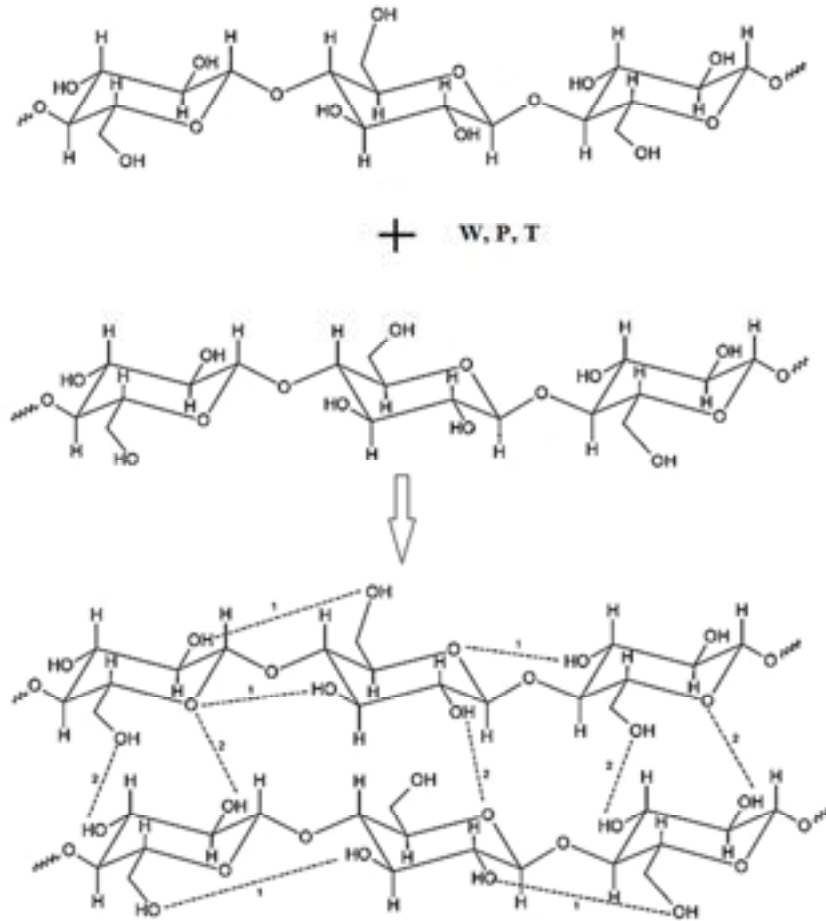


Рисунок 2.9 – Формирование водородных связей между микрофибриллами

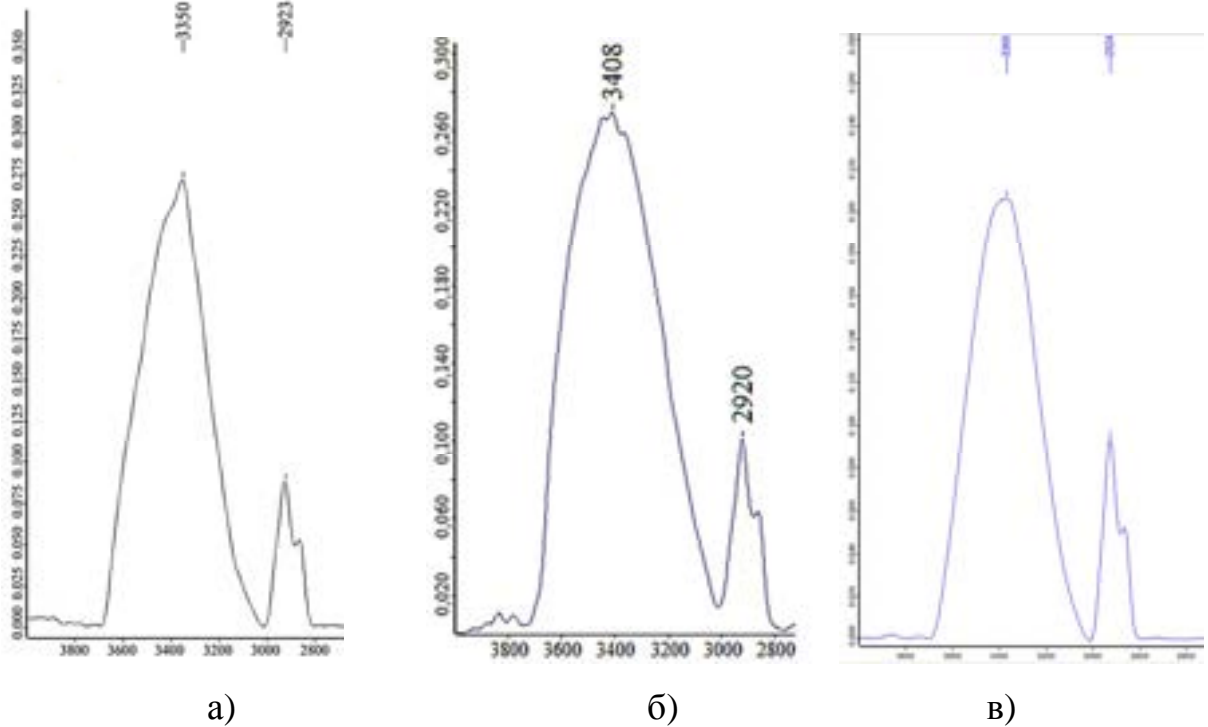


Рисунок 2.10 – ИК-спектры:

а – отходов хлопкового волокна; б – композита из отходов хлопкового волокна на ФФС; в – композита из отходов хлопкового волокна на КФС



При увеличении внутримолекулярных водородных связей пик полосы поглощения смещается в сторону уменьшения длины волны (3350 – у наполнителя; 3408 – композита) и значительном увеличении ее интенсивности. Интенсивность в области водородных связей больше у ИК-спектров композита в сравнении с показателем наполнителя. Результаты сравнения представлены в таблице 2.1.

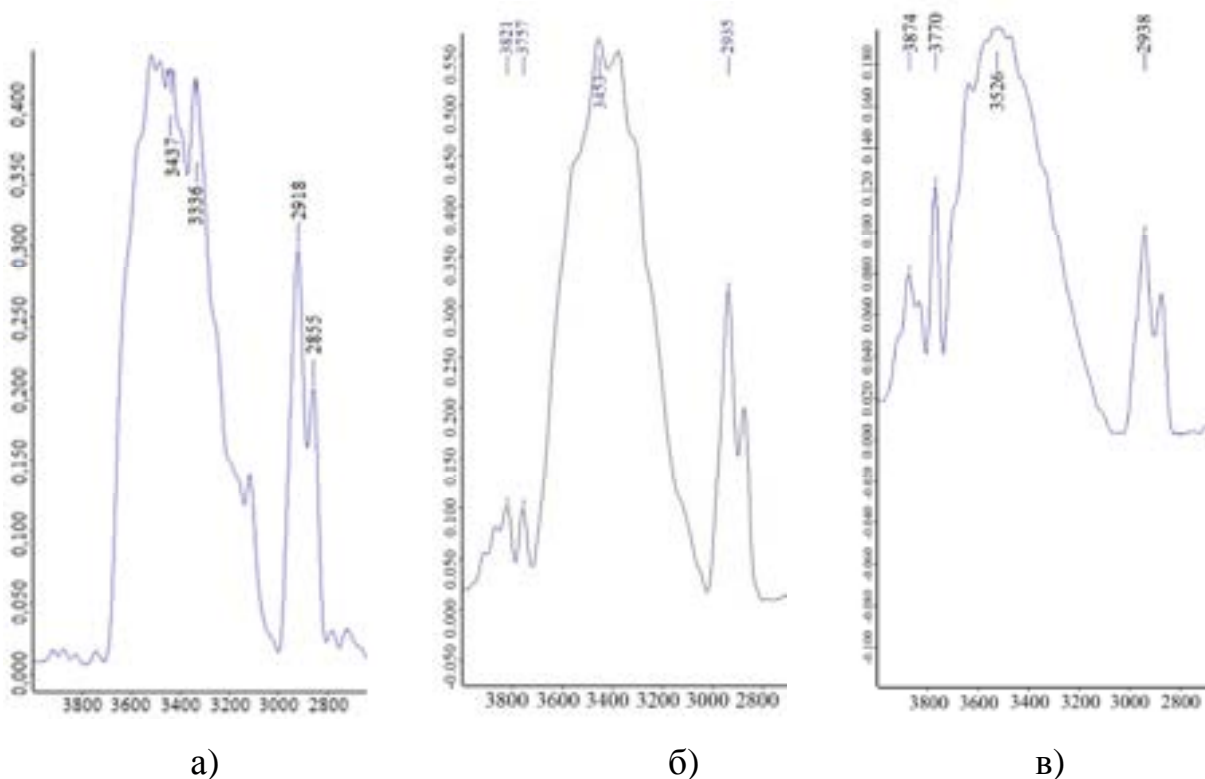


Рисунок 2.11 – ИК-спектры:

а – отходов льняного волокна; б – композита из отходов льняного волокна на ФФС; в – композита из отходов льняного волокна на КФС

Таблица 2.1 – Значения интенсивности поглощения в области водородных связей

Растительный наполнитель	Интенсивность поглощения $I(\nu)$ , $\text{см}^{-1}$		
	Наполнитель	КФС	ФФС
Хлопок	3350	3366	3408
Лен	3437	3821	3874

Число межмолекулярных водородных связей для композита увеличилось в сравнении с показателем для наполнителя. При изготовлении композитов согласно выбранных по рекомендациям значений факторов обеспечивается большое количество водородных связей, об этом свидетельствует широкая полоса поглощения ( $3366 \text{ см}^{-1}$  для композита из отходов хлопка на КФС,  $3874 \text{ см}^{-1}$  для композита из отходов льна на КФС). Присутствующая в композитах вода является прочно связанной, о чем говорит полоса поглощения  $1655 \text{ см}^{-1}$ . Метилольные группы (полоса поглощения ( $1002 \text{ см}^{-1}$ ) в композитах отсутствуют.

### 2.3. Анализ моделей проводимости

Процесс создания структуры композита зависит от структуры наполнителя и взаимодействия со связующим. Это объясняет процессы, происходящие в композите на стадиях производства и эксплуатации. Для теоретического обоснования структуры композита из растительных отходов рассмотрен ряд существующих моделей.

Целый ряд структурно чувствительных свойств физико-механических смесей, т.е. свойств, величина которых для смеси в целом зависит не только от концентраций компонентов в смеси (таких, например, как плотность или удельный объем), но и от структуры смеси и ориентации границ раздела компонентов в силовом поле объединяет термин «обобщенная проводимость». Структурно-чувствительными для смесей и композиционных материалов являются диэлектрическая и магнитная проницаемости, теплопроводность, модули сдвига, упругость и т.д.

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 [56].

Г. Н. Дульнев и Ю. П. Заричняк классифицировали структуры несмешивающихся и химически не реагирующих компонентов по положениям границы раздела на 2 основные группы: структуры с вкраплениями (рисунок 2.12а) и структуры с взаимопроникающими компонентами (рисунок 2.12б). Своеобразный симбиоз двух основных типов структур, представленный на рисунке 2.12 в,г, назван авторами классификации комбинированной структурой [56]. Само собой разумеется, что в пределах каждого из указанных типов структур может наблюдаться как хаотическое, так и упорядоченное включение компонентов.

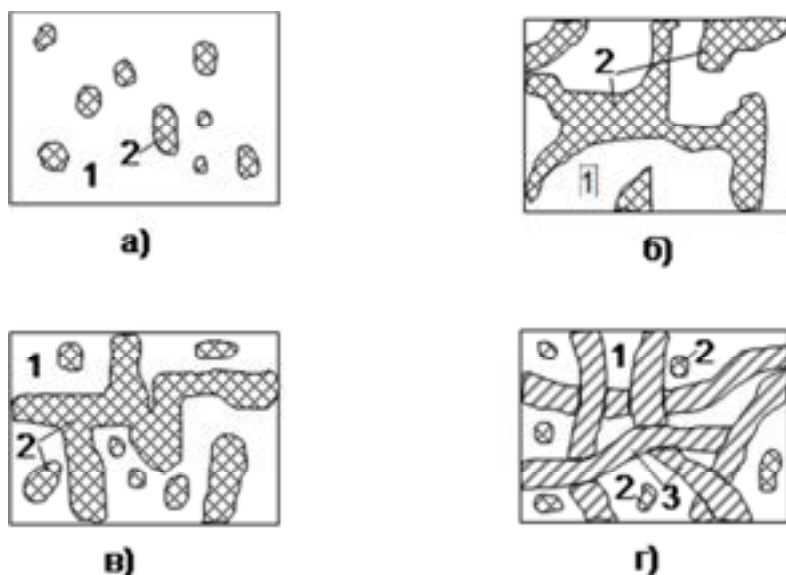


Рисунок 2.12 – Типы структур по Дульневу-Заричняку:

1 – матрица; 2, 3 – наполнитель

Г. Н. Дульнев и Ю. П. Заричняк сформировали ряд очень важных положений (названных ими правилами) теории обобщенной проводимости (ТОП). Так, впервые в ТОП они указали, что упорядоченная структура может рассматриваться как частный случай хаотической, а именно, эффективная обобщенная проводимость смеси ( $\lambda_{эф}$ ) систем с упорядоченной и хаотической структурой равны друг другу, если структуры адекватны (в смысле принадлежности к одинаковому типу модели – с вкраплениями, либо с взаимо-

проникающими компонентами), а обобщенные проводимости и объемные концентрации компонентов хаотической и упорядоченной структуры одинаковы.

Далее, вводя понятие элементарной ячейки как элемента структуры, периодическое повторение которого в разных направлениях образует систему с дальним порядком, Г.Н. Дульнев и Ю.П. Заричняк сформулировали правило о том, что  $\lambda_{эф}$  системы с дальним порядком равно  $\lambda_{эф}$  элементарной ячейки этой системы. Это правило вернее назвать теоремой (которую, естественно, можно доказать), однако даже бездоказательное, интуитивное формулирование этой теоремы следует признать важной вехой в развитии ТОП, т.к. практическая ценность содержащегося утверждения несомненна: исследование и анализ сложного периодического образования заменяется изучением простого единичного элемента – элементарной ячейки структуры.

Для древесины В. И. Пятакиным [151] были разработаны структурные модели древесины (рисунок 2.13) для хвойных (а) и лиственных пород (б).

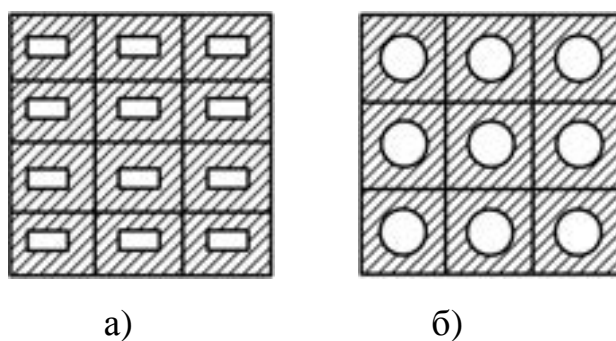


Рисунок 2.13 – Модели структур древесины по Пятакину В.И.

С учетом представленных типов структур реагирующих компонентов была разработана модель композиционного материала на основе растительных отходов и связующего.

## **2.4. Моделирование структуры разрабатываемого композиционного материала из целлюлозосодержащих отходов**

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.

Дисперсная система – это такая система, в которой одна дисперсная фаза распределена в среде другого вещества (дисперсионной среды) так, что между частицами дисперсной фазы и дисперсионной средой есть граница раздела фаз. Принято считать, что в дисперсных системах между фазами отсутствуют химические связи. Однако П. А. Ребиндер рассматривал дисперсность материалов как универсальное состояние материалов в природе и различных технологических процессах [130]. К капиллярно-дисперсным системам относятся такие биополимеры, как древесина, кожа, а также технологически полученные композиты – бумага, древесноволокнистая плита и другие материалы. В отличие от коллоидных растворов такие дисперсные системы, как древесноволокнистые плиты мокрого способа производства, термодинамически неустойчивы только на стадии формования, на дальнейших операциях они подвергаются структурно-механической стабилизации. П. А. Ребиндер обосновал следующее принципиальное положение: для проведения процессов формирования материалов недостаточно только механических воздействий, важны такие поверхностные физико-химические явления, как адсорбция, смачивание, адгезия, электрохимические процессы, химические реакции и т. п. П. А. Ребиндер отмечал «естественной возможностью использования конденсационного структурообразования в качестве весьма общего метода получения пористых материалов из природных высокомолекулярных веществ и синтетических полимеров» [130].

К особенностям такой дисперсной системы, как мягкие композиты мокрого способа производства на основе растительных наполнителей и по-

ликонденсационного 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 2.14).

Из рисунка 2.14 видно, что основными компонентами структурной модели композиционного материала являются 2, 3, 5, которые могут быть расположены в хаотичном порядке и различно ориентированными относительно друг друга. 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  $3 \text{ м}^2/\text{г}$  [116].

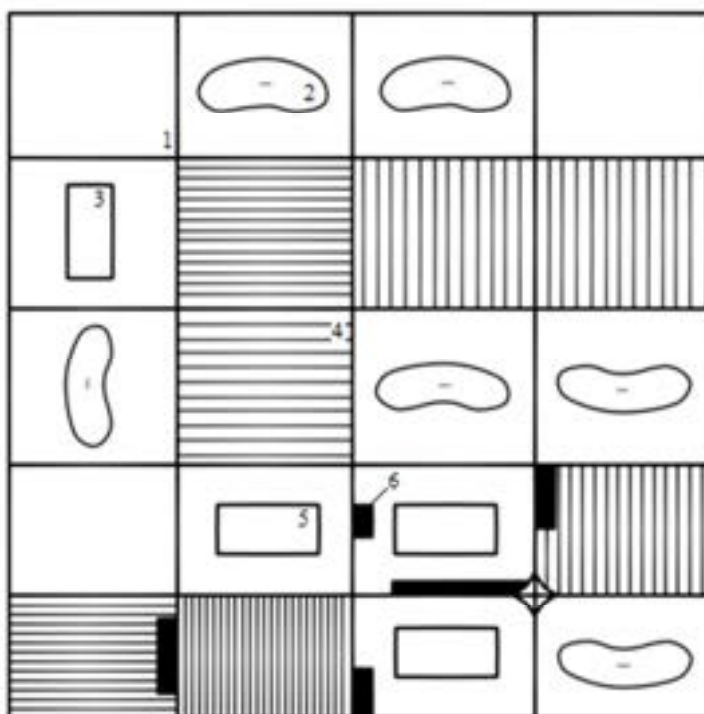


Рисунок 2.14 – Структурная модель композиционного материала:

1 – воздух; 2, 3, 5 – наполнитель (отходы хлопкового волокна, отходы льняного волокна, отходы древесины); 4 – вода; 6 – связующее

В плитном производстве приняты нормы расхода связующего: 1...7 г/м<sup>2</sup> поверхности частиц (по условной абсолютно сухой смоле), или 15...80 кг/м<sup>3</sup> плит [28, 116]. Это приводит к точечному нанесению связующего на лигноцеллюлозные частицы.

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 физико-механические и эксплуатационные показатели, в том числе – теплопроводность.

## **2.5. Закономерности теплопроводности композита на основе целлюлозосодержащих отходов**

Математическое описание закономерностей передачи тепловой энергии в материале являлось главной задачей исследователей со второй половины XXVIII в., результатом работ в данном направлении было создание Ж. Б. Фурье теории теплопроводности. Со времени выхода в свет «Аналитической теории теплоты» Фурье прошло почти 200 лет, а исследования в области теплопроводности материалов не только не теряют актуальности, а становятся все более значимыми. Кроме причин прикладного характера, это объясняется тем, что теоретические закономерности передачи тепла в материале определяются в рамках частных задач – теплопроводность через плоскую пластину, через цилиндрическую или шаровую стенку. Разработка огромного количества композиционных материалов со сложной структурой межфазных взаимодействий приводит к значительному усложнению описания тепловых явлений в материале.

Формализация описания явлений как теплового, так и другого энергетического характера, возможна при использовании теории обобщенной проводимости. Любая задача из области стационарных потоков находится в компетенции данной теории, при этом используется принцип математического описания различных свойств материала из смеси дискретных частиц «одинаковые уравнения – одинаковые решения» [184].

Задача определения коэффициента теплопроводности слоя из дискретных частиц с поровым пространством сама по себе достаточно сложна. О. Кришер и Р. С. Бернштейн предложили рассматривать слой дискретных частиц как набор пластинок и газовой среды [253, 95]. К сложностям использования метода можно отнести то, что коэффициент теплопроводности определяется в интервале между минимальным и максимальным значениями. Максимальный коэффициент теплопроводности пористого материала  $\lambda$ , Вт/(м·К) будет определяться по формуле

$$\lambda = \lambda_m(100 - m)/100 + \lambda_r m/100, \quad (2.4)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала частиц, Вт/(м·К);

$\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);

$m$  – пористость, %.

Аналогичный методу Кришера подход в определении проводимости смесей использован в работе О. Винера. Верхняя граница Винера эффективной теплопроводности пористого тела достигается в системе, состоящей из плоскопараллельных слоев дискретных частиц, расположенных вдоль вектора теплового потока [306]. Нижняя граница Винера достигается в аналогичной системе, но со слоями частиц наполнителя, перпендикулярными тепловому потоку. Верхняя граница эффективной теплопроводности  $\lambda_{eff}$  (формула 2) и нижняя граница (формула 3) выражаются следующими уравнениями Винера

$$\lambda_{eff} = f_1 \lambda_1 + f_2 \lambda_2 + f_3 \lambda_3, \quad (2.5)$$



$$\lambda_{eff} = \frac{1}{\frac{f_1}{\lambda_1} + \frac{f_2}{\lambda_2} + \frac{f_3}{\lambda_3}}, \quad (2.6)$$

где  $f_j$ – объемная доля  $j$ -той фазы,  $j = 1 \dots 3$ ;

$\lambda_j$ – теплопроводность  $j$ -той фазы.

Для композиционных материалов процессы теплопередачи на поверхностях раздела фаз значительно зависят от наличия в системе свободной воды. Коэффициент теплопроводности воды составляет 0,60 Вт/(м·К) [262], что более чем в 20 раз выше, чем данный показатель для воздуха. Поэтому, если вода присутствует в поровом пространстве, ее эффект конкурирует с действием воздуха, и теплопроводность композиционного материала может рассматриваться как результат синергии с эффектом наполнителя и матрицы [317].

Многие исследователи рассматривают композиты на основе дискретных наполнителей как смесь фаз. Так П. Збижек в работе [314] рассматривает пористый материал на основе гидравлического вяжущего как смесь четырех фаз, а именно твердой фазы гидрата извести  $\lambda_i$  и кварцевого песка  $\lambda_c$ , фазы воды  $\lambda_v$  и газообразной – воздуха  $\lambda_w$ . Компоненты взяты в объемных соотношениях  $f$ . Для расчета коэффициента теплопроводности композиционного материала  $\lambda_m$ , Вт/(м·К) автором использовано правило смешения Л. Рэлея:

$$\frac{\lambda_m - 1}{\lambda_m + 2} = f_i \left( \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_i + 2} \right) + f_c \left( \frac{\lambda_c - 1}{\lambda_c + 2} \right) + f_v \left( \frac{\lambda_v - 1}{\lambda_v + 2} \right) + f_w \left( \frac{\lambda_w - 1}{\lambda_w + 2} \right). \quad (2.7)$$

В работах З. Хашина с коллегами уравнения расчета теплопроводности двухфазных систем были также получены в виде верхней и нижней границ (так называемые границы Хашина-Штрикмана). В исследованиях З.

Хашина они были распространены на трех- и четырехфазные системы [225]. Нижний предел эффективной теплопроводности может быть выражен как

$$\lambda_l = \lambda_1 + \frac{3\lambda_1}{1 + \sum_{i=2}^n f_i \frac{\lambda_i - \lambda_1}{2\lambda_1 + \lambda_i}}, \quad (2.8)$$

и верхний предел как

$$\lambda_u = \lambda_n + \frac{3\lambda_n}{1 + \sum_{i=1}^{n-1} f_i \frac{\lambda_i - \lambda_n}{2\lambda_n + \lambda_i}} - 1, \quad (2.9)$$

где  $f_i$  – объемные доли  $i$ -той фазы,  $i = 1 \dots n$ , при этом  $f_1 + f_2 + \dots + f_n = 1$ ;

$\lambda_1$  – теплопроводности-той фазы, при этом  $\lambda_1 < \lambda_2 \dots < \lambda_n$ .

Все рассмотренные способы определения коэффициента теплопроводности справедливы для дисперсных систем.

Методы теории обобщенной проводимости были использованы для оценки коэффициента теплопроводности композиционного материала из невозвратных растительных отходов прядения льняных и хлопковых волокон и синтетических поликонденсационных связующих [295]. Материал получали методом мокрого формования и сушки по технологии мягких древесно-волоконистых плит. Композиционные плитные материалы изготавливались средней плотностью  $275 \text{ кг/м}^3$ , расход связующего составлял 10...30 % от массы растительного наполнителя. Растительные отходы смешивались с водой, связующим (КФС – карбамидоформальдегидная смола и отвердитель; ФФС – фенолоформальдегидная резольная смола), формовались, лишняя вода отжималась. Композиты сушились при температуре  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  до влажности  $8 \pm 0,5 \%$ . После выдержки определялись физико-механические показатели [147] и коэффициент теплопроводности образцов плит. Значение коэффициента теплопроводности материала определялось с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения

теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» [48].

Коэффициент теплопроводности двухкомпонентного материала можно определить по формуле В.И. Одеlevского [113]:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{2(1-n)\lambda_1 + (1+2n)\lambda_2}{(2+n) + (1-n)\lambda_2/\lambda_1}, \quad (2.10)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности непрерывной (большей по объему) фазы, Вт/(м·К);

$\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности диспергируемой фазы, Вт/(м·К);

$n$  – массовая доля диспергируемой фазы,  $n \leq 0,4$ .

Коэффициент теплопроводности трехкомпонентного материала можно определить по формуле В.И. Одеlevского [56]:

$$\lambda = \lambda_{\text{св}} \left\{ \frac{V_1}{1-V_{\text{св}}} \left[ 1 - \frac{1-V_{\text{св}}}{\frac{1}{(1-\nu_1)} - \frac{V_{\text{св}}}{3}} \right] + \frac{V_2}{1-V_{\text{св}}} \left[ 1 - \frac{1-V_{\text{св}}}{\frac{1}{(1-\nu_1)} - \frac{V_{\text{св}}}{3}} \right] \right\}, \quad (2.11)$$

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

Результаты аналитического определения коэффициента теплопроводности образцов композитов представлены в таблицах 2.2–2.4.

Таблица 2.2 – Коэффициент теплопроводности компонентов

Коэффициент теплопроводности компонента, Вт/(м·К)				
Вид наполнителя, связующего				
Хлопок	Лен	Древесина	КФС	ФФС
0,066	0,056	0,08	0,400	0,300

Таблица 2.3 – Коэффициент теплопроводности двухкомпонентных композиционных материалов

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента		Коэффициент теплопроводности композита, Вт/(м·К)
	наполнителя	связующего	расчетный
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,99	0,01	<u>0,067</u> 0,057
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,97	0,03	<u>0,069</u> 0,059
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,95	0,05	<u>0,072</u> 0,061
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,93	0,07	<u>0,073</u> 0,064
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,91	0,09	<u>0,075</u> 0,066
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,88	0,12	<u>0,077</u> 0,070
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,87	0,13	<u>0,078</u> 0,071
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,84	0,16	<u>0,079</u> 0,073
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,98	0,02	<u>0,068</u> 0,058
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,96	0,04	<u>0,069</u> 0,060
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,94	0,06	<u>0,071</u> 0,062
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,93	0,07	<u>0,072</u> 0,063
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,91	0,09	<u>0,072</u> 0,065
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,89	0,11	<u>0,074</u> 0,068
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,87	0,13	<u>0,076</u> 0,070
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,84	0,16	<u>0,078</u> 0,073

Таблица 2.4 – Коэффициент теплопроводности трехкомпонентных композиционных материалов

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента			Коэффициент теплопроводности композита, Вт/(м·К)
	наполнителя		связующего	расчетный
	<u>Хлопок</u> Лен	древесина		
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,79	0,2	0,01	<u>0,069</u> 0,061
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,77	0,2	0,03	<u>0,071</u> 0,063
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,75	0,2	0,05	<u>0,072</u> 0,064
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,73	0,2	0,07	<u>0,074</u> 0,066
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,71	0,2	0,09	<u>0,077</u> 0,068
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,68	0,2	0,12	<u>0,079</u> 0,071
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,67	0,2	0,13	<u>0,081</u> 0,072
<u>Хлопок + древесина/КФС</u> Лен/КФС + древесина/КФС	0,64	0,2	0,16	<u>0,083</u> 0,074

Окончание табл. 2.4

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента			Коэффициент теплопроводности композита, Вт/(м·К)
	наполнителя		связующего	расчетный
	<u>Хлопок</u> Лен	древесина		
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,79	0,2	0,01	<u>0,069</u> 0,061
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,78	0,2	0,02	<u>0,070</u> 0,061
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,76	0,2	0,04	<u>0,072</u> 0,063
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,74	0,2	0,06	<u>0,073</u> 0,064
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,73	0,2	0,07	<u>0,074</u> 0,066
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,71	0,2	0,09	<u>0,075</u> 0,068
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,69	0,2	0,11	<u>0,077</u> 0,071
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u> Лен + древесина/ФФС	0,67	0,2	0,13	<u>0,079</u> 0,073

Сравнение расчетных с экспериментальными значениями рассмотрены в главе 5.

## **2.6. Решение задачи теплопроводности композита на основе метода конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics**

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. Программный модуль предоставляет собой набор инструментов для выполнения теплового анализа пространственных объектов в конечно-элементной постановке.

Выбор метода исследования влияния компонентов на параметры теплопроводности обусловлен сложностью процессов, протекающих в композите при приложении тепловой нагрузки, в отличие от традиционного способа решения задачи, когда композит рассматривается как ортотропное тело однородной структуры.

Для выполнения расчетов необходимо иметь трехмерную модель объекта (рисунок 2.15), построенную непосредственно в системе трехмерного моделирования COMSOL или импортированную в систему с помощью средств импорта моделей. Для предварительного анализа принят однослойный элемент материала в виде тонкой пластины. Длина пластины соответствует толщине теплоизоляционного слоя композита в некоторой ограждающей конструкции. Взаимное расположение компонентов в композите представлено на рисунках 2.16, 2.17.

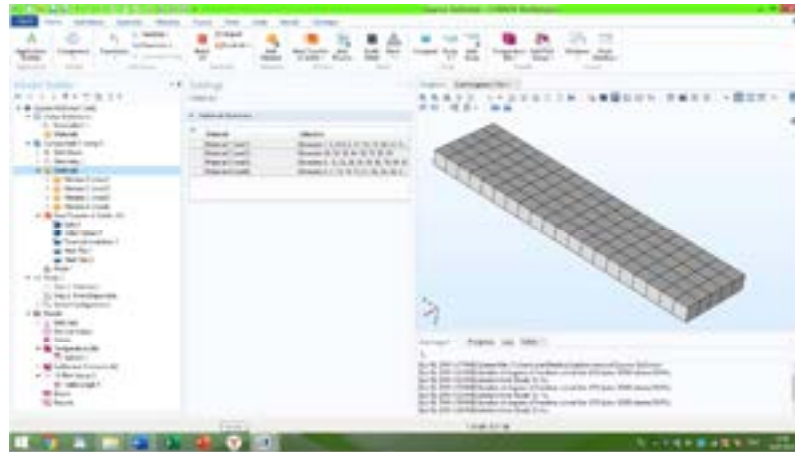


Рисунок 2.15 – Расчетная 3D-модель композита:

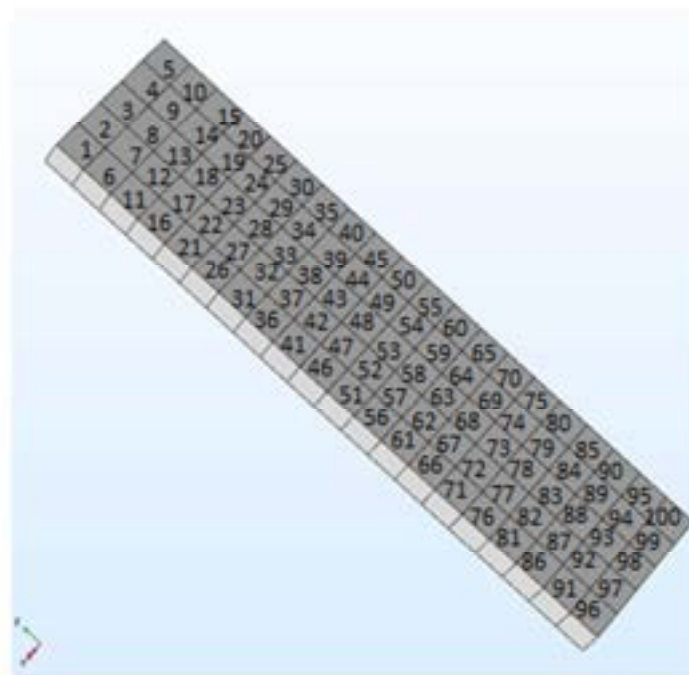


Рисунок 2.16 – Схема расположения компонентов:

5, 13, 24, 31, 42, 64, 83, 91 – воздух; 3, 15, 22, 29, 36, 48, 56, 65, 74, 89 – вода;  
 1, 8, 9, 11, 12, 17, 20, 21, 23, 25, 33, 34, 41, 44, 47, 49, 55, 57, 59, 67, 68, 70, 71,  
 78, 79, 82, 90, 92, 94 – связующее; 2, 4, 6, 7, 10, 14, 16, 18, 19, 26, 27, 28, 30,  
 32, 35, 37, 38, 39, 40, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 54, 58, 60, 61, 62, 63, 66, 69, 72,  
 73, 75, 76, 77, 80, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 93, 95, 96, 97, 98, 99, 100 – наполни-  
 тель



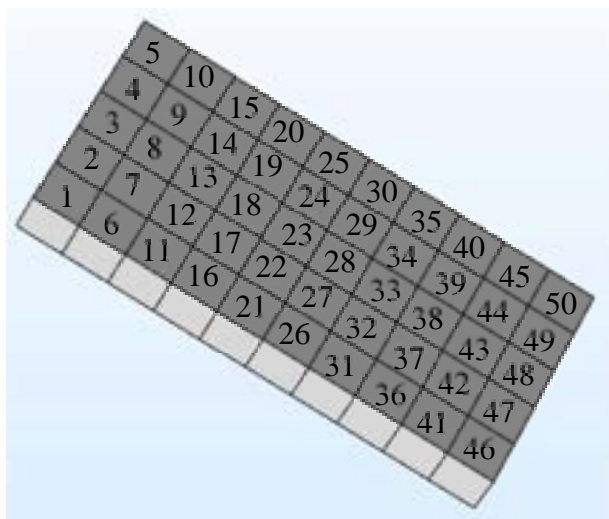


Рисунок 2.17 – Схема расположения компонентов:

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

На следующем этапе расчетов осуществляется генерация расчётных систем уравнений и их решение. Необходимо отметить, что в COMSOL задача теплопроводности имеет две возможные постановки:

- стационарная теплопроводность — осуществляется расчет установившихся («стационарных») температурных полей конструкции под действием приложенных тепловых граничных условий. Другими словами, подразумевается, что тепловые нагрузки действуют неопределенно долгое время, система пришла в равновесное состояние и температурные поля не изменяются во времени — в каждой точке системы температура имеет свое установившееся значение;

- нестационарная теплопроводность — расчет температурных полей конструкции осуществляется в зависимости от времени. Другими словами, температурные нагрузки были приложены относительно недавно и в системе происходит активное перераспределение температурных полей — переходный процесс. Такая ситуация наблюдается, когда тело подвергается нагреву

или охлаждению, то есть когда его температура изменяется с течением времени.

Для исследований выбираем нестационарный процесс, соответствующий реальным условиям работы конструктивного элемента. Зададим параметры временного анализа: время моделирования – 7200 с, шаг моделирования – 600 с, начальная температура 20 °С, плотность теплового потока 10 Вт/м<sup>2</sup>. После этого проведем расчет и проанализируем полученные результаты. В отличие от стационарного теплового расчета, в котором фигурирует один главный результат — установившаяся в системе температура, в результате нестационарного расчета получаем температурные поля в различные моменты времени в пределах заданного временного интервала (рисунках 2.18–2.23).

Анализируя полученные результаты, видно, что в местах расположения разных компонентов происходит более интенсивное изменение температуры. Уже через 600 с после приложения тепловой нагрузки к правой поверхности композита на нем устанавливается температура 306 до 294 К, при этом на противоположной – левой стороне температура практически не меняется за исключением тех участков, где расположены компоненты воды и связующего и сказывается влияние наполнителя с хорошими теплоизоляционными свойствами.

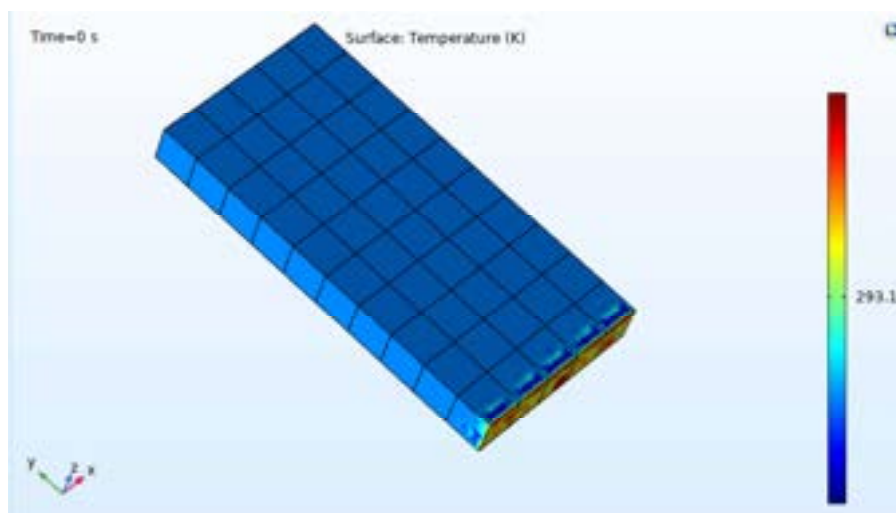


Рисунок 2.18 – Результаты расчета,  $\tau = 0$  с

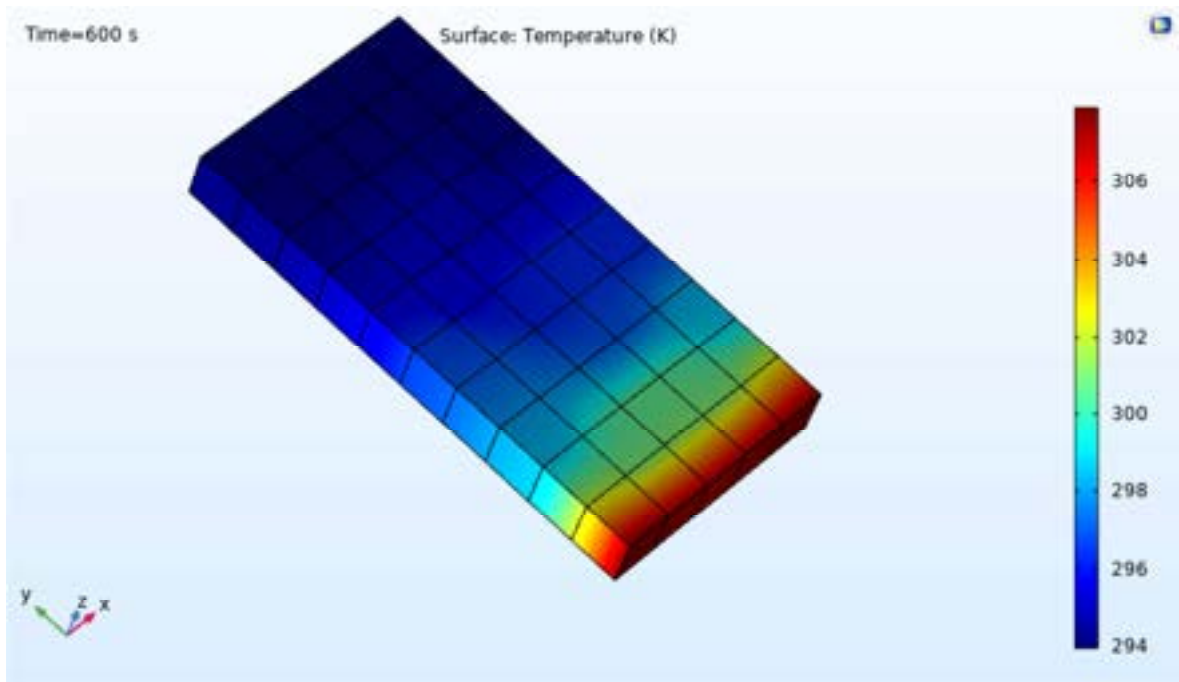


Рисунок 2.19 – Результаты расчета,  $\tau = 600$  с

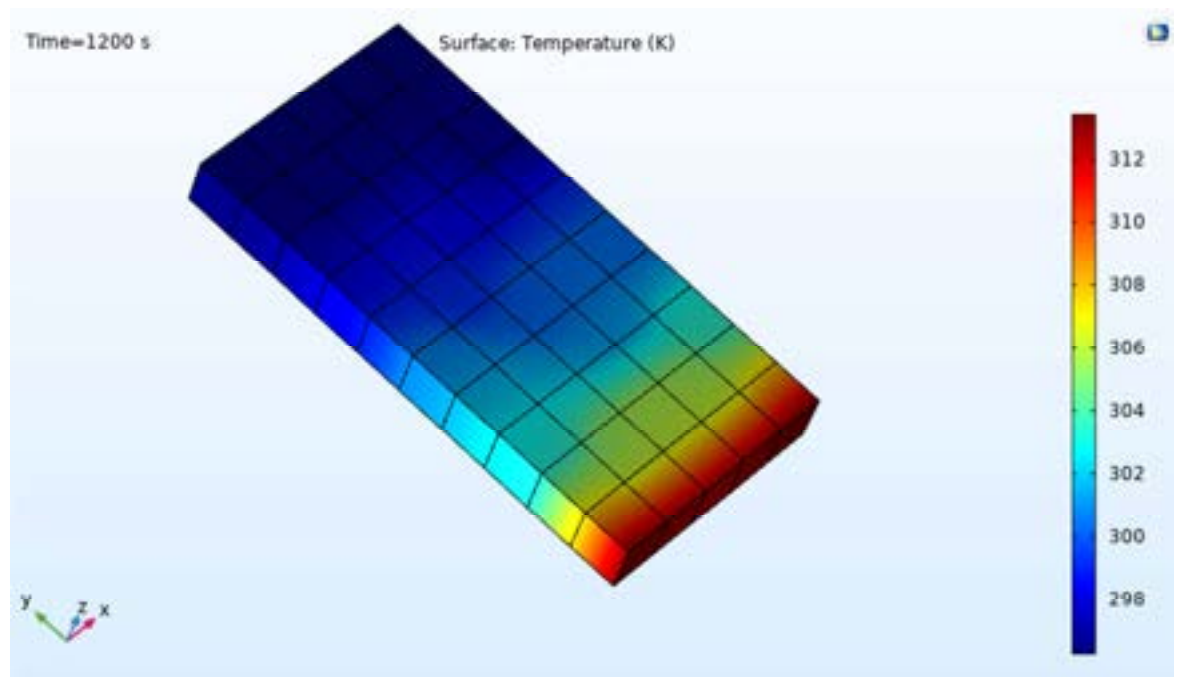


Рисунок 2.20 – Результаты расчета,  $\tau = 1200$  с

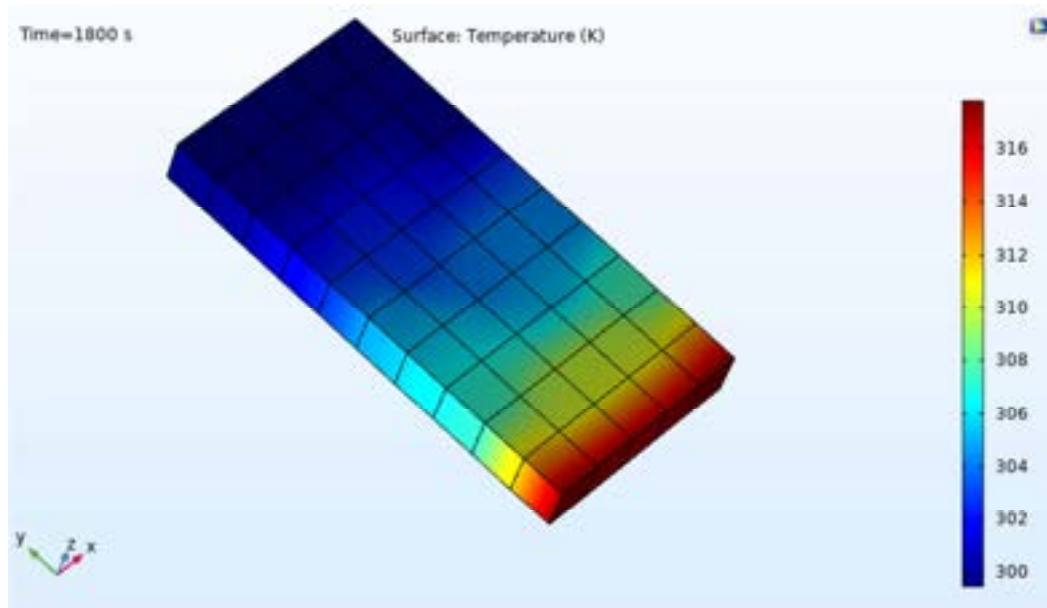


Рисунок 2.21 – Результаты расчета,  $\tau = 1800$  с

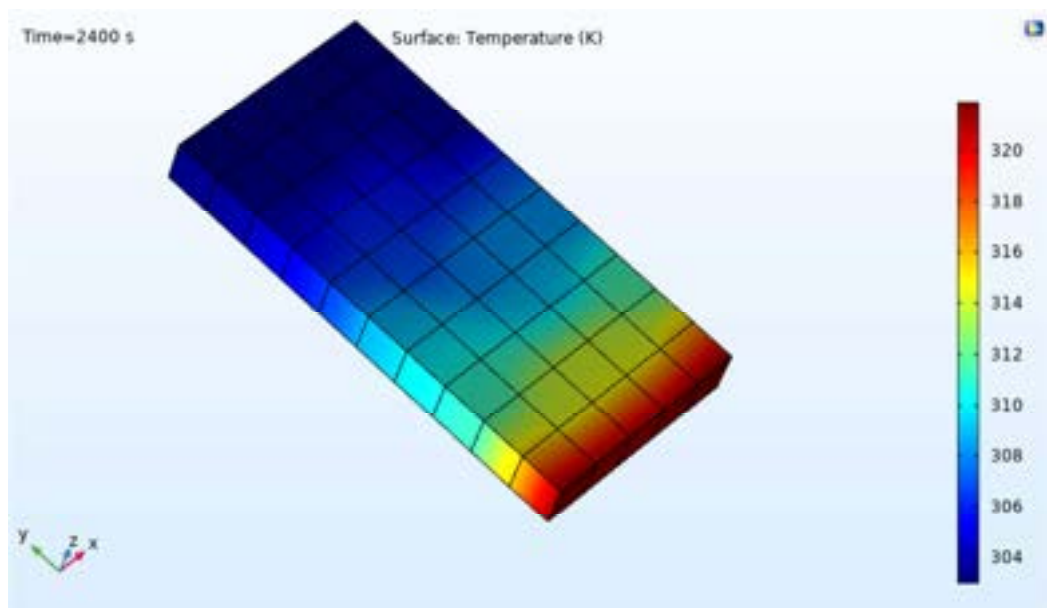


Рисунок 2.22 – Результаты расчета,  $\tau = 2400$  с

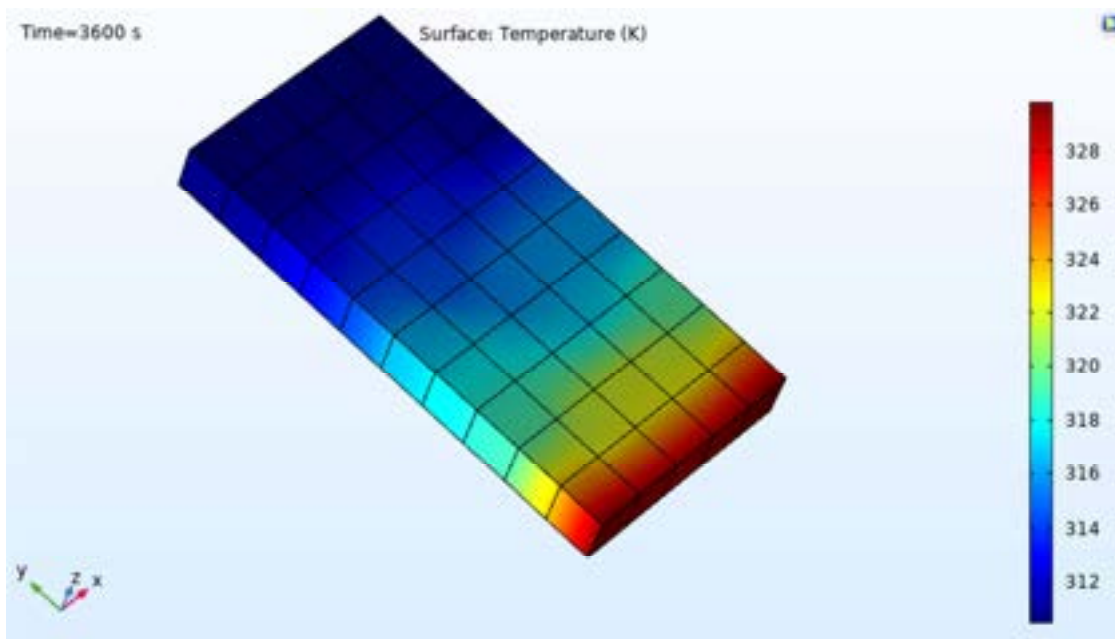


Рисунок 2.23 – Результаты расчета,  $\tau = 3600$  с

Анализ результатов показал, что компоненты, состоящие из воды и связующего, интенсивнее проводят тепло, чем из воздуха и наполнителя, что подтверждает общие положения теплопроводности.

С учётом того, что ограждающая конструкция имеет толщину много меньшую, чем длина и высота, можно рассматривать процесс передачи тепла по упрощённой схеме. Разностный аналог составленный по явной схеме, имеет вид

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta \tau} = a \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta X)^2}, \quad (2.11)$$

где  $T_i^k$  – значение температуры в момент времени  $\tau$ ;  $T_i^{k+1}$  – значение температуры в момент времени  $\tau + \Delta \tau$ .

При решении этого уравнения температуры определяются лишь в отдельных точках  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , лежащих на оси  $X$  (по толщине плоской стенки). При этом предполагаем, что в каждый момент времени  $\tau$  распределение температур в промежутке между соседними точками является линейным.

Выражение (2.11) следует рассматривать как систему линейных алгебраических уравнений, число которых  $n$  равно числу неизвестных температур.

Вначале была поставлена задача определения коэффициента температуропроводности, характеризующего скорость изменения температуры в материале и зависящего от теплофизических свойств исходных компонентов.

Из уравнения (2.11) коэффициент температуропроводности определяется как

$$a = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta\tau} \cdot \frac{(\Delta X)^2}{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}, \quad (2.12)$$

где  $T_{i+1}^k$  – температура в точке посередине образца с «горячего» края в момент  $\tau = 600$  с, К;

$T_{i-1}^k$  – температура в точке посередине образца с «холодного» края в момент  $\tau = 600$  с, К.

$T_i^{k+1}$  – температура в точке посередине образца с в момент  $\tau = 3600$  с, К

Для композита из растительных отходов значение коэффициента температуропроводности с учетом результатов эксперимента (рисунки 2.17–2.22) составит:

$$a = \frac{314 - 296}{3000} \cdot \frac{0,005^2}{306 - 2 \cdot 296 + 294} = 1,56 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Для ДВП мокрого способа прессования с плотностью  $\rho = 300$  кг/м<sup>3</sup> коэффициент температуропроводности  $a = 1,01 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Таким образом, для композита на основе растительных отходов значение коэффициента температуропроводности почти в 6,5 раз ниже, чем для материалов аналогов. Аналогичные результаты получены с помощью программы COMSOL Multiphysics в ходе экспериментов с моделями композита, различающимися составом и расположением отдельных компонентов. Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности (см. глава 5) подтверждают достоверность результатов, определенных с использованием метода конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics.

Изоляционные плиты используют для тепло- и звукоизоляции стен, потолков, полов, перегородок и междуэтажных перекрытий, утепления кровель

(особенно в деревянном домостроении), акустической отделки специальных помещений (радиостудий, машинописных бюро, концертных залов и т.п.). Стандартные изоляционные плиты применяют для дополнительного утепления стен, потолков и полов, а также для увеличения прочности стенных каркасов (рисунок 2.24).

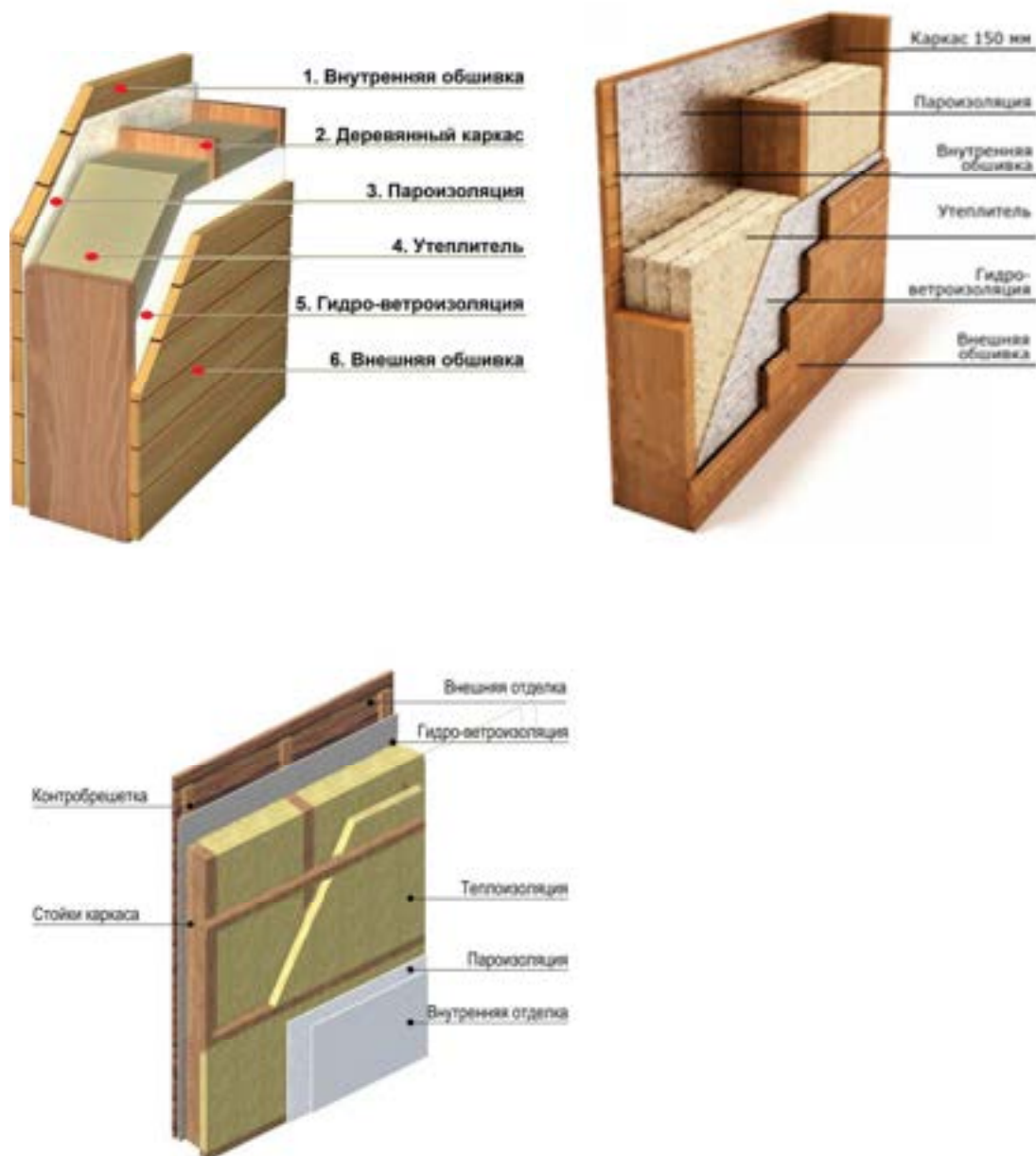


Рисунок 2.24 – Схемы утепления

Они могут быть применены для внутреннего покрытия и потолков перед окончательной отделкой. Ветрозащитные изоляционные плиты применяются для уплотнения и упрочнения внешних стен, потолков и крыш зда-

ний. Их также применяют в качестве выравнивающих слоев под твердые покрытия полов и звукоизоляционных прокладок.

Таким образом, с помощью программного модуля тепловых расчетов COMSOL во-первых, решена задача теплопроводности для неоднородного анизотропного тела; во-вторых, получено графическое представление характера температурного поля при нестационарной теплопроводности; в-третьих, теоретически подтверждено влияние различных компонентов на теплопроводность композита.

## **2.7. Выводы и рекомендации**

1. Гипотеза о структурообразовании волокнистого композита за счет создания ковалентных связей между гидроксилами целлюлозы и метилольными группами связующего и водородных связей между гидроксилами целлюлозных микрофибрилл подтверждена результатами ИК-спектроскопии.

2. Разработана схема взаимодействия макромолекулы целлюлозы наполнителя композита с отверждающимся карбамидоформальдегидным связующим.

3. На основе теории общей проводимости обосновано применение аналитической модели для определения коэффициента теплопроводности расчетным путем, что позволяет прогнозировать тепловые свойства плитных материалов.

4. Разработана структурная модель композиционного материала, позволяющая определить расчетные значения коэффициентов теплопроводности композитов с разным составом наполнителей.

5. Предложенный способ анализа температуропроводности композита на основе метода конечных элементов с использованием программного комплекса COMSOL пригоден для прогнозирования параметров теплопроводности других аналогичных по структуре материалов. Сходимость параметра



температуропроводности, полученного с помощью предложенного способа совпадают со справочным значением материала аналога.

## **Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

### **3.1. Фракционный состав и физико-механические показатели растительных отходов**

При использовании растительных отходов для производства плитных материалов строительного назначения необходимо учитывать основные параметры сырья – форму, геометрические размеры, фракционный состав [26,152]. Различия в параметрах сырья существенно сказываются на значении физико-механических показателей производимого из него материала.

Фракционный состав растительных отходов – это количественное соотношение дискретных частиц определенных размеров к общей массе растительных отходов. Фракционный состав растительных отходов определяют с помощью механического лабораторного ситового анализатора в соответствии с существующими методиками и ГОСТ 15815–83 «Щепа технологическая». Для анализа использовались отходы прядения льна и хлопка и мягкие отходы древесины после строгальных станков. Результаты определения фракционного состава наполнителя представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты статистической обработки фракционного состава наполнителя

Фракция	Отходы хлопка		Отходы льна		Отходы древесины			
					лиственных		хвойных	
	Среднее арифметическое доли фракции $i_{фр}, \%$	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое доли фракции $i_{фр}, \%$	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое доли фракции $i_{фр}, \%$	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое доли фракции $i_{фр}, \%$	Среднее квадратическое отклонение
-/10	1,14	0,43	6,01	2,02	10,0	2,73	1,34	0,41
10/7	1,82	0,76	0,6	0,24	16,35	2,89	20,16	1,31
7/5	2,94	0,83	0,9	0,21	41,57	3,75	14,0	2,69
5/2	19,64	3,157	7,46	1,03	17,97	3,15	29,72	3,175
2/0,5	36,36	3,35	33,82	3,68	9,87	3,08	28,29	2,983
Поддон	38,10	2,755	51,21	3,62	4,24	2,41	6,49	3,118
$\Sigma$	100		100		100		100	

Из таблицы 3.1 видно, что основную массу отходов прядения льна и хлопка составляет фракция поддон, а у древесных отходов 0,5–7.

Растительные отходы имеют сопоставимый средний фракционный размер, однако с геометрической точки зрения размеры значительно отличаются. Для отходов прядения это средняя длина ввиду малого диаметра волокон, эластичности и склонности к свойлачиванию.

Для стружки-отходов это средняя ширина, так как она более сыпучая, и именно этот параметр не позволяет пройти стружке через отверстие ситового анализатора. К особенностям наполнителей следует отнести и то, что древесная стружка в технологических процессах производства композита будет дополнительно доизмельчаться по ширине, увеличивая долю мелкой фракции и площадь поверхности наполнителя. Отходы прядения льна и хлопка состоят из обрывков волокон и дополнительно доизмельчаться не будут. С точки зрения геометрии наполнителя отходы льна и хлопка имеют меньше поврежденных растительных волокон, что положительно влияет на прочность композита.

### **3.2 Геометрические размеры растительных отходов**

Сложности разработки материала из отходов хлопка и льна обусловлены их размерами. Существуют технологические требования к размерам частиц наполнителя [28]. Длину растительных отходов определяли с помощью оптического микроскопа.

В практике производства плит пылевидная фракция лигноцеллюлозных материалов – частицы среднего фракционного размера около 0,1 мм, используется только в качестве добавки в наружные слои материала для заполнения промежутков между частицами основной фракции и формирования мелкоструктурной поверхности наружных слоев [28, 116, 102, 111]. В производстве материалов-аналогов существуют следующие требования: для древесно-стружечных плит допускается не более 10 % частиц мелкой фрак-

ции [116]; для древесноволокнистых плит пыль в волокнистой массе не допускается [28]. Если лигноцеллюлозные волокна сильно изрублены и укорочены, «возможно образование «мертвого размола» – сыпучей массы, в которой волокна не переплетаются, не свойлачиваются» [28].

Исследование геометрических параметров отходов производства хлопкового и льняного волокна показало, что средние размеры частиц находятся в следующих интервалах (таблица 3.2). Кроме пылевидных отходов для льна есть единичные, попадающиеся в случайном порядке включения обрывков волокон средней длины 112 мм. Результаты определения геометрических размеров наполнителя представлены в таблице 3.3.

Частицы льна имеют большую толщину и меньший коэффициент анизотропии, чем частицы хлопка, они являются более сыпучими, что затрудняет процесс свойлачивания их в композите. Однако поверхность частиц хлопка имеет жиро-восковые вещества, ухудшающие адгезионное взаимодействие частиц со связующим. Благодаря наличию в отходах льна длинных волокон процесс свойлачивания частиц в композите также облегчается.

Частицы пылевидной фракции имеют значительную удельную поверхность – более  $3 \text{ м}^2/\text{г}$  [116]. В плитном производстве приняты нормы расхода связующего:  $1...7 \text{ г}/\text{м}^2$  поверхности частиц (по условной абсолютно сухой смоле), или  $15...80 \text{ кг}/\text{м}^3$  плит [28, 116]. Это приводит к точечному нанесению связующего на лигноцеллюлозные частицы. Использование волокон пылевой фракции хлопка, имеющих полости внутри (рисунки 3.1, 3.2), сопровождается повышенной впитываемостью связующего в частицы наполнителя.

Таблица 3.2 – Средние геометрические размеры частиц отходов волокна льна и хлопка

Геометрические размеры частиц	Доля частиц, % интервала размеров									
	0,1... 1,0	1,0... 2,0	2,0... 3,0	3,0... 4,0	4,0... 5,0	5,0... 6,0	6,0... 7,0	7,0... 8,0	8,0... 9,0	9,0... 10,0
Хлопок										
Длина l, мм	6	10	15	16	14	12	8	6	7	6
Толщина h, 10 <sup>-3</sup> мм	-	-	-	2	5	7	11	13	27	35
Средняя длина, мм $l_{cp} = 4,206$										
Средняя толщина, мм $h_{cp} = 0,00749$										
Коэффициент анизотропии l/h = 561,548										
Лен										
Длина, мм	5	7	12	15	17	16	9	7	8	4
Толщина, 10 <sup>-2</sup> мм	8	11	81	-	-	-	-	-	-	-
Средняя длина, мм $l_{cp} = 4,275$										
Средняя толщина, мм $h_{cp} = 0,01738$										
Коэффициент анизотропии l/h = 245,972 (без учета волокон средней длины 112 мм).										

Таблица 3.3 – Результаты статистической обработки геометрических размеров отходов древесины (лиственных)

Фракция	Длина, мм		Ширина, мм		Толщина, мм	
	Среднее арифметическое размера, мм	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое размера, мм	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое размера, мм	Среднее квадратическое отклонение
–/10	30,82	3,956	6,53	1,416	1,31	0,701
10/7	25,68	2,961	4,08	1,391	1,63	0,688
7/5	23,53	3,759	3,20	1,278	1,21	0,497
5/2	10,11	2,714	1,87	1,076	0,76	0,417
2/0,5	7,69	1,758	1,32	1,033	0,66	0,304
Поддон	0,85	0,276	0,11	0,082	0,08	0,036

Таблица 3.4 – Результаты статистической обработки геометрических размеров отходов древесины (хвойных)

Фракция	Длина, мм		Ширина, мм		Толщина, мм	
	Среднее арифметическое размера, мм	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое размера, мм	Среднее квадратическое отклонение	Среднее арифметическое размера, мм	Среднее квадратическое отклонение
–/10	6,64	1,396	8,01	0,578	–	
10/7	4,93	1,469	6,16	1,036	–	
7/5	3,16	1,503	5,45	1,196	–	
5/2	2,13	1,490	2,91	1,027	0,5	0,313
2/0,5	1,05	0,740	1,42	0,962	0,3	0,226
Поддон	0,31	0,255	0,62	0,331	0,06	0,056



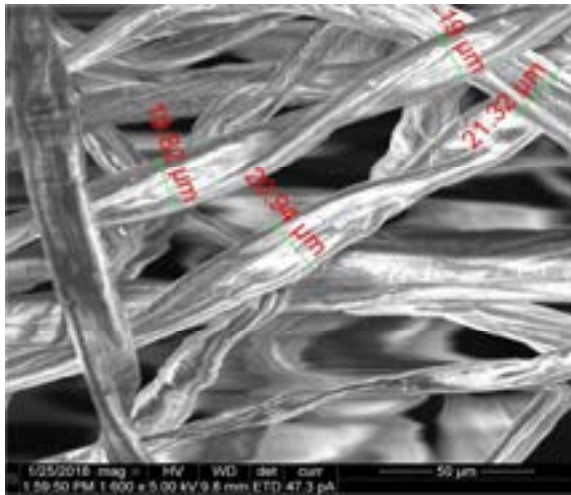
Впитывание связующего внутрь волокон наполнителя уменьшает количество связующего на поверхности волокна. Совместно с затруднением эффекта свойлачивания это приводит к ухудшению физико-механических показателей плитного материала.

Отходы прядения льна и хлопка имеют среднюю длину:

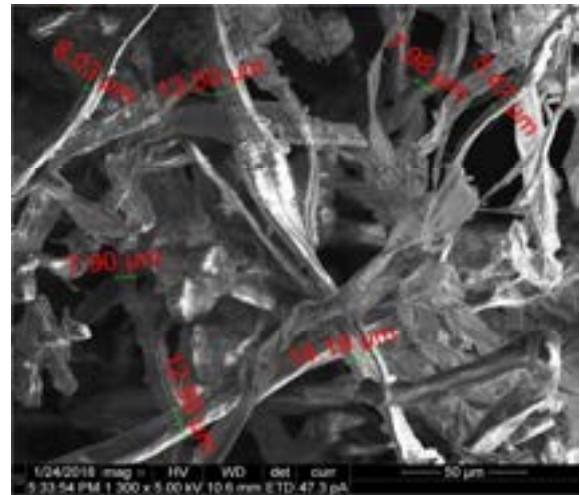
- для хлопка 4,76 мм;
- для льна 4,12 мм.

Средняя длина отходов прядения льна и хлопка больше, чем длина древесного волокна, используемого в производстве древесноволокнистых плит (2 мм для хвойных волокон, около 1,2 мм для лиственных волокон). Это позволило сделать вывод о возможности использования отходов прядения льна и хлопка в качестве наполнителя мягких плит, производимых по технологии теплоизоляционных древесноволокнистых плит. При сопоставимой средней длине отходы прядения льна содержат около 34 % длинных волокнообразных частиц (фракция -/10), способных участвовать в создании структуры композита путем свойлачивания.

Фотографии отходов прядения волокон и мягких отходов древесины и композитов на их основе, выполненные авторами с использованием микроскопа Quanta 3D FEG FEI Company, представлены на рисунках 3.1–3.3. 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.

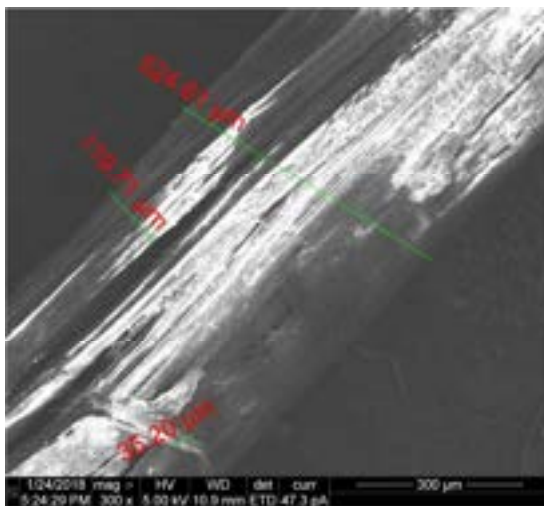


а

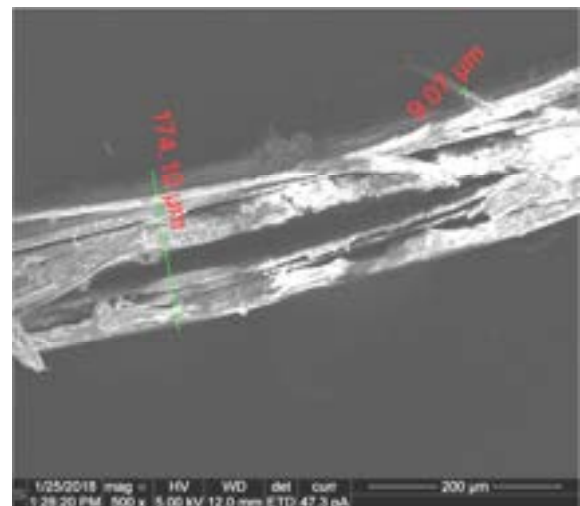


б

Рисунок 3.1 – Изменение структуры и размеров растительного наполнителя при переработке: а – волокна хлопка; б – отходы переработки хлопка

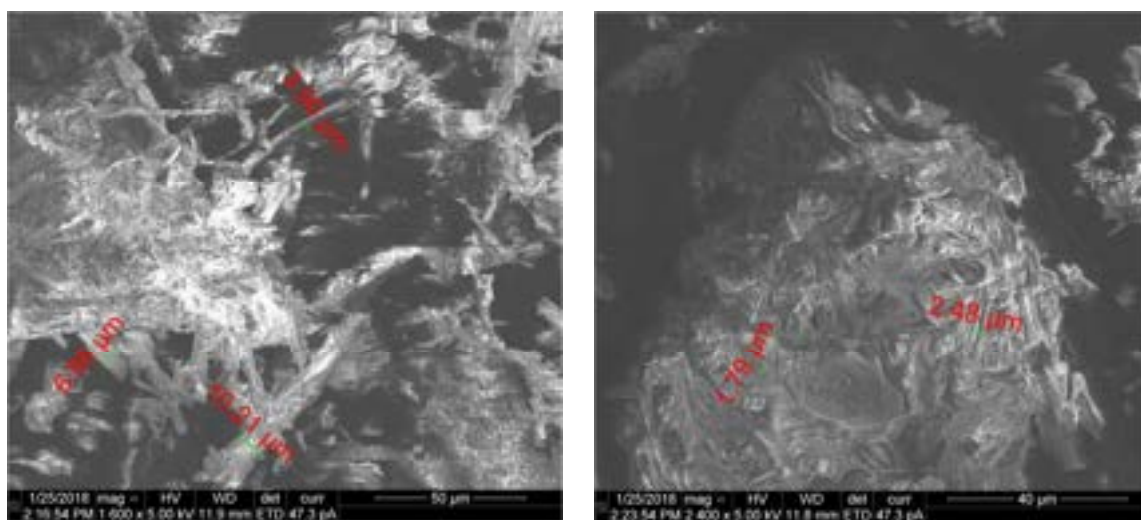


а



б

Рисунок 3.2 – Изменение структуры и размеров растительного наполнителя при переработке: а – волокна льна; б – отходы переработки льна



а

б

Рисунок 3.3 – Структура и размеры растительного наполнителя: а – стружка сосны; б – кора сосны

### 3.3 Определение элементного состава растительного сырья

Все растительные материалы, в том числе и древесина (абсолютно сухая) в основном состоят из трех химических элементов: углерода (49,5 %), кислорода (44,2 %) и водорода (6,3 %).

При определении элементного состава растительного сырья устанавливают, из каких элементов состоит анализируемое вещество (качественный элементный состав) и в каком соотношении они входят в его состав (количественный элементный анализ).

Количественный элементный анализ неорганических веществ образцов растительного сырья снимали на спектрометре рентгеновском сканирующем кристалл-дифракционным портативным вакуумным СПЕКТРОСКАН МАКС – GV (вакуумного). Работа спектрометра осуществляется с помощью последовательного выделения линий характеристического рентгеновского флуоресцентного излучения исследуемого образца, облучаемого остро фокусной маломощной рентгеновской трубкой, определения интенсивности этих линий и дальнейшего пересчета интенсивности в концентрацию элементов им соответствующих. По интенсивностям аналитических линий путем

пересчета определено содержание химических элементов в образцах. Диапазон определяемых содержаний от 0,0001 % до 100 % без концентрирования зависит от типа пробы, анализируемого элемента и матрицы, и от  $10^{-6}$  –  $10^{-7}$  % до долей процента – с концентрированием. Результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Содержание химических элементов в отходах хлопкового и льняного волокон

Химический элемент	Содержание, $10^{-6}$ %	
	Хлопок	Лен
Цирконий (Zr)	4,0	602,93
Стронций	4,0	256,26
Рубидий	0,4	37,86
Свинец	0,7	90,49
Цинк	2,0	794,46
Медь	1,0	485,99
Железо	9,0	10039,27
Марганец	0,4	1894,74
Титан	0,2	4419,42
Ниобий	2216,36	2789,06
Висмут	68,99	71,91
Ванадий	2095,98	2306,92
Кальций	21151,16	30551,71
Калий	56232,38	41129,36
Алюминий	3900,27	8606,35
Фосфор	6822,07	25460,24
Кремний	124162,18	194571,80
Хлор	11450,23	3153,48
Сера	33075,60	28945,45
Итого, %	$0,26119 \cdot 10^{-6}$	$0,35621 \cdot 10^{-6}$

Результаты определения содержания химических элементов в отходах хлопкового и льняного волокон растительных наполнителей выявили, что наибольшее значение соответствует химическому элементу – кремний (для отходов хлопкового волокна  $124162,18 \cdot 10^{-6}$  %, льняного –  $194571,80 \cdot 10^{-6}$  %). Это объясняется загрязнением материала в процессе сбора и транспортировки отходов прядения.

### 3.4 Исследования химического состава растительных материалов

Для анализа растительных материалов используют классические и специальные методы химии.

Определение химического состава растительного сырья связано с большими трудностями из-за сложного строения клеточных стенок и существования прочных связей.

Основными компонентами растительных материалов являются: целлюлоза, лигнин и гемицеллюлоза.

Отходы прядильных производств имеют пылевидную структуру вследствие многократных механических воздействий на разных стадиях технологического процесса. Экспериментальные исследования А.Л. Бычкова и О.И. Ломовского (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН) свидетельствуют, что длительные механические воздействия приводят к существенному (с 64 до 31 %) снижению степени кристалличности целлюлозы однолетников, в частности – соломы кукурузы [38]. Поскольку механические воздействия существенно меняют структуру растительного материала [1, 245], необходимо исследовать показатели исходного сырья и отходов льно- и хлопкопрядильного производств.

Для использования растительных отходов в гидролизных производствах сырье должно давать высокий выход сахаров при кислотном гидролизе, в производстве этанола и углекислоты – необходим высокий выход из них таких сбраживаемых моносахаридов, как гексозы, а для получения фурфурола необходимо значительное содержание пентозанов. Необходимо оценить количество водорастворимых веществ и пентозанов в отходах хлопко- и льнопрядильных производств.

Перспективным направлением переработки растительных отходов является использование их в качестве наполнителя композиционных материалов [148].

В настоящее время информация о химическом составе отходов хлопково- и льнопрядильных производств отсутствует.

Образцы растительных материалов отбирались на льно- и хлопкопрядильном предприятиях в случайном порядке в течение четырех месяцев. Для определения химического состава хлопковые и льняные волокна были предварительно измельчены ножницами и подготовлены средние пробы. В каждой точке экспериментальной области результаты определялись по данным четырех параллельных измерений.

### 3.4.1 Определение содержания целлюлозы

Для определения содержания целлюлозы азотно-спиртовым методом (Кюршнера и Хоффера) [2] готовили азотно-спиртовую смесь, состоящую из концентрированной азотной кислоты и 95%-ного этанола, взятых в соотношении 1:4 (объем.) К навеске массой 1 г воздушно-сухой древесины, измельченной до частиц размером менее 2 мм, добавляли 25 мл азотно-спиртовой смеси. Затем кипятили в колбе с обратным холодильником на водяной бане в течение 1 ч от начала кипения. После окончания кипячения снимали колбу с водяной бани, опилкам дали осесть. Целлюлозу отфильтровывали на бумажном фильтре и промывали 10 мл свежей азотно-спиртовой смеси. Далее промывали от кислоты горячей дистиллированной водой до нейтральной реакции. Фильтр с целлюлозой сушили в сушильном шкафу при температуре  $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$  до постоянной массы. Взвешивали с точностью до 0.001 г.

Массовая доля целлюлозы рассчитывали по формуле:

$$C = (m_1 - m) \cdot 100 / g, \quad (3.1)$$

где  $m_1$  – масса фильтра с целлюлозой, г;

$m$  – масса пустого фильтра, г;

$g$  – масса абсолютно сухой навески древесины, г.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.6.

### **3.4.2 Определение степени полимеризации целлюлозы**

Степень полимеризации целлюлозы определяли косвенным вискозиметрическим методом. Для определения показателя использовали измерение характеристической вязкости раствора целлюлозы, выделенной из образцов растительных материалов в медно-аммиачном реактиве на капиллярном вискозиметре ВПЖ-2 согласно методике [2], соответствующей нормативной (ГОСТ 14363.2-83). Растворение образцов целлюлозы контролировали визуально в проходящем свете. По отношению времени истечения раствора целлюлозы и растворителя определяли удельную вязкость, затем рассчитывали характеристическую вязкость, и по отношению к вязкостно-молекулярной константе определяли среднюю степень полимеризации.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.6.

### **3.4.3. Определение содержания лигнина**

Содержание лигнина в образцах материалов определяли стандартным серноокислым методом (в модификации с фосфорной кислотой) [2], (ГОСТ 11960–79). Навеску сырья обрабатывали смесью серной и ортофосфорной кислоты, выдерживали в термостате при перемешивании, затем добавляли дистиллированную воду, нагревали до кипения и кипятили. После этого оставляли для охлаждения и отстаивания, затем фильтровали раствор с осадком лигнина, промывали раствором хлористого натрия до полного удаления следов кислоты, фильтры с лигнином высушивали до постоянной массы.

Для определения лигнина использовали гидролитический весовой метод, основанный на обработке волокнистого материала концентрированной сер-

ной кислотой (72%). Содержание лигнина в материале рассчитывают по весу остатка, нерастворимого в серной кислоте. Относительная ошибка параллельных определений не превышает 5%.

Берут навеску растительного материала массой около 1 г, взвешивают с погрешностью не более 0,0002 г, помещают в химический стакан емкостью 500 мл и смачивают 15 мл кислотной смеси, состоящей из 6 частей серной кислоты концентрацией 75 % и 1 части ортофосфорной кислоты концентрацией 85 %. Стакан с пробой помещают в водный термостат температурой  $35 \pm 0,5$  °С и выдерживают 45 мин при периодическом перемешивании содержимого стакана. По истечении указанного времени в стакан добавляют 400 мл дистиллированной воды, содержимое стакана нагревают до кипения и кипятят 15 мин. Стакан оставляют на 10 мин для охлаждения и отстаивания выделившегося лигнина. Раствор с осадком лигнина фильтруют через два высушенных до постоянной массы бумажных фильтра и промывают раствором 0,5 г/л хлористого натрия до полного удаления следов кислоты, используя в качестве индикатора метиловый оранжевый. Фильтры с остатком лигнина высушивают в сушильном шкафу при температуре  $103 \pm 2$  °С до постоянной массы.

Массовую долю лигнина (X) в процентах к абсолютно сухой (а.с.) пробе вычисляют по формуле

$$X = \frac{\Phi_{\text{л}} - \Phi}{g} \cdot 100, \quad (3.2)$$

где  $\Phi_{\text{л}}$  – масса фильтров с лигнином, г;

$\Phi$  – масса фильтров, высушенных до постоянной массы, г;

g – а. с. навеска материала, г.

За результат испытания принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений, округленное до 0,1 %.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.6.



Таблица 3.6 – 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

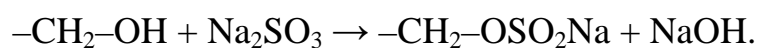
Растительные волокна в основном состоят из целлюлозы и лигнина. Каждое волокно по структуре представляет собой композит, в котором жесткие целлюлозные микрофибриллы входят в лигноуглеводную матрицу, состоящую из лигнина и гемицеллюлоз. Образцы хлопковых и льняных волокон имеют высокое значение содержания целлюлозы, близкое к стандартному значению показателя (ГОСТ 595–79.Целлюлоза хлопковая) [47]. Содержание целлюлозы в отходах уменьшается в сравнении с данным показателем для волокна, что обусловлено, очевидно, технологическими воздействиями в процессе обработки и транспортировки материала. Содержание целлюлозы существенно снижается в процессе технологической обработки хлопкового и льняного сырья, при этом значительно уменьшается и степень полимеризации целлюлозы для отходов. Несмотря на то, что отсутствуют исследования химического состава отходов прядения льна и хлопка, имеется опыт определения показателей других растительных отходов. Интенсивное размалывание растительных частиц может привести к одновременному уменьшению размера частицы, степени полимеризации, и кристалличности целлюлозы и увеличению площади поверхности частиц [241, 38].

Наиболее известные для исследователей причины снижения степени полимеризации целлюлозы – это химические и термические воздействия на

растительный материал. Результаты определения химического состава растительных наполнителей выявили существенное изменение в отходах прядения содержания и степени полимеризации целлюлозы. Предположительно, общее снижение содержания целлюлозы носит, в числе прочих причин, относительный характер из-за загрязнения отходов льна и хлопка пылью, остатками горюче-смазочных жидкостей и другими мелкодисперсными материалами, присутствующими в процессах технологической обработки. А уменьшение степени полимеризации целлюлозы может объясняться механической деструкцией растительных клеток. В сухом виде кристаллические области целлюлозы хлопкового (как и льняного) волокна находится в стеклообразном состоянии, все гидроксильные группы связаны водородными связями (отсутствует пик около  $3650 \text{ см}^{-1}$ ). Деструкция кристаллических областей возможна только при приобретении сегментальной подвижности при пластификации и/или нагревании. Однако в процессах прядения волокон отсутствуют термические и влажностные воздействия, поэтому возникает предположение, что уменьшение степени полимеризации целлюлозы для отходов прядения хлопка и льна обусловлено деструкцией аморфных участков.

Причина данного вида деструкции, редко отмечаемого исследователями растительной целлюлозы, может находиться на стадии подготовки льна или хлопка к прядению. Отбеливание, удаление примесей и пластификация сырья в настоящее время проводится бесхлорными способами, такими, как сульфитная варка.

Основной реакцией в сульфитной варке является сульфитирование лигнина – введение сульфогрупп  $-\text{SO}_3\text{H}$  в боковую цепь фенилпропановых структурных единиц  $\text{C}_6\text{C}_3-$  под действием нуклеофильных реагентов  $\text{SO}_3\text{H}^-$  и  $\text{SO}_3^{2-}$ :



Введение сульфогруппы придает лигнину гидрофильные свойства, но не оказывают деструктивного воздействия на кристаллические области целлюлозы. Однако структура аморфных областей целлюлозы неоднородна. Когда влажность целлюлозы достигает 30 %, ее аморфная часть становится изотропной. Однако нормированная влажность чистольняной пряжи сухого прядения составляет 10 %, поэтому в некристаллической фазе целлюлозы присутствуют структурные неоднородности. Механические воздействия приводят к разрыву водородных связей в разупорядоченной наиболее слабой части аморфной целлюлозы. Снижение суммарной энергии водородных связей и энергии когезии приводит к разрыву гликозидной связи и снижению степени полимеризации целлюлозы.

Количество лигнина в хлопковом и льняном волокне, а также в измельченных стеблях и коробочках хлопка, в костре соотносится с результатами определения химического состава волокон и стеблей травянистых растений [82, 170, 84]. Высокое содержание лигнина в отходах прядения льняных и хлопковых волокон обусловлено значительным содержанием в них измельченных отходов стеблей и коробочек (для хлопка), костры (для льна).

#### **3.4.4 Определение содержания экстрактивных веществ, эстрагируемых водой**

Содержание водорастворимых веществ в образцах определялось по методике [2]. Сырье заливали горячей водой, выдерживали на кипящей водяной бане 3 ч, затем переносили содержимое на стеклянный пористый фильтр, высушивали материал в сушильном шкафу. Количество экстрактивных водорастворимых веществ определяли весовым способом по изменению массы материала.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.7.

### 3.4.5 Определение содержания пентозанов и фурфурола

Выполнялось бромид-броматным методом через определение фурфурола [2], аналогично методике ГОСТ 10820–75. Целлюлоза. Метод определения массовой доли пентозанов. Навеску материала кипятили в разбавленной соляной кислоте, отгоняли дистиллят, смешивали с соляной кислотой и добавляли бромид-бромат. Количество фурфурола определяли титрованием раствором йодистого калия. Полученное значение фурфурола пересчитывали на количество пентозанов.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.7.

### 3.4.6 Определение зольности образцов растительных материалов

Выполняли методом прокаливания [2] в муфельной печи при температуре  $575 \pm 25^\circ\text{C}$  до полного удаления всего углерода. Затем помещали сырье в эксикатор, охлаждали и определяли содержание золы весовым методом. Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.7.

Увеличение содержания лигнина в отходах прядения льна и хлопка в сравнении с показателями исходного растительного сырья обусловлено более высоким количеством минеральных веществ в промышленных отходах, то есть, по сути, является относительным.

Структура аморфных областей целлюлозы изучена не столь хорошо, как кристаллические области. Исследования А.В. Бурова и А.В. Оболенской объясняют изменения структуры целлюлозы при механических воздействиях: «аморфизация при сухом размоле сопровождается механической деструкцией целлюлозы со значительным снижением ее степени полимеризации» [1].

Таблица 3.7 – 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

Увеличение доли минеральных веществ и снижение содержания целлюлозы служит препятствием для использования отходов в производстве технической целлюлозы.

Содержание лигнина в растительных образцах хорошо согласуется с содержанием пентозанов, что характерно для однолетников [20].

Максимальное количество пентозанов (15,5 %) в отходах производства хлопкового и льняного волокна, характерно для костры. Данное количество пентозансодержащего полисахарида сопоставимо с его количеством в древесине осины.

В. Зандерман с коллегами в своих исследованиях композиций «древесина-цемент» работах на примере фибролита установили степень пригодности различных пород для изготовления композиционных материалов [108], результаты их работы представлены в таблице 3.8.

Полученные результаты свидетельствуют о значительных различиях в структуре и химическом составе волокон льна, хлопка и отходов их прядения.

Таблица 3.8 – Пригодность некоторых пород древесины для композиции  
«древесина-цемент»

Порода древесины	Содержание водорастворимых веществ, %	Степень пригодности древесины
Ель	1,12	1
Тополь	1,29...1,45	2
Береза	2,67	3
Сосна	3,16...6,2	4
Дуб	2,55...7,33	5
Ясень	2,24...5,81	6
Лиственница	10,6	7

Увеличение доли минеральных веществ в материалах отходов вызвано засоренностью, а относительное снижение доли целлюлозы и степени ее полимеризации – механическим воздействием на материал на стадиях технологического процесса прядения волокна. Как отмечалось выше, работы А.В. Бурова и А.В. Оболенской [1], а также исследования, выполненные в институте химии твердого тела и механохимии СО РАН [38] свидетельствуют, что длительные механические воздействия приводят к существенному снижению степени кристалличности и степени полимеризации целлюлозы. Более высокое содержание в отходах льна лигнина и целлюлозы (в сравнении с отходами хлопка), более высокая степень полимеризации целлюлозы и меньшее засорение минеральными веществами должны обеспечивать получение мягких композиционных плит с более высокими прочностными показателями.

Для показателей композитов, изготовленных из различных растительных материалов, характерно совместное влияние доли лигнина и минеральных веществ (для отходов). Большой доле лигнина соответствует большее количество гидроксильных групп фенольных единиц лигнина, что способствует образованию сетчатых связей в процессе структурообразования композита. Негативное влияние на показатели плит оказывают минеральные вещества, количество которых обусловлено загрязнением материала в процессе сбора и транспортировки отходов прядения.

### 3.4.7 Влажность образцов материалов

Влажность определялась весовым методом [2], лежащим в основе стандартных методик по ГОСТ 25133–82 (Волокна лубяные. Метод определения влажности), ГОСТ Р 53233–2008 (Волокно хлопковое. Методы определения влажности) [44]. Определяли массу пробы материала исходной влажности и после сушки до абсолютно сухого состояния. Влажность рассчитывали по относительному изменению массы пробы.

Результаты экспериментального определения показателей растительного сырья представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Средние значения влажности образцов, %

Растительное сырье	Влажность
Стружка-отходы (сосна)	19,4±0,6
Стружка-отходы (береза)	18,3±0,5
Кора (сосна)	22,2±0,5
Кора (береза)	21,5±0,5
Хлопковое волокно	3,2±0,5
Льняное волокно	5,1±0,6
Отходы хлопка	5,5±0,7
Отходы льна	7,0±0,5
Коробочки, стебель	4,5±0,6
Костра	7,4±0,6

### 3.4.8 Водопоглощение растительных отходов

Использовалась следующая методика проведения эксперимента: в перфорированный металлический стакан с крышкой (диаметр отверстий 1 мм) помещалось 10 г отходов заданной влажности, стакан помещался в воду (высота воды над поверхностью крышки 20 мм). Через промежуток времени  $\tau = 120$  мин. стакан вынимался, чтобы удалить влагу с поверхности отходов, использовали компрессор со сжатым воздухом. Затем взвешивали отходы и определяли выходную величину – водопоглощение.

Водопоглощение растительных отходов  $B$ , % определялось по формуле

$$B = (m_{\text{вл}} - m_{\text{с}}) / m_{\text{с}} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

где  $m_{\text{вл}}$  – масса влажных отходов, кг;

$m_{\text{с}}$  – масса сухих отходов, кг;

Результаты представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Водопоглощение растительных отходов, %

	Хлопок	Лен	Мягкие отходы древесины	
			лиственные	хвойные
Водопоглощение, %	52	49	220	310

Из результатов таблицы 3.9 следует, что самое высокое поглощение воды наблюдается у отходов древесины хвойных пород. Снаружи хлопкового волокна расположена первичная стенка толщиной около 1 мкм, содержащая примерно 50% целлюлозы. На поверхности первичной стенки сосредоточены жиро-восковые вещества. Этим объясняется плохая смачиваемость хлопкового волокна водой [75]. Внутри волокна находится канал, в который впитывается связующее и вода.

Сорбция воды отходами прядения льна и хлопка значительно отличается от аналогичного показателя для древесных материалов. Это свидетельствует о различиях в надмолекулярной структуре данных целлюлозосодержащих материалов.

Свойства растительных наполнителей зависят не только от геометрических размеров и степени повреждения, но и от химического состава. Механические свойства натуральных волокон зависят от содержания целлюлозы.

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



### 3.5 Выводы и рекомендации

1. Определены показатели 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.

2. В ходе экспериментальных исследований впервые установлено, что по фракционному составу основную массу до 50 % составляют отходы прядения льна и хлопка фракции поддон, для мягких древесных отходов до 41% – лиственных (фракция 7/5), хвойных (фракция 5/2).

3. Средняя длина отходов прядения льна и хлопка больше, чем длина древесного волокна, используемого в производстве древесноволокнистых плит (2 мм для хвойных волокон, около 1,2 мм для лиственных волокон), что обуславливает возможность использования отходов прядения льна и хлопка в качестве наполнителя мягких плит, производимых по технологии теплоизоляционных древесноволокнистых плит. При сопоставимой средней длине отходы прядения льна содержат около 34 % длинных волокнообразных частиц (фракция -/10), способных участвовать в создании структуры композита путем свойлачивания.

4. Результаты определения содержания химических элементов в отходах хлопкового и льняного волокон растительных наполнителей выявили, что наибольшее значение соответствует химическому элементу – кремний (для отходов хлопкового волокна  $124162,18 \cdot 10^{-6} \%$ , льняного –  $194571,80 \cdot 10^{-6} \%$ ). Это объясняется загрязнением материала в процессе сбора и транспортировки отходов прядения.

5. В ходе экспериментальных исследований впервые получены значения химического состава отходов прядения льна и хлопка. Установлено, что содержание целлюлозы в отходах уменьшается в сравнении с данным пока-

зателем для волокна, что обусловлено технологическими воздействиями в процессе обработки и транспортировки материала. Содержание целлюлозы существенно снижается в процессе технологической обработки хлопкового и льняного сырья, при этом значительно уменьшается и степень полимеризации целлюлозы для отходов льна и хлопка.

6. Установлено, что количество пентозанов (15,5 %) в отходах производства хлопкового и льняного волокон для композиции растительный наполнитель–минеральное вяжущее имеет низкую степень пригодности, что в свою очередь не исключает возможность получения композитов на основе неорганических и органических связующих.

## **Глава 4. ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований по разработке состава плитных композиционных материалов с заданными эксплуатационными свойствами и изучена целесообразность их использования.

### **4.1. Обоснование состава композиционного плитного материала**

Механические свойства композиционных материалов определяются соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Долговечность материала зависит от правильного выбора и соотношения исходных компонентов.

Чтобы получить материалы с заданными физико-механическими показателями необходимо подобрать состав с учетом свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, а также ориентации наполнителя.

Для выбора используемого наполнителя, а также количества связующего проведены исследования и проанализированы данные, полученные путем экспериментальных испытаний, определяющих зависимость физико-механических свойств плитных материалов от количественного содержания в нем отходов прядильных производств и мягких отходов древесины.

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  $275 \text{ кг/м}^3$ , расход связующих варьировался от 0 % до 30 % от массы наполнителя. Образцы материала сушились при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  до влажности  $8 \pm 1 \text{ } \%$ .

Состав компонентов, используемых для создания композиционных материалов, представлен в таблице 4.1.

## **4.2. Методики определения физико-механических показателей композиционных материалов**

Были исследованы физико-механические показатели полученных композиционных материалов: плотность, прочность при статическом изгибе, разбухание по толщине за 24 ч пребывания в воде.

### **4.2.1. Определение прочности плит при статическом изгибе**

Предел прочности при статическом изгибе определялся согласно ГОСТ 10633-2018 Плиты древесно-стружечные и древесно-волокнистые. Общие правила подготовки и проведения физико-механических испытаний [41]. Испытания образцов размером  $250 \times 50 \times h$  мм проводились на машине 2166P-5. Ширину образцов измеряют штангенциркулем по его поперечной оси, толщину измеряют в трех точках, расположенных на его поперечной оси, из которых одна в центре оси, а две другие – на расстоянии 15 мм от кромок образца, за результат измерения толщины принимается среднее арифметическое двух замеров. Образцы укладывают на опоры испытательной машины так, чтобы продольная ось образца была перпендикулярна опорам, а поперечная ось – параллельна оси ножа приспособления.

Таблица 4.1 – Состав наполнителя композиционного материала

№ композиита	Отходы производства растительных волокон		Мягкие отходы древесины	
	Вид	Содержание компонентов, мас. %	Вид	Содержание компонентов, мас. %
1	хлопок	55–98	–	–
2	хлопок	44–78,4	стружка лиственных пород (береза)	11–19,6
3	хлопок	27,5–49	стружка лиственных пород (береза)	27,5–49
4	хлопок	44–78,4	стружка хвойных пород (сосна)	11–19,6
5	хлопок	27,5–49	стружка хвойных пород (сосна)	27,5–49
6	хлопок	44–78,4	кора лиственных пород (береза)	11–19,6
7	хлопок	27,5–49	кора лиственных пород (береза)	27,5–49
8	хлопок	44–78,4	кора хвойных пород (сосна)	11–19,6
9	хлопок	27,5–49	кора хвойных пород (сосна)	27,5–49
10	лен	55–98	–	–
11	лен	44–78,4	стружка лиственных пород (береза)	11–19,6
12	лен	27,5–49	стружка лиственных пород (береза)	27,5–49
13	лен	44–78,4	стружка хвойных пород (сосна)	11–19,6
14	лен	27,5–49	стружка хвойных пород (сосна)	27,5–49
15	лен	44–78,4	кора лиственных пород (береза)	11–19,6
16	лен	27,5–49	кора лиственных пород (береза)	27,5–49
17	лен	44–78,4	кора хвойных пород (сосна)	11–19,6
18	лен	27,5–49	кора хвойных пород (сосна)	27,5–49

Нагружение образца производят непрерывно с постоянной скоростью в течение  $(90 \pm 30)$  с до разрушения. Допускается нагружать образец со скоростью перемещения ножа 10 мм/мин.

Предел прочности образцов при статическом изгибе определялся по формуле

$$\sigma_{и} = 3 P l / 2 b h^2, \quad (4.1)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;

$l$  – расстояние между опорами приспособления, мм;

$b$  – ширина образца, мм;

$h$  – толщина образца, мм.

Средние значения предела прочности при статическом изгибе представлены в прил.

#### 4.2.2. Определение физических показателей плит

Определение влажности, плотности, разбухания по толщине за 24 ч и водопоглощения плит регламентирует ГОСТ 10633–2018 Плиты древесностружечные и древесноволокнистые. Общие правила подготовки и проведения физико-механических испытаний. От плотности плиты зависят ее физико-механические свойства. Плиты теплоизоляционного назначения должны иметь плотность не более  $400 \text{ кг/м}^3$  (для мягких древесноволокнистых плит в соответствии с ГОСТ 4598–2018 [46]). Число дублированных опытов  $n=10$ .

Толщину образцов измеряют микрометром в четырех точках. За толщину образца принимают среднее арифметическое результатов четырех замеров.

Длину и ширину образца измеряют в двух местах параллельно кромкам образца. За длину и ширину образца принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных замеров сторон образца.

Образцы взвешивают.

Плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> вычисляют по формуле

$$\rho = m/lbh . \quad (4.2)$$

Используются три образца, на которых определялась плотность композитов. Затем образцы погружают в сосуд с питьевой водой. Образцы должны находиться на  $(20 \pm 2)$  мм ниже уровня поверхности воды. Температура воды должна быть  $(20 \pm 1)$  °С.

Образцы взвешивают и измеряют в тех же точках вторично через 2 ч (считая с момента погружения их в воду). Перед взвешиванием и измерением образцы осушают фильтровальной бумагой. Образцы измеряют не позднее, чем через 10 мин после извлечения их из воды.

Разбухание по толщине  $P_h$ , % определяется с точностью до 0,1 % по формуле

$$P_h = (h_1 - h) \cdot 100/h , \quad (4.3)$$

где  $h$  – толщина образца до увлажнения, мм;

$h_1$  – толщина образца после увлажнения, мм.

Водопоглощение  $W_{вд}$ , % определяется с точностью до 1 % по формуле

$$W_{вд} = (m_1 - m) \cdot 100/m , \quad (4.4)$$

где  $m$  – вес образца до увлажнения, г;

$m_1$  – вес образца после увлажнения, г.

### 4.3. Результаты определения физико-механических показателей

На рисунках 4.1–4.4 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°C.

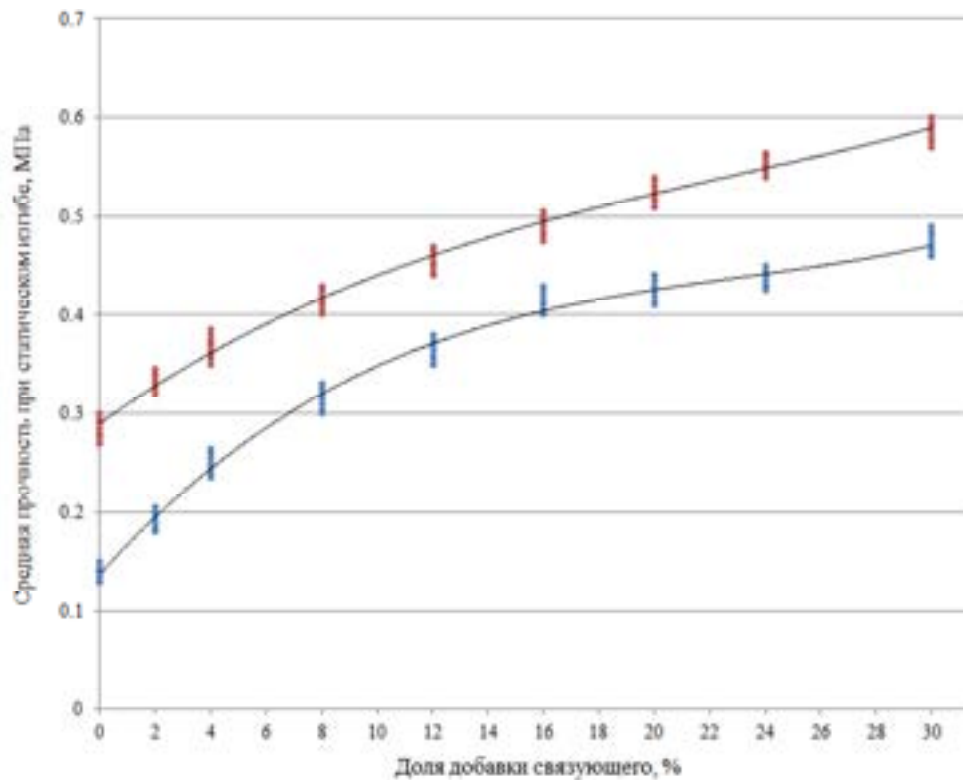


Рисунок 4.1 – Зависимость предела прочности от массовых долей добавки фенолформальдегидного связующего, где ■ – для плит из хлопка, ■ – для плит из льна

При использовании других связующих характер зависимостей физико-механических показателей композиционных материалов от доли добавки связующих не меняется.

При любом виде связующего (синтетического или неорганического) более прочными являются композиционные материалы из отходов переработки льна.



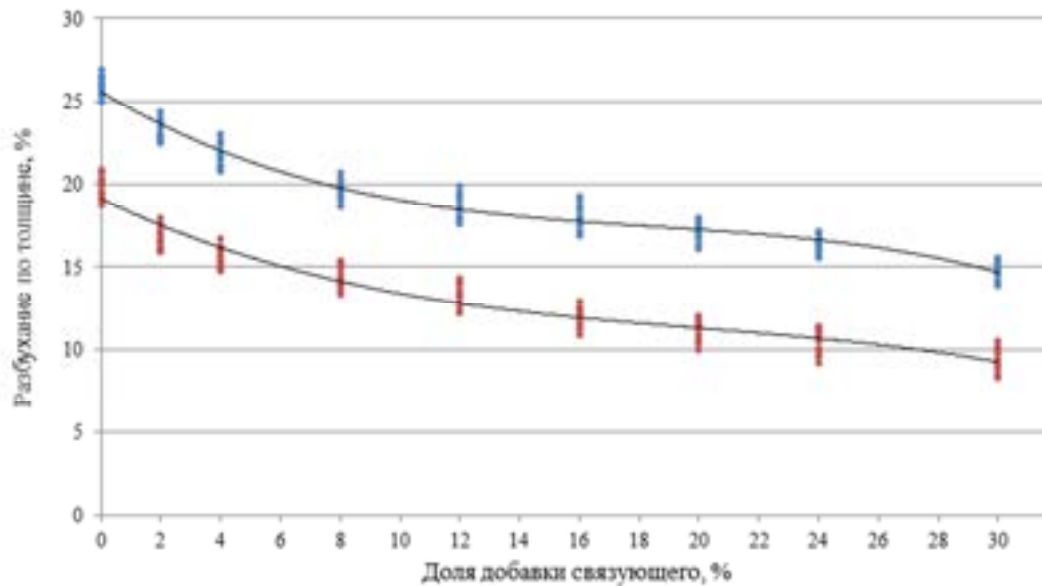


Рисунок 4.2 – Зависимость разбухания по толщине от массовых долей добавки фенолформальдегидного связующего, где  $\blacksquare$  – для плит из хлопка,  $\blacksquare$  – для плит из льна

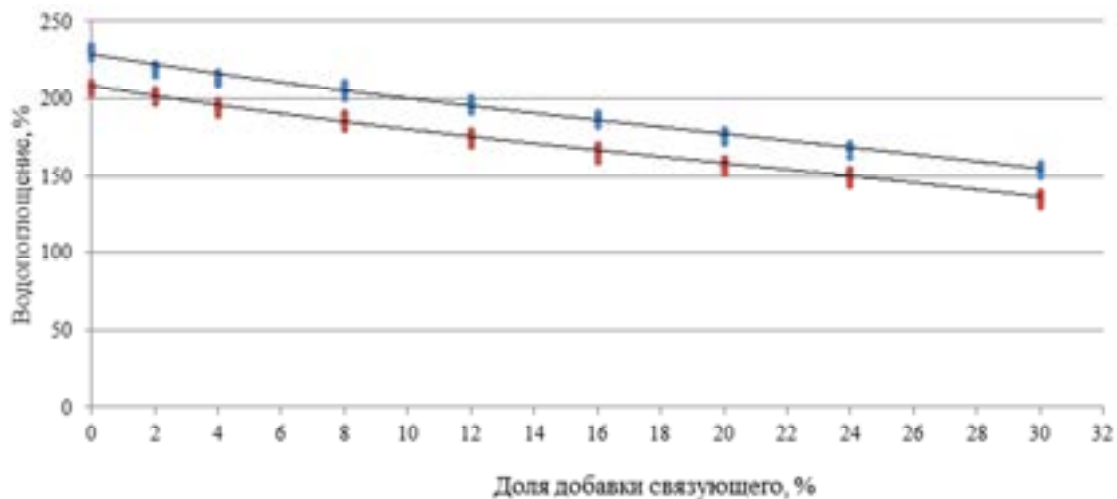


Рисунок 4.3 – Зависимость водопоглощения от массовых долей добавки фенолформальдегидного связующего, где  $\blacksquare$  – для плит из хлопка,  $\blacksquare$  – для плит из льна

Использование неорганического связующего – жидкого стекла и алюмохромфосфатного связующего в 1,3...1,4 раза снижает разбухание материала по толщине за 24 ч пребывания в воде.

Плиты из отходов переработки льна при доле добавки 30% по массе неорганического связующего (жидкого стекла, АХФ) соответствуют норма-

тивными требованиями, предъявляемым к материалу-аналогу – древесноволокнистым плитам мокрого способа производства.

В таблице 4.2 приведены зависимости прочности, разбухания по толщине, водопоглощения композиционных плитных материалов (Y) от доли добавки связующего (x).

Таблица 4.2 – Зависимости показателей композиционных плитных материалов от доли добавки фенолформальдегидного связующего

Композиционный материал	Зависимости показателей плит Y, % от доли добавки связующего x	Достоверность аппроксимации R <sup>2</sup>
	прочности	
Композиты из хлопка на ФФС	$Y = 0,0696e^{0,0549x}$	0,864
	$Y = -0,0001x^2 + 0,0119x + 0,0479$	0,9771
	$Y = -2 \cdot 10^{-7} x^3 - 0,0001x^2 + 0,0118x + 0,0481$	0,9771
Композиты льна на ФФС	$Y = 0,2035e^{0,0259x}$	0,4991
	$Y = -0,0002x^2 + 0,0119x + 0,1954$	0,6969
	$Y = 4 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,002x^2 + 0,0328x + 0,1602$	0,8131
	Разбухание по толщине	
Композиты из хлопка на ФФС	$Y = 27,367e^{-0,014x}$	0,7703
	$Y = -0,0077x^2 - 0,5352x + 28,108$	0,7791
	$Y = -0,0008x^3 + 0,0454x^2 - 0,9611x + 28,824$	0,8021
Композиты льна на ФФС	$Y = 22,135e^{-0,017x}$	0,7767
	$Y = 0,0084x^2 - 0,543x + 22,944$	0,7928
	$Y = -0,0007 x^3 + 0,038x^2 - 0,8769x + 23,505$	0,8083
	водопоглощение	
Композиты из хлопка на ФФС	$Y = 235,4e^{-0,013x}$	0,9779
	$Y = 0,0306x^2 - 3,4353x + 273,09$	0,9801
	$Y = -0,0005x^3 + 0,0522x^2 - 3,6782x + 237,5$	0,9803
Композиты льна на ФФС	$Y = 216,78e^{-0,014x}$	0,9825
	$Y = 0,026x^2 - 3,2501x + 217,8$	0,9841
	$Y = 0,0002 x^3 + 0,0185x^2 - 3,1657x + 217,65$	0,9842

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. В начале диапазона варьирования массовой доли связующего преимущественное влияние оказывает доля добавки связующего. С увеличением доли добавки связующего свыше 8% и более для хлопка и с 2% для льна значимое влияние начинает оказывать состав растительного наполнителя.

Наилучшие результаты обеспечивают образцы из отходов прядения растительных волокон.

Добавка мягких древесных отходов несколько снижает прочность композита. Однако, значимых различий в прочности при добавке мягких древесных отходов нет, что позволяет сделать вывод, что данные отходы составляют ресурсный потенциал производства композиционного плитного материала.

Значимое различие в прочности композитов с добавкой льна и хлопка объясняется структурой растительного наполнителя.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшими значениями предела прочности на изгиб обладают образцы с массовой долей связующего 30%. Композиционные материалы с добавлением мягких отходов древесины уступают данным плитам практически в 1,2–1,4 раза.

При повышении степени наполнения композиционных материалов мягкими добавками древесины прочностные показатели оказались ниже, чем у ненаполненных составов. Объяснить это можно тем, что при использовании частиц более мелких размеров увеличивается площадь поверхности сцепления наполнителя с матрицей, что повышает адгезионную прочность.

Для всех связующих увеличение доли их добавки приводит к повышению прочности материала и значительному снижению разбухания по толщине, причем при любой доле добавки связующего более прочными являются композиционные материалы из отходов переработки льна.

Прочность при статическом изгибе плит из хлопка, изготовленных при температуре сушки 20°C на ФФС не соответствует требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам строительного назначения.

Плиты из отходов переработки льна на фенольном связующем, изготовленные при температуре сушки 20°C, соответствуют нормативным требованиям по прочности только при доле добавки 24–30 % по массе.

Более низкие значения физико-механических показателей теплоизоляционных композиционных плит из древесных отходов, в сравнении с показателями плит из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, также объясняется различиями в структуре 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, что затрудняет формирование водородных связей и создание прочной структуры композита.

Композиционные плиты имеют необходимый для теплоизоляционных материалов низкие значения водопоглощения и разбухания по толщине и могут использоваться для теплоизоляционных конструкций.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность использования отходов для изготовления композиционных материалов.

#### **4.4. Показатели композитов из растительного сырья при изменениях температуры и влажности**

При эксплуатации плитных материалов строительного назначения необходима стабильность показателей, обуславливающая их долговечность. Одним из основных признаков старения материала является снижение прочности. Ослабляющее влияние на прочность материалов строительного назначения оказывает воздействие окружающей среды с переменными значениями

температуры и влажности. В композиционных материалах с растительным наполнителем на основе матрицы из терморезистивных связующих при изменениях температуры и влажности возникают напряжения в клеевом материале и наполнителе. Возможно параллельное протекание процессов дополнительного структурирования, ведущих к росту жесткости клеевых швов и концентрации напряжений, а также гидролитической деструкции полимера. Влажностные напряжения, развивающиеся в адгезионном слое клеевого соединения, по-разному действуют на полимер и склеиваемый материал. На границе жесткосетчатого полимера и растительного наполнителя с большей релаксирующей способностью будут возникать напряжения, передающиеся из зоны клеевого контакта. На величину напряжений будет влиять также структура растительного наполнителя (древесного или их отходов однолетников) – фракционный размер, пористость, наличие минеральных, экстрактивных, жиро-восковых веществ.

В условиях эксплуатации на строительные материалы, в том числе трехслойные конструкции (стенные панели и т. п.) [61] действуют переменные факторы: нагревание, увлажнение, замораживание и др. По мнению Б.С. Баталина, изменение эксплуатационных свойств теплоизоляционных материалов «может происходить вследствие протекания фотоокислительных и термоокислительных процессов, в результате которых изменяется молекулярная масса и молекулярно–массовое распределение. Помимо этого причиной изменения эксплуатационных свойств могут являться и структурные изменения, которые происходят с течением времени и под действием сравнительно низкой температуры. Успешное применение любого полимерного материала в различных условиях зависит от его способности сохранять свои эксплуатационные свойства, т. е. от долговечности» [13].

Поэтому для прогнозирования старения материалов в процессе эксплуатации используют методы натуральных испытаний или ускоренных циклических воздействий.

Более информативными и точными (применительно к практическому использованию) являются методы натуральных испытаний [156; 176; 71, 155; 133, 74, 157, 286]. Существуют графоаналитические методы сопоставления натуральных испытаний в атмосфере и контрольных лабораторных образцов материалов, значительно сокращающие трудоемкость и время проведения исследований [169, 5, 189]. Так, по данным А.С. Фрейдина, использование графоаналитического метода прогнозирования эксплуатации материалов в строительстве на срок порядка 30 лет ( $10^9$  с) требует проведения натуральных испытаний в течение  $5 \cdot 10^7$  с (около 1,5 лет). Однако применяемые для прогнозирования расчетные методы аналогий [169] теоретически обоснованы для материалов, находящихся в высокоэластичном состоянии, и в меньшей степени применимы к плитным материалам на термореактивной матрице. Также затруднительно применение для прогнозирования прочности композитов из растительного сырья на термореактивных связующих методов теории случайных или деградационных функций, адекватно описывающих системы из древесной стружки и минерального вяжущего (таких, как цементностружечные плиты) [61, 16, 161, 135].

Следует отметить, что трудоемкость и длительность натуральных испытаний снижает оперативность принятия решений по выбору технологических воздействий на материал. В процессе эксплуатации строительных материалов снижение их прочности является следствием остаточных технологических, температурных и влажностных напряжений, а также интенсивного влияния знакопеременных нагрузок.

Доказано, что компоненты композита по-разному реагируют на колебания температуры и влажности. Лигноцеллюлозный наполнитель в данных условиях длительное время является достаточно стойким. По данным Е. Н. Покровской, «ИК-спектры образцов древесины различного возраста показали отсутствие химических изменений в древесинном веществе во времени. Происходит лишь количественное изменение составляющих, а лигноуглеводный комплекс в условиях переменной влаги ... проявляет устойчивость во време-

ни» [121]. Так, Jinchun Z. отмечает, что чувствительность лигноцеллюлозных композиционных материалов к влажности по-прежнему является проблемой, при этом свойства композиционных материалов, выполненных из волокон льна, в большей степени зависят от типа связующего (термопластичные, терморезистивные материалы или биоматериалы) [243]. Использование в качестве наполнителя волокон льна и хлопка позволяет обеспечить высокие прочностные показатели композиционных материалов, при этом прочность композитов обратно пропорциональна доле лигноцеллюлозного наполнителя [198, 272]. Прочность композита с растительным наполнителем определяется прочностью матрицы из терморезистивного связующего.

По данным В.М. Хрулева, снижение прочности клеевого соединения прямо пропорционально скорости разбухания [177]. Если на материал прилагаются знакопеременные воздействия, релаксационная способность клеевого соединения ослабляется, при этом наиболее слабыми становятся адгезионные связи [178, 169]. Особенно сказывается на релаксационной способности клеевых соединений низкая температура. При температуре  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже в порах композитов на основе растительного сырья, включая древесину, образуется лед. Жесткость материала резко увеличивается, в соединении двух разнородных материалов – полимера и растительного наполнителя, имеющих разный коэффициент теплового линейного расширения, возникают температурные напряжения. При низкой температуре густосетчатые полимеры ведут себя как хрупкие тела, они могут разрушаться даже при относительно малой деформации [23]. В результате малой продолжительности периода «замачивание– замораживание–оттаивание–сушка» напряжения не успевают релаксировать, разрушающее воздействие на материал возрастает в сравнении с натурными условиями. С учетом вышеизложенного предпочтительнее выбор ускоренных циклических испытаний.

Значительный вклад в представления о структурообразовании древесных композиционных материалов строительного назначения внес В. М. Хрулев [174, 175, 98]. Им предложен для оценки атмосферостойкости

клееной древесины и плитных материалов циклический режим испытания, включающий пребывание образцов в воде в течение 5 ч и высушивание при 70°C в течение 24 ч. В развитие исследований был разработан ГОСТ 33121-2014 [45]. Этот метод применим к оценке конструкционных строительных клеев [166]. В [45] были включены испытания материалов в кипящей воде. В дальнейшем воздействия факторов изменения температуры и влажности окружающей среды были смоделированы в виде циклических испытаний в стандартных методиках – российских [45, 44] и европейской [210]. Российские [96, 186, 113, 147, 29] и зарубежные ученые [269, 229, 40, 205, 255, 315] проводят исследования в данном направлении с использованием стандартных и самостоятельно разработанных методик. По мнению Henock Dandena Dibaba, «циклические испытания позволяют оценить деформации, усталость и ползучесть материала полимеров и полимерных композитов» [229].

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. Для теплоизоляционных плит, в отличие от конструкционных влагостойких, не нормируются прочность и разбухание по толщине после циклических испытаний. На практике любому изменению температуры соответствует изменение влажности окружающего воздуха. При этом вследствие протекающих процессов сорбции–десорбции водяных паров материал низкой плотности, имеющий некоторое количество открытых пор, периодически поглощает и отдает влагу. Данное явление оказывает значительное влияние и на паропроницаемость теплоизоляционных материалов [80]. Следствием этих процессов является развитие температурных и влажностных напряжений. Если напряжения не успевают релаксировать, и величина их превышает прочность адгезионной связи, это приводит к уменьшению прочности композита, к снижению формоустойчивости и теплозащитных свойств.



С учетом этого в работе было принято решение использовать стандартный метод циклических испытаний материала [45]. Результаты циклических испытаний позволят оценить стойкость материала к изменениям температуры и влажности в процессе эксплуатации.

#### **4.4.1. Методика и результаты исследований стойкости к температурно-влажностным воздействиям композиционных плитных материалов из отходов производства хлопковых и льняных волокон на основе матрицы из синтетических и неорганических связующих**

Циклические температурно-влажностные испытания производились согласно [45]. Один цикл температурно-влажностных воздействий на образцы включает в себя следующие операции: пребывание образцов в воде при 20 °С в течение 20 ч, замораживание мокрых образцов при -20 °С в течение 6 ч, оттаивание при 20 °С в течение 16 ч и прогрев при температуре 60 °С в течение 6 ч.

Результаты определения физико-механических показателей материалов после каждого из десяти циклов испытаний представлены в таблицах 4.3–4.7. В таблице 4.8 приведены зависимости остаточной прочности композиционных плитных материалов ( $Y$ ) от числа циклов испытаний ( $x$ ). Снижение прочности, как правило, выражается функцией разной сложности, начиная от простой показательной функции [170]. В работе получены зависимости, начиная с показательной функции и до полиномов четвертой степени, для каждой модели приведены значения достоверности аппроксимации.

На рисунках 4.4, 4.5 представлены зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит из отходов льна и хлопка после циклов температурно-влажностных воздействий, на рисунке 4.6 – зависимости данного показателя для ДСтП, плит из отходов льна и хлопка на фенолоформальдегидном связующем.

Таблица 4.3 – Динамика изменения показателей древесно-стружечных плит\* в циклических испытаниях

Циклы	Потеря массы, $\Delta m$ , %	Предел прочности при статическом изгибе, $\sigma_i$ , МПа	Разбухание по толщине, $P_s$ , %	Остаточная масса, %	Остаточная прочность, %
До испытаний (контрольные)	- / -	25,5/22,97	9,4/24,5	-	-
1	5,38/2,95	21,09/11,39	10,7/24,8	94,62/97,05	82,5/49,6
2	16,82/10,63	18,27/6,50	12,2/25,7	83,18/89,37	71,5/28,3
3	26,3/ разв.	16,02/ разв.	12,9/ разв.	73,7/-	62,9/0
4	28,07/ -	13,20/ -	14,2/ -	71,93/-	51,6/0
5	36,71/ -	10,47/ -	15,3/ -	63,29/-	41,0/0
6	41,82/ -	7,95/ -	17,9/ -	58,18/-	31,3/0
7	45,98/ -	6,00/ -	19,8/ -	54,02/-	23,5/0
8	46,25/-	4,72/-	22,2/-	53,75/-	18,5/0
9	46,87/-	4,28/-	25,4/-	53,13/-	16,8/0
10	47,14/-	3,51/-	28,6/-	52,86/-	13,7/0

\* Над чертой значения показателей для ДСтП на фенолоформальдегидном связующем, под чертой – на карбамидоформальдегидном связующем.

Таблица 4.4 – Динамика изменения показателей композитов \*\* на ФФС в циклических испытаниях

Циклы	Потеря массы, $\Delta m$ , %	Предел прочности при статическом изгибе, $\sigma_i$ , МПа	Разбухание по толщине, $P_s$ , %	Остаточная масса, %	Остаточная прочность, %
До испытаний (контрольные)	- / -	0,49/0,55	3,3/6,9	-	-
1	7,42/8,61	0,46/0,53	1,8/3,7	92,58/91,39	0,94/0,96
2	22,11/26,21	0,46/0,53	1,9/4,3	77,89/73,79	0,94/0,96
3	36,82/41,63	0,44/0,52	2,1/4,6	63,18/58,37	0,89/0,94
4	38,64/44,52	0,43/0,51	2,2/4,9	61,36/55,48	0,87/0,93
5	51,01/59,45	0,41/0,49	2,3/5,1	48,99/40,55	0,83/0,89
6	58,48/66,04	0,41/0,47	2,4/5,8	41,52/33,96	0,83/0,85
7	64,37/72,44	0,40/0,47	2,9/6,3	35,63/27,56	0,81/0,85
8	64,75/73,08	0,38/0,41	3,2/6,7	35,25/26,92	0,77/0,74
9	65,42/73,47	0,31/0,32	3,3/6,9	34,58/26,53	0,63/0,58
10	65,61/74,59	0,15/0,26	3,5/7,1	34,39/25,41	0,31/0,47

\*\* Над чертой для плит из хлопка, под чертой для плит из льна.

Таблица 4.5 – Динамика изменения показателей композитов\*\*\* на КФС в циклических испытаниях

Циклы	Потеря массы, $\Delta m$ , %	Предел прочности при статическом изгибе, $\sigma_i$ , МПа	Разбухание по толщине, $P_s$ , %	Остаточная масса, %	Остаточная прочность, %
До испытаний (контрольные)	- / -	0,38/0,49	3,4/8,2	-	-
1	7,56/8,79	0,37/0,47	1,9/4,3	92,44/91,21	0,97/0,96
2	18,9/21,97	0,37/0,47	2,4/4,9	81,1/78,03	0,97/0,96
3	35,91/41,74	0,35/0,47	2,7/5,3	64,1/58,26	0,92/0,96
4	42,54/49,63	0,32/0,46	2,9/5,6	57,46/50,37	0,84/0,94
5	51,26/58,34	0,27/0,43	3,1/5,7	48,74/41,66	0,71/0,88
6	58,12/65,75	0,22/0,43	3,2/5,9	41,88/34,25	0,58/0,88
7	63,41/71,68	0,22/0,42	3,4/6,8	36,59/28,32	0,58/0,85
8	68,29/76,13	0,20/0,41	3,4/7,2	31,71/23,87	0,52/0,83
9	71,63/78,41	0,18/0,35	3,6/7,4	28,37/21,59	0,47/0,71
10	73,55/80,80	0,11/0,30	3,8/7,6	26,45/19,2	0,29/0,61

\*\*\* Над чертой для плит из хлопка, под чертой для плит из льна.

Таблица 4.6 – Динамика изменения показателей композитов\*\*\* на ЖС в циклических испытаниях

Циклы	Потеря массы, $\Delta m$ , %	Предел прочности при статическом изгибе, $\sigma_i$ , МПа	Разбухание по толщине, $P_s$ , %	Остаточная масса, %	Остаточная прочность, %
До испытаний (контрольные)	- / -	0,71/0,88	3,2/6,8	-	-
1	7,71/9,12	0,70/0,87	1,7/3,6	92,29/90,88	0,98/0,99
2	16,23/20,54	0,67/0,85	1,8/4,2	83,77/79,46	0,94/0,96
3	31,62/39,67	0,62/0,81	2,0/4,5	68,38/60,33	0,87/0,92
4	40,24/43,75	0,60/0,77	2,1/4,8	59,76/56,25	0,84/0,87
5	49,13/51,62	0,57/0,76	2,2/5,0	50,87/48,38	0,8/0,86
6	53,97/56,73	0,55/0,73	2,3/5,7	46,03/43,27	0,77/0,83
7	59,64/62,12	0,51/0,72	2,8/6,2	40,36/37,88	0,72/0,82
8	64,82/65,53	0,49/0,69	3,1/6,6	35,18/34,47	0,69/0,78
9	68,32/69,41	0,44/0,48	3,4/6,8	31,68/30,59	0,62/0,54
10	70,69/70,75	0,38/0,41	3,5/7,1	29,31/29,25	0,53/0,46

\*\*\* Над чертой для плит из хлопка, под чертой для плит из льна.

Таблица 4.7 – Динамика изменения показателей композитов\*\*\* на АХФ в циклических испытаниях

Циклы	Потеря массы, $\Delta m$ , %	Предел прочности при статическом изгибе, $\sigma_i$ , МПа	Разбухание по толщине, $P_s$ , %	Остаточная масса, %	Остаточная прочность, %
До испытаний (контрольные)	- / -	0,69/0,81	3,2/6,8	-	-
1	6,12/ 7,45	0,68/0,79	1,7/3,6	93,88/92,55	0,98/0,97
2	14,28/15,61	0,66/0,78	1,8/4,2	85,72/84,39	0,95/0,96
3	30,42/34,72	0,65/0,76	2,0/4,5	69,58/65,28	0,94/0,94
4	38,16/41,26	0,64/0,75	2,1/4,8	61,84/58,74	0,93/0,92
5	45,17/49,24	0,64/0,73	2,2/5,0	54,83/50,76	0,93/0,90
6	51,83/53,62	0,58/0,69	2,3/5,7	48,17/46,38	0,84/0,85
7	58,27/60,78	0,49/0,61	2,8/6,2	41,73/39,22	0,71/0,75
8	66,71/69,28	0,41/0,52	3,1/6,6	33,29/30,72	0,59/0,64
9	70,29/73,68	0,33/0,46	3,4/6,8	29,71/26,32	0,48/0,57
10	74,22/76,48	0,28/0,39	3,5/7,1	25,78/23,52	0,40/0,48

\*\*\* Над чертой для плит из хлопка, под чертой для плит из льна.

Таблица 4.8 – Зависимости остаточной прочности композиционных плитных материалов от числа циклов испытаний

Композиционный материал	Зависимости остаточной прочности плит Y, % от числа циклов x	Достоверность аппроксимации R <sup>2</sup>
ДСтП на ФФС	$Y = 111,28e^{-0,212x}$	0,9899
Композит из хлопка на ФФС	$Y = 1,1873e^{-0,083x}$	0,5757
	$Y = -0,0102x^2 + 0,0603x + 0,8443$	0,8741
	$Y = -0,0031x^3 + 0,0412x^2 - 0,1771x + 0,902$	0,9679
Композит из льна на ФФС	$Y = 1,1693e^{-0,069x}$	0,7573
	$Y = -0,0088x^2 + 0,0461x + 0,8443$	0,9739
	$Y = -0,001x^3 + 0,0082x^2 - 0,0323x + 0,9903$	0,9866
Композит из хлопка на КФС	$Y = 1,2591e^{-0,122x}$	0,9098
	$Y = -0,0016x^2 - 0,0584x + 1,0677$	0,9661
	$Y = -0,0004x^3 - 0,0082x^2 - 0,028x + 1,0333$	0,9671
Композит из льна на КФС	$Y = 1,081e^{-0,044x}$	0,7904
	$Y = -0,0055x^2 + 0,0247x + 0,932$	0,961
	$Y = -0,0007x^3 + 0,0069x^2 - 0,0323x + 0,9963$	0,9751
Композит из хлопка на ЖС	$Y = 1,0699e^{-0,061x}$	0,9542
	$Y = -0,0459x + 1,0287$	0,9812
	$Y = -0,0013x^2 - 0,0318x + 1,0003$	0,9862
	$Y = -0,0008x^3 + 0,0117x^2 - 0,0915x + 1,0677$	0,9969
Композит из льна на ЖС	$Y = 1,166e^{-0,073x}$	0,7624
	$Y = -0,0521x + 1,0893$	0,83
	$Y = -0,0069x^2 + 0,0242x + 0,9368$	0,9241
	$Y = -0,0019x^3 + 0,0237x^2 - 0,1173x + 1,0963$	0,9638
Композит из хлопка на АХФ	$Y = 1,2697e^{-0,097x}$	0,8359
	$Y = -0,0667x + 1,142$	0,8783
	$Y = -0,0091x^2 + 0,0329x + 0,9428$	0,9817
	$Y = 0,0005x^3 - 0,0166x^2 + 0,0679x + 0,9033$	0,9833
	$Y = -0,0006x^4 - 0,0128x^3 + 0,0807x^2 - 0,1981x + 1,1108$	0,9977
Композит из льна на АХФ	$Y = 1,182e^{-0,076x}$	0,8627
	$Y = -0,0558x + 1,1047$	0,902
	$Y = -0,0069x^2 + 0,0205x + 0,9522$	0,9912
	$Y = 0,0002x^3 - 0,109x^2 + 0,039x + 0,9313$	0,9918

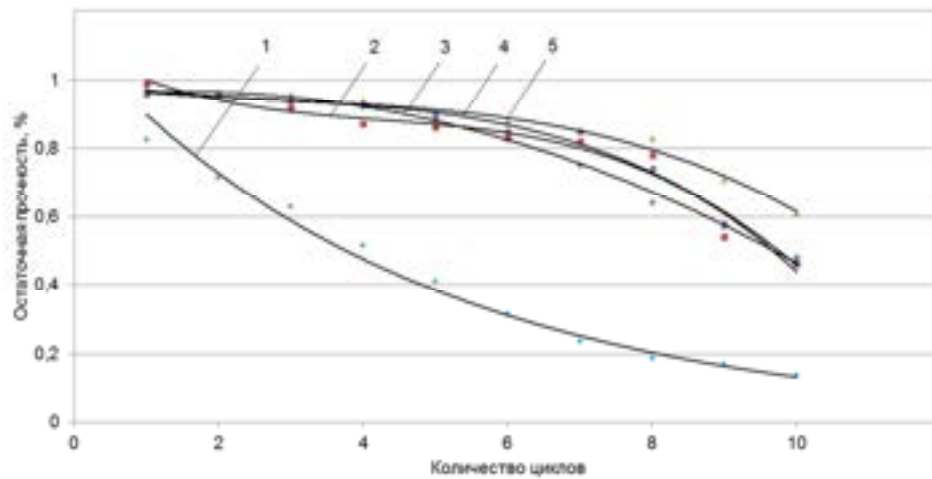


Рисунок 4.4 – Зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит из отходов льна после циклов температурно-влажностных воздействий: 1 – ДСтП на ФФС; 2 – композит из льна на АХФ; 3 – композит из льна на ЖС; 4 – композит из льна на КФС; 5 – композит из льна на ФФС

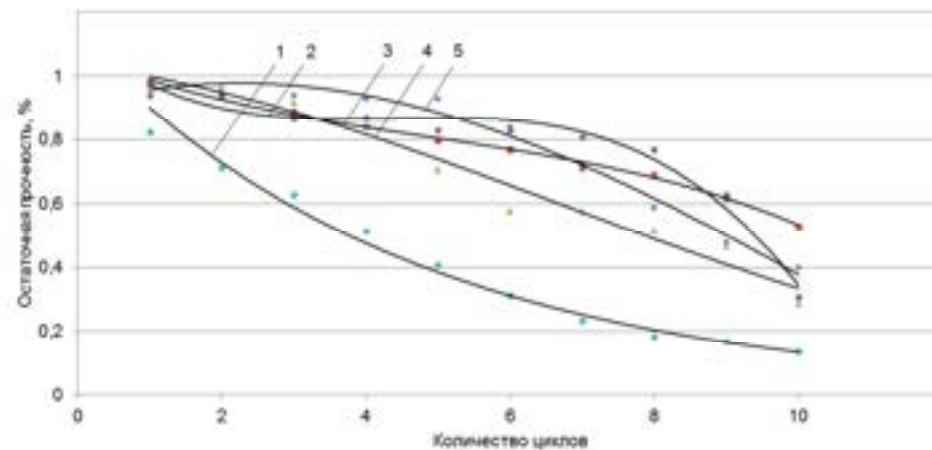


Рисунок 4.5 – Зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит из отходов хлопка после циклов температурно-влажностных воздействий: 1 – ДСтП на ФФС; 2 – композит из хлопка на АХФ; 3 – композит из хлопка на ЖС; 4 – композит из хлопка на КФС; 5 – композит из хлопка на ФФС



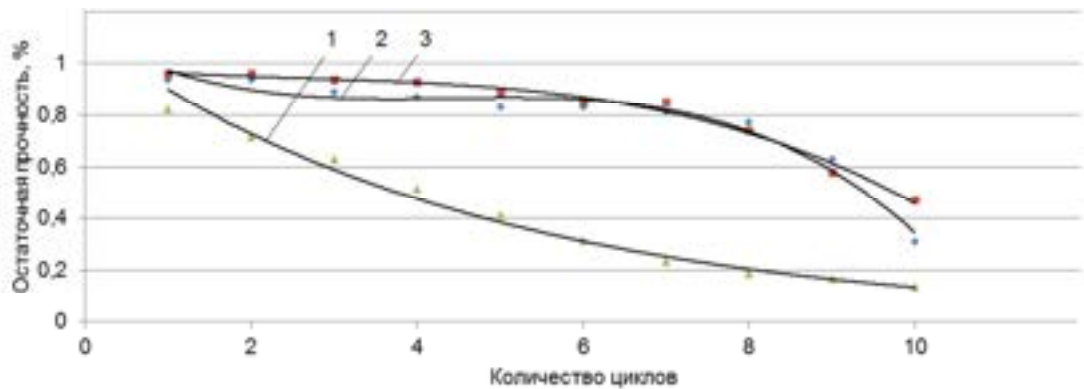


Рисунок 4.6 – Зависимости остаточной прочности при статическом изгибе, % для плит на ФФС после циклов температурно-влажностных воздействий:

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

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

Наименьшую стойкость к температурно-влажностным воздействиям имеют композиты на карбаминоформальдегидном связующем, при том, что начальная прочность при статическом изгибе плит сопоставима на всех четырех видах связующих. Это сопоставимо с результатами исследований А.С. Фрейдина [170], согласно которым композиты из цельной древесины на КФС разрушились после шести циклов испытаний.

Низкая гидролитическая устойчивость КФС приводит к значительной потере прочности ДСтП уже после второго цикла испытаний (таблица 4.3), для композитов из хлопка на КФС прочность ниже 60 % после шестого цикла, а плиты с льняным наполнителем имеют остаточную прочность выше 60 % и после десяти циклов испытаний. Перевод числа циклов испытаний на реальный срок эксплуатации композитов возможен после сопоставления изменения прочности при натуральных и циклических испытаниях.

Значимость различий особенно явно выражена при использовании одного связующего и трех разных наполнителей (рисунок 4.6). Если сравнивать композит, производимый сухим способом – ДСтП (горячее прессование при температуре 180 °С) и композиты, изготавливаемые мокрым способом (суш-

ка при температуре 80 °С) на одном и том же связующем (ФФС), становится очевидным, что даже при неполной степени отверждения фенольного связующего плиты имеют большую размерную стабильность (таблицы 4.3–4.5) и более высокую остаточную прочность. Причина различий заключена в строении наполнителя. Основная механическая ткань древесины – волокна либриформа и волокна льна (рисунок 4.7а) имеют похожую сильно вытянутую веретенообразную форму с закрытыми заостренными концами.

Но элементарное волокно льна отличается от древесной стружки по строению и размерам. Элементарные волокна льна имеют среднюю длину 10...24 мм, длина волокна либриформа около 1 мм, поперечный размер их сопоставим – 11...20 мкм. Древесная стружка, кроме волокон либриформа, содержит водопроводящие элементы – сосуды диаметром порядка 200 мкм, объем которых занимает 10...55 % [19]. Водопроводящая функция древесной стружки намного больше, чем у льняного волокна. Также льняное волокно содержит почти в два раза больше целлюлозы, чем древесина. Слоистая структура стенок волокна является следствием постепенного (с перерывами) отложения целлюлозы на стенках волокна.



Рисунок 4.7 – Срезы волокон:

а – продольный и поперечный срезы льняного волокна; б – поперечный срез хлопкового волокна

Значительно большая ориентация структурных элементов относительно оси в льняном волокне (по сравнению с хлопковым) объясняет более высокую прочность льна и меньшую способность удлиняться при растяжении.

Элементарные волокна, хлопка так же как и льна, имеют слоистое строение (рисунок 4.7б) вследствие постепенного послойного отложения целлюлозы на стенках волокон в виде суточных концентрических слоев. По мере созревания волокна остатки протоплазмы в канале засыхают, волокно сплющивается. При этом наружный диаметр волокон остается неизменным, а диаметр канала вследствие утолщения стенок уменьшается, повышается прочность волокон, их упругость, улучшаются сорбционные свойства.

Прогнозировать остаточную прочность при статическом изгибе для композиционных плит можно, используя разработанные регрессионные модели (таблица 4.8). Все зависимости имеют достоверность аппроксимации более 0,7. Увеличение степени полиномиальной зависимости свыше двух дает повышение точности прогнозирования результата на 0,06...9,4 % (в зависимости от вида композита).

Композиты из отходов хлопка имеют более низкую, чем из отходов льна, прочность при статическом изгибе и большую потерю прочности после циклов испытаний. Закономерность соблюдается как для плит на терморезактивном связующем СФЖ, так и для материалов на неорганических связующих – жидком стекле и алюмохромфосфате.

Композиты из отходов производства льна и хлопка показали высокую формоустойчивость после циклических испытаний, потеря массы свыше 50 % происходит после 5...6 циклов испытаний. Большая, чем для ДСтП, потеря массы объясняется удалением с водой пылевидной фракции, не связанной химическими и водородными связями в структуре композита. При этом большое количество водородных связей обеспечивает разбухание по толщине после десяти циклов не более 6,4 % для плит с хлопковым наполнителем и 10,8 % для плит с наполнителем из отходов льна.

Контрольные образцы на АХФ имеют более высокую прочность при статическом изгибе в сравнении с плитами, изготовленными на СФЖ и жидком стекле. После первого цикла испытаний более высокие значения остаточной прочности для композитов на основе льняного и хлопкового наполнителя показывают матрицы из неорганических связующих, значительное снижение остаточной прочности происходит после пятого цикла для плит из хлопкового наполнителя на карбамидоформальдегидном связующем, для остальных композитов прочность существенно снижается после 8–9 цикла испытаний.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют рекомендовать композиционные плитные материалы из отходов производства льняного и хлопкового волокна на основе термореактивных и неорганических связующих, имеющие высокую стойкость к циклическим температурно-влажностным воздействиям, к использованию в качестве теплоизоляционного элемента строительных конструкций.

#### **4.5. Применение регрессионных моделей второго порядка для анализа физико-механических показателей теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины хвойных пород на фенолформальдегидном связующем**

Для разработки регрессионных моделей был использован В-план второго порядка. Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 4.9, 4.10. Выходные величины:  $\sigma_{и}$  – прочность при статическом изгибе, МПа;  $h$  – разбухание по толщине за 24 часа, %;  $W$  – водопоглощение, %.

Таблица 4.9 – Диапазоны, уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение фактора		Уровни варьирования			Интервал варьирования, $\Delta_i$
	Натуральное	Кодированное	-1	0	+1	
Доля добавки связующего, %	$P_{св}$	$X_1$	0	20	40	20
Температура сушки, °С	$T_{сущ}$	$X_2$	100	135	170	35
Доля добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя	$D_{др}$	$X_3$	0	25	50	25

Таблица 4.10 – План эксперимента в натуральном обозначении факторов

№	$P_{св}$ , %	$T_{сущ}$ , °С	$D_{др}$ , %
1	40	170	50
2	0	170	50
3	40	100	50
4	0	100	50
5	40	170	0
6	0	170	0
7	40	135	0
8	0	100	0
9	40	135	25
10	0	135	25
11	20	170	25
12	20	100	25
13	20	135	50
14	20	135	0

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблицах 4.11 – 4.13.

После расчета коэффициентов регрессии математические модели приобретают вид:

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{и} = 0,334 + 0,071X_1 + 0,039X_2 - 0,057X_3 + 0,026X_1^2 + 0,026X_2^2 + 0,026X_3^2 + 0,011X_1X_2 - 0,011X_1X_3 - 0,011X_2X_3; \quad (4.3)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

Таблица 4.11 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Прочность при статическом изгибе, МПа										$\bar{\sigma}_u$ , МПа	S <sup>2</sup> , МПа <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,46	0,44	0,43	0,47	0,44	0,41	0,55	0,46	0,41	0,53	0,46	2·10 <sup>-3</sup>
2	-	+	+	0,47	0,45	0,44	0,48	0,45	0,42	0,56	0,47	0,42	0,54	0,32	2·10 <sup>-3</sup>
3	+	-	+	0,58	0,56	0,55	0,59	0,56	0,53	0,67	0,58	0,53	0,65	0,40	2·10 <sup>-3</sup>
4	-	-	+	0,46	0,34	0,32	0,41	0,25	0,32	0,33	0,31	0,32	0,34	0,19	3·10 <sup>-3</sup>
5	+	+	-	0,62	0,50	0,48	0,57	0,41	0,48	0,49	0,47	0,48	0,50	0,70	3·10 <sup>-3</sup>
6	-	+	-	0,38	0,26	0,24	0,33	0,17	0,24	0,25	0,23	0,24	0,26	0,40	3·10 <sup>-3</sup>
7	+	-	-	0,37	0,35	0,34	0,38	0,35	0,32	0,46	0,47	0,32	0,44	0,48	2·10 <sup>-3</sup>
8	-	-	-	0,31	0,19	0,17	0,26	0,10	0,17	0,18	0,16	0,17	0,19	0,34	3·10 <sup>-3</sup>
9	+	0	0	0,44	0,43	0,27	0,28	0,24	0,39	0,33	0,26	0,32	0,34	0,32	5·10 <sup>-3</sup>
10	-	0	0	0,44	0,43	0,45	0,46	0,41	0,44	0,41	0,40	0,34	0,42	0,40	1·10 <sup>-3</sup>
11	0	+	0	0,46	0,34	0,32	0,41	0,25	0,32	0,33	0,31	0,32	0,34	0,32	3·10 <sup>-3</sup>
12	0	-	0	0,53	0,41	0,39	0,48	0,32	0,39	0,40	0,38	0,41	0,39	0,40	3·10 <sup>-3</sup>
13	0	0	+	0,42	0,40	0,39	0,43	0,40	0,37	0,51	0,52	0,37	0,49	0,35	2·10 <sup>-3</sup>
14	0	0	-	0,34	0,32	0,31	0,35	0,32	0,29	0,43	0,44	0,41	0,29	0,37	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица 4.12 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Разбухание по толщине за 24 часа, %										$\bar{h}$ , %	S <sup>2</sup> , % <sup>2</sup>
1	+	+	+	6,7	9,0	7,9	7,8	11,5	7,8	7,7	7,9	6,8	8,9	7,6	1,88
2	-	+	+	12,3	14,6	13,5	13,4	12,2	17,1	12,9	14,0	14,4	15,6	14,0	1,91
3	+	-	+	9,2	11,5	10,4	10,3	14,1	9,8	9,9	10,4	9,3	11,1	10,6	2,03
4	-	-	+	19,4	17,1	18,2	18,3	22,0	17,9	18,3	17,8	17,9	19,1	18,6	1,85
5	+	+	-	4,4	6,7	5,6	5,5	9,3	5,2	5,1	4,7	5,2	6,3	5,8	1,96
6	-	+	-	12,3	14,6	13,5	13,4	17,1	13,0	12,9	12,5	13,1	14,6	13,7	2,02
7	+	-	-	9,6	7,0	9,3	8,2	8,1	7,7	11,8	7,6	4,9	7,8	8,2	3,25
8	-	-	-	16,2	18,5	17,4	17,3	18,1	16,9	16,8	14,1	16,9	16,8	16,9	1,42
9	+	0	0	7,5	9,8	8,7	8,6	9,4	8,2	8,1	5,3	8,3	8,1	8,2	1,48
10	-	0	0	15,0	17,3	16,1	16,2	16,9	15,7	15,6	12,5	15,8	15,9	15,7	1,69
11	0	+	0	12,1	11,4	13,3	13,4	14,2	12,8	12,7	9,4	12,2	13,5	12,5	1,83
12	0	-	0	13,2	12,5	14,4	14,4	15,3	14,3	14,2	10,9	12,7	14,1	13,6	1,64
13	0	0	+	12,6	13,8	11,9	14,7	13,6	13,5	13,4	10,1	12,0	13,4	12,9	1,68
14	0	0	-	10,6	11,5	11,9	10,1	11,8	12,7	11,7	11,6	8,1	10,0	11,0	1,75

Таблица 4.13 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Водопоглощение, %										$\bar{W}$ , %	S <sup>2</sup> , % <sup>2</sup>
1	+	+	+	165	167	165	163	164	166	166	163	163	168	165	3,11
2	-	+	+	213	210	211	208	207	210	207	211	213	210	210	4,66
3	+	-	+	178	177	176	178	177	175	174	179	177	179	177	2,66
4	-	-	+	247	243	244	246	244	248	246	245	244	243	245	2,88
5	+	+	-	139	136	141	135	138	137	135	136	138	135	137	4,0
6	-	+	-	216	213	214	218	216	217	211	214	216	215	215	4,22
7	+	-	-	175	169	171	170	173	174	172	170	175	171	172	4,67
8	-	-	-	217	219	213	215	215	217	219	216	215	214	216	4,0
9	+	0	0	150	154	150	151	152	149	151	153	152	148	151	3,33
10	-	0	0	252	254	255	249	250	250	253	252	252	253	252	3,55
11	0	+	0	202	201	200	204	201	202	203	202	202	203	202	1,33
12	0	-	0	207	202	207	201	206	206	205	204	207	205	205	4,44
13	0	0	+	209	207	205	206	207	208	204	205	210	209	207	4,0
14	0	0	-	198	201	200	200	201	197	201	195	200	197	199	4,44



$$h = 12,51 - 3,85X_1 - 1,43X_2 + 0,81X_3 - 0,561X_1^2 + 0,539X_2^2 - 0,561X_3^2 + \\ + 0,300 X_1X_2 + 0,275 X_1X_3 - 0,250 X_2X_3; \quad (4.4)$$

- водопоглощение

$$W = 207,968 - 33,600X_1 - 8,600X_2 + 6,500X_3 - 6,410X_1^2 - 4,410X_2^2 - \\ - 4,910X_3^2 - 1,375X_1X_2 + 1,125X_1X_3 - 1,375X_2X_3. \quad (4.5)$$

Значения выходных величин по уравнениям регрессии представлены в таблице 4.14, это позволяет сделать вывод об адекватности математических моделей.

Перевод моделей из кодированных обозначений факторов в натуральные:

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{и} = 0,6 - 0,0006 P_{св} - 0,004 T_{суш} - 0,002 D_{др} + 0,00006 P_{св}^2 + 0,00002 T_{суш}^2 + \\ + 0,00004 D_{др}^2 - 0,00001 P_{св} T_{суш} - 0,00002 P_{св} D_{др} - 0,00001 T_{суш} D_{др}. \quad (4.6)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$h = 28,43 - 0,21 P_{св} - 0,16 T_{суш} + 0,1 D_{др} - 0,001 P_{св}^2 + 0,0004 T_{суш}^2 - \\ - 0,0009 D_{др}^2 + 0,0004 P_{св} T_{суш} + 0,0005 P_{св} D_{др} - 0,0003 T_{суш} D_{др}. \quad (4.7)$$

- водопоглощение

$$W = 181,83 - 0,83 P_{св} + 0,79 T_{суш} + 0,82 D_{др} - 0,016 P_{св}^2 - 0,0034 T_{суш}^2 - \\ - 0,0078 D_{др}^2 - 0,002 P_{св} T_{суш} + 0,0022 P_{св} D_{др} - 0,0015 T_{суш} D_{др}. \quad (4.8)$$

По полученным моделям построены графические зависимости, прочности при статическом изгибе ( $\sigma_{и}$ ), разбухания по толщине за 24 часа ( $h$ ), водопоглощения ( $W$ ) от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), и от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 4.8 – 4.16.

Таблица 4.14 – Значения выходных величин, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели  
в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения выходной величины					
				среднее по опыту	расчетное	среднее по опыту	расчетное	среднее по опыту	расчетное
				$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$\hat{\sigma}_u$ , МПа	$\bar{h}$ , %	$\hat{h}$ , %	$\bar{W}$ , %	$\hat{W}$ , %
1	+	+	+	0,46	0,48	7,6	7,8	165	167
2	-	+	+	0,32	0,31	14,0	13,8	210	208
3	+	-	+	0,40	0,40	10,6	10,5	177	178
4	-	-	+	0,19	0,20	18,6	18,8	245	244
5	+	+	-	0,70	0,72	5,8	5,9	137	126
6	-	+	-	0,40	0,41	13,7	13,9	215	217
7	+	-	-	0,48	0,49	8,2	8,4	172	173
8	-	-	-	0,34	0,33	16,9	17,1	216	217
9	+	0	0	0,32	0,31	8,2	8,0	151	150
10	-	0	0	0,40	0,39	15,7	15,9	252	252
11	0	+	0	0,32	0,34	12,5	12,7	202	201
12	0	-	0	0,40	0,42	13,6	13,4	205	204
13	0	0	+	0,35	0,36	12,9	12,7	207	206
14	0	0	-	0,37	0,35	11,0	11,1	199	200

Y ↑  
( $\sigma_{и}$ , МПа)

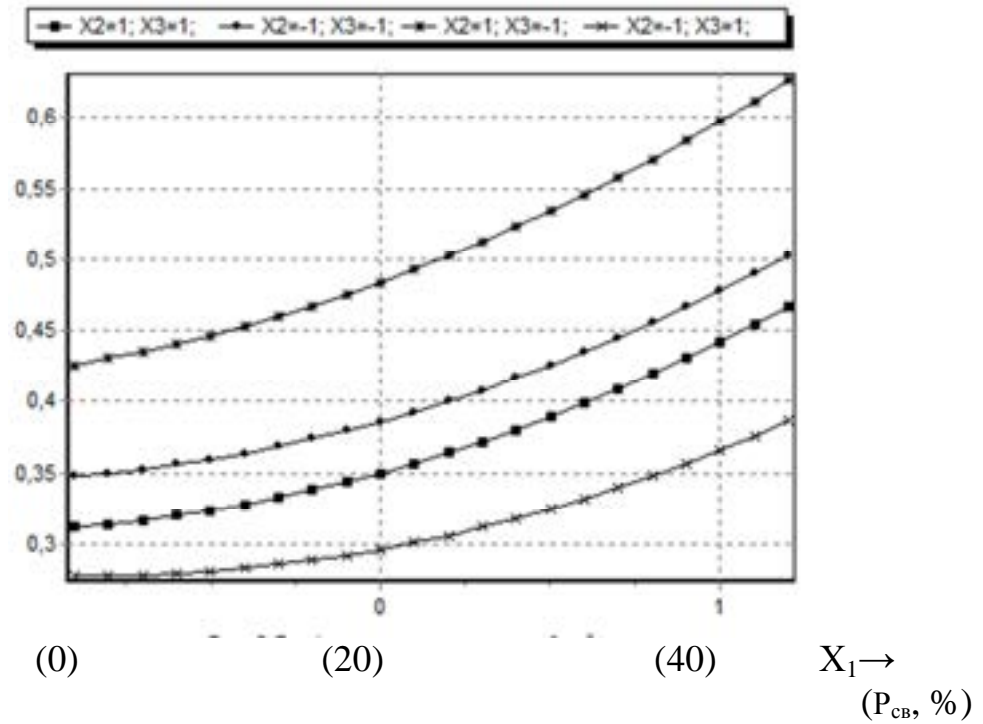


Рисунок 4.8 – График зависимости прочности при статическом изгибе от доли добавки связующего

Y ↑  
( $\sigma_{и}$ , МПа)

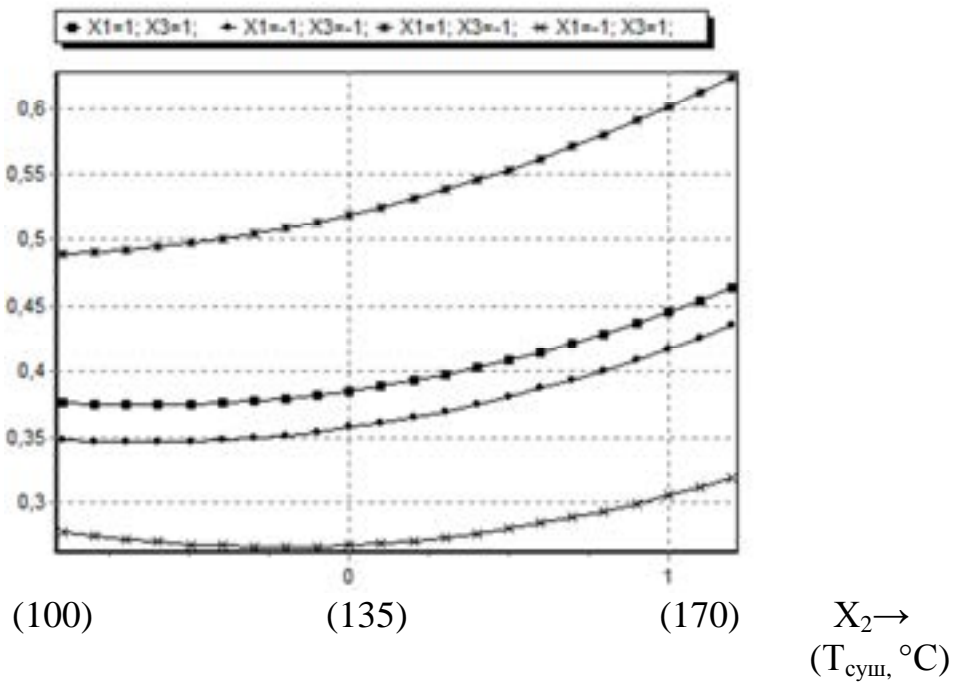


Рисунок 4.9 – График зависимости прочности при статическом изгибе от температуры сушки

Y ↑  
( $\sigma_{из}$ , МПа)

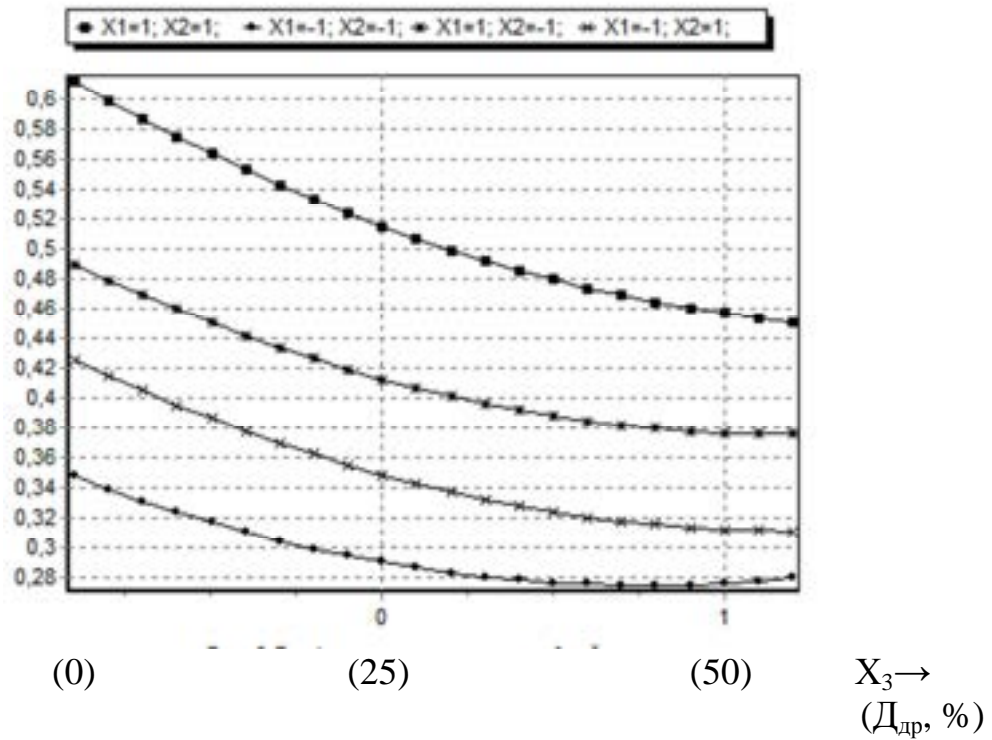


Рисунок 4.10 – График зависимости прочности при статическом изгибе от доли добавки отходов древесины

Y ↑  
(h, %)

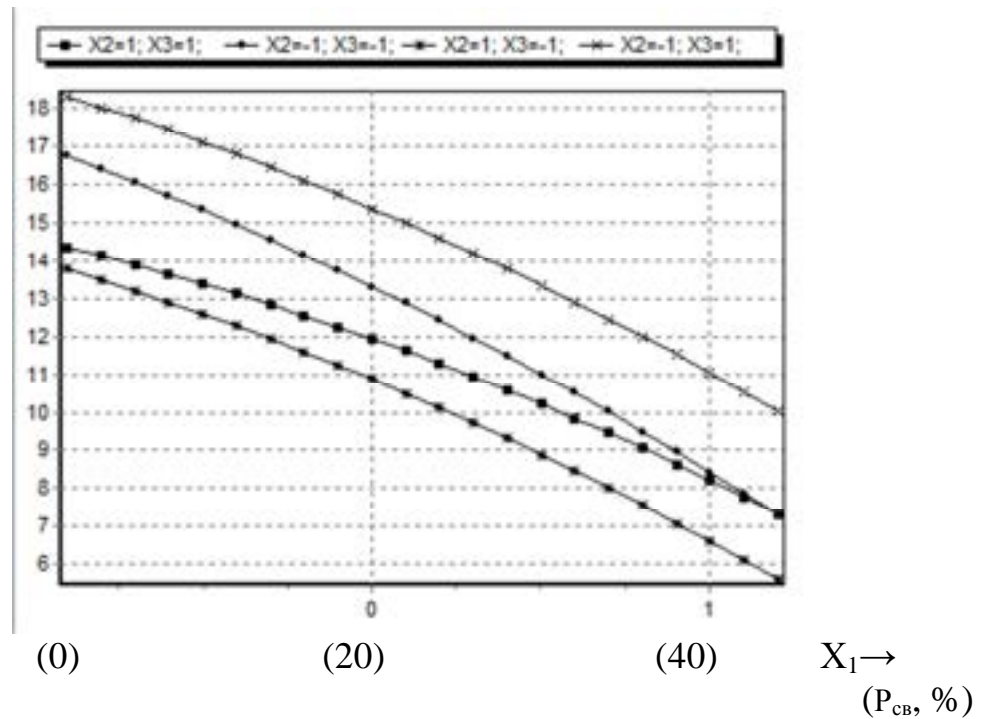
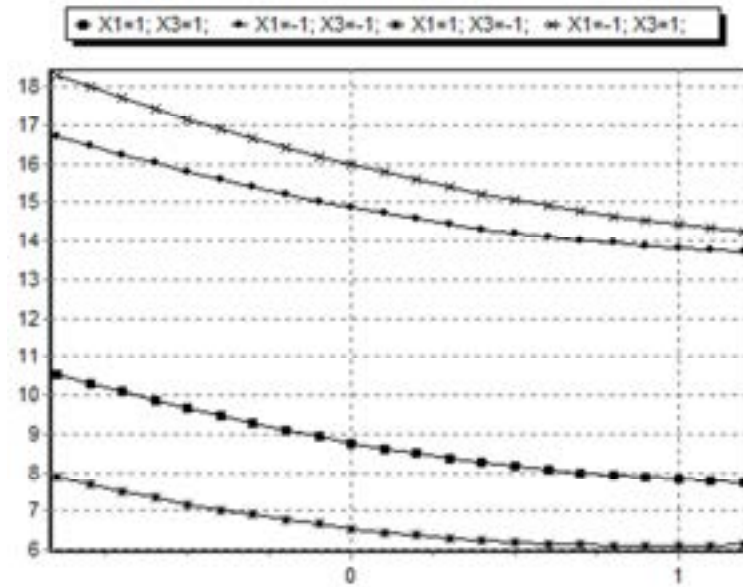


Рисунок 4.11 – График зависимости разбухания по толщине за 24 часа от доли добавки связующего

Y ↑  
(h, %)



(100)

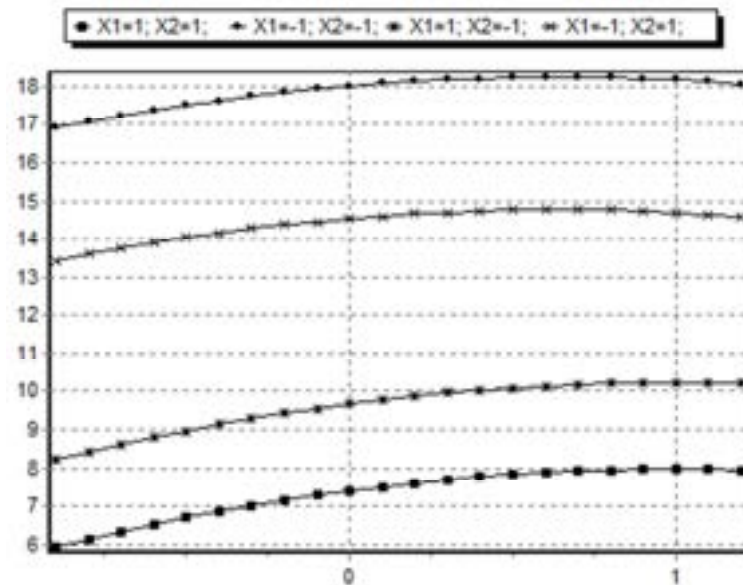
(135)

(170)

X<sub>2</sub> →  
(T<sub>суш</sub>, °C)

Рисунок 4.12 – График зависимости разбухания по толщине за 24 часа от температуры сушки

Y ↑  
(h, %)



(0)

(25)

(50)

X<sub>3</sub> →  
(D<sub>др</sub>, %)

Рисунок 4.13 – График зависимости разбухания по толщине за 24 часа от доли добавки отходов древесины

Y ↑  
(W, %)

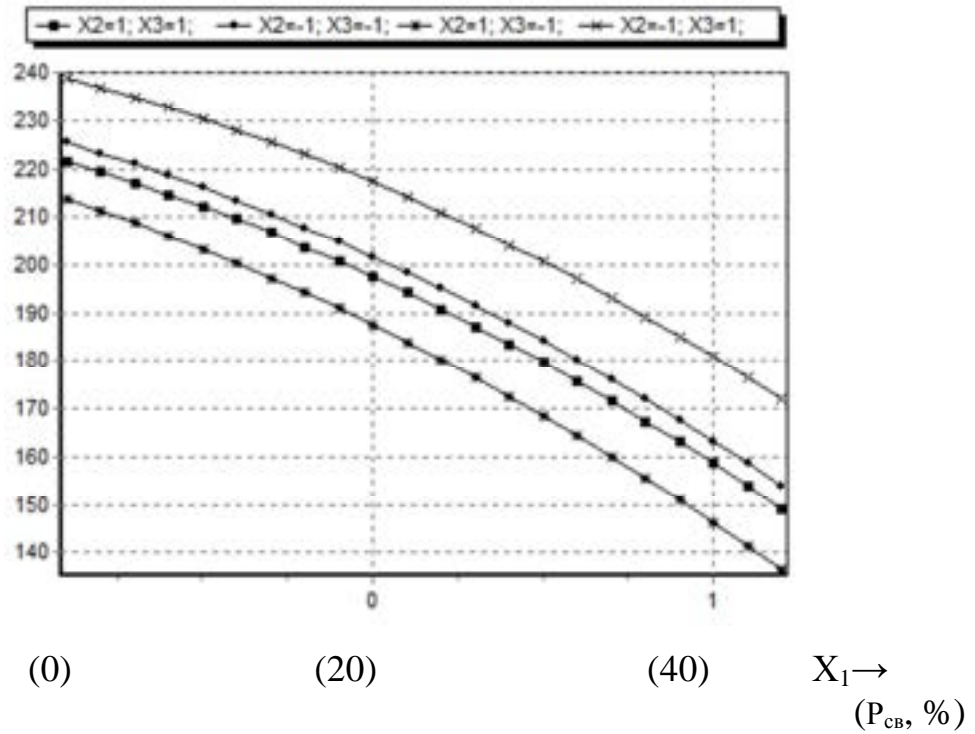


Рисунок 4.14 – График зависимости водопоглощения от доли добавки связующего

Y ↑  
(W, %)

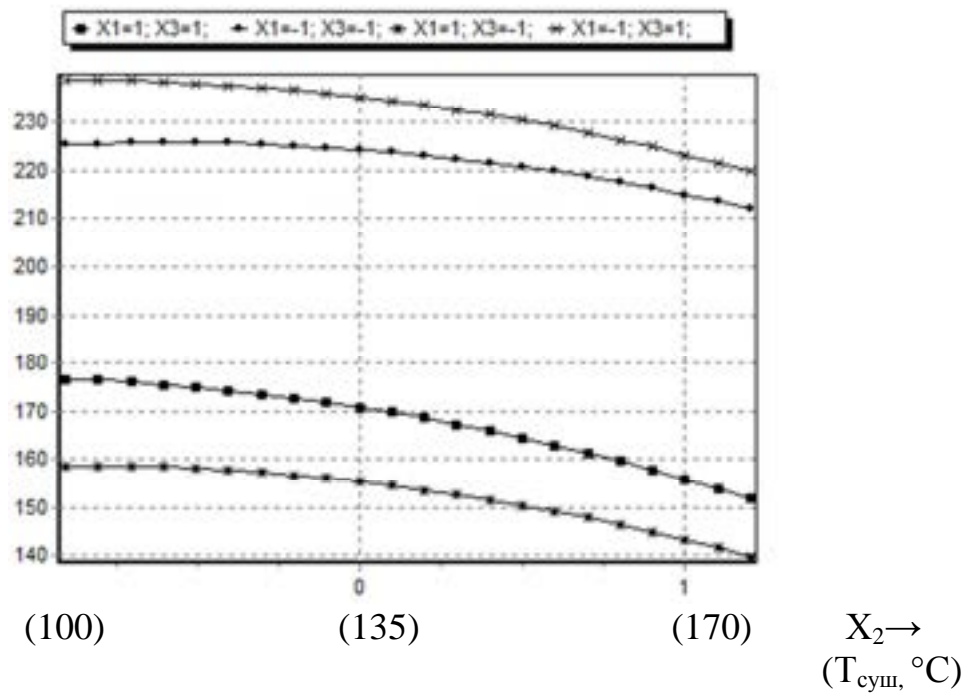


Рисунок 4.15 – График зависимости водопоглощения от температуры сушки

$Y \uparrow$   
(W, %)

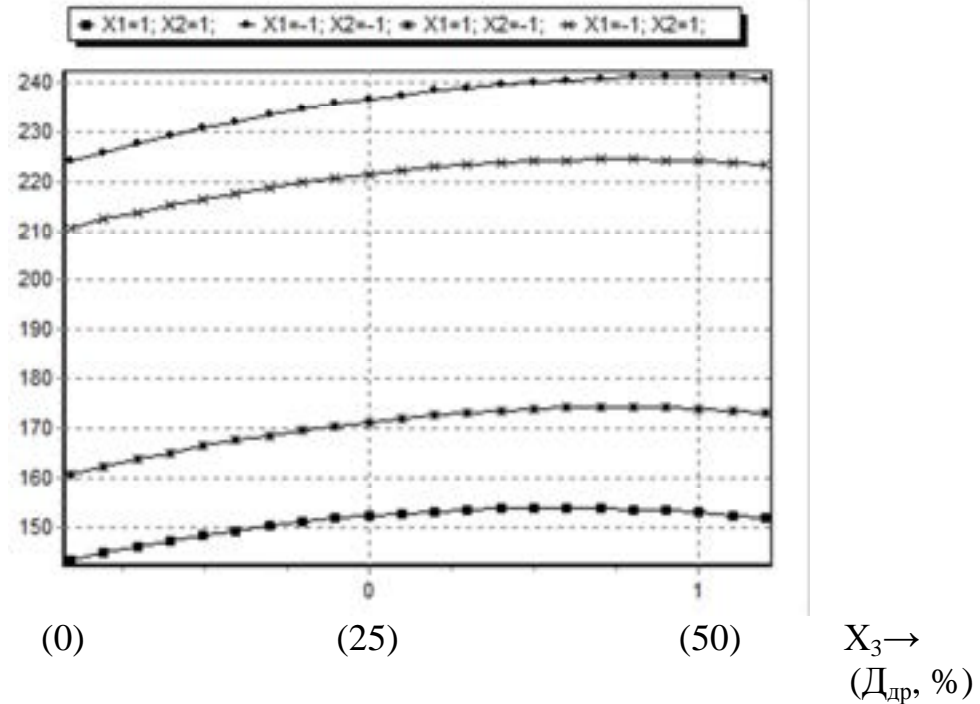


Рисунок 4.16 – График зависимости водопоглощения от доли добавки отходов древесины

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 темпера-

туре 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 структуре 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.

Логично предположить, что 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 вовле-



кается 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 целом, можно отметить, что задача, поставленная в исследовании – разработка композиционных теплоизоляционных плит из растительных отходов (невозвратных отходов прядения льна и хлопка и мягких отходов переработки древесины), является решенной. Композиционные плиты имеют необходимый для теплоизоляционных материалов предел прочности, низкие значения водопоглощения и разбухания по толщине. Обоснование возможности их использования в качестве теплоизоляционных материалов представлены в главе 5.

#### **4.6. Выводы и рекомендации по результатам экспериментальных исследований**

1. В ходе исследования экспериментально определены значения физико-механических показателей композиционных материалов. Установлено, 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.

2. Использование неорганического связующего – жидкого стекла и алюмохромфосфатного связующего в 1,3...1,4 раза снижает разбухание материала по толщине за 24 ч пребывания в воде.

3. Плиты из отходов переработки льна при доле добавки 30% по массе неорганического связующего (жидкого стекла, АХФ) соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к материалу-аналогу – древесноволокнистым плитам мокрого способа производства. Использование алюмохромфосфатного связующего (АХФС) позволяет создать более гибкую клеевую систему, в результате чего увеличение внешней нагрузки приводит к перераспределению плотности связей между соседними цепями. Прочность при статическом изгибе образцов композита значительно превышает данный показатель для прочих связующих.

4. Установлено, что наименьшую стойкость к температурно-влажностным воздействиям имеют композиты на карбамидоформальдегидном связующем, при том, что начальная прочность при статическом изгибе плит сопоставима на всех четырех видах связующих.

5. Композиты из отходов производства льна и хлопка показали высокую формоустойчивость после циклических испытаний, потеря массы свыше 50 % происходит после 5...6 циклов испытаний.

6. Композиты из отходов хлопка имеют более низкую, чем из отходов льна, прочность при статическом изгибе и большую потерю прочности после циклов испытаний. Закономерность соблюдается как для плит на терморезактивном связующем СФЖ, так и для материалов на неорганических связующих – жидком стекле и алюмохромфосфате.

7. Разработаны регрессионные модели и установлена степень влияния прочности композита при статическом изгибе ( $\sigma_n$ ), разбухания по толщине за 24 часа (h), водопоглощения (W) от доли добавки связующего, от температуры сушки, и от доли добавки отходов древесины, от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя. При использовании комбинированного наполнителя из 50 % мягких древесных отходов и 50 % отходов прядения льняного или хлопкового волокна необходимо увеличить массовую долю связующих до 40 % ввиду увеличения удельной поверхности наполнителя.

Разработанные регрессионные модели позволяют прогнозировать физико-механические показатели композиционных материалов и управлять технологическими параметрами их производства.

## **Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

### **5.1. Анализ зарубежного и отечественного опыта в формировании представлений о свойствах теплоизоляционных материалов**

Для обеспечения требуемых согласно значений коэффициента сопротивления теплопередаче при устройстве ограждающих конструкций необходимо использовать теплоизоляционные материалы, такие как минераловатные плиты, пенополистирол, пенополиуретан и др. [292]. Основными достоинствами полимерных утеплителей и минеральной ваты являются малая плотность (32...200 кг/м<sup>3</sup>) и низкий коэффициент теплопроводности – от 0,019...0,05 Вт/(м·К) (пенопласты) до 0,045...0,07 Вт/(м·К) (минеральная вата). Минеральная вата отвечает требованиям безопасности – слабогорючий материал (группа горючести Г1), пенопласты же относятся к материалам от умеренногорючих (Г2) до сильногорючих (Г4). Вдобавок к этому, пенопласты не являются дешевыми, пенополиуретан имеет низкую стойкость к ультрафиолетовым излучениям, пенополистирол является хрупким и неустойчивым к органическим растворителям.

Один из самых эффективных утеплителей – минеральная вата дорогостояща [210], пылит при изготовлении и монтаже [17], негативно воздействуя на органы дыхания, имеет высокое водопоглощение, дает усадку при эксплуатации [53, 54, 186, 187]. Поэтому весьма актуальными являются вопросы повышения эксплуатационной стойкости минераловатных плит. В этом направлении проводили исследования Ю.Л. Бобров [17], Т.В. Смирнова [138], В.П. Ярцев, А.А. Мамонтов и др. [53, 54, 187, 188]. При определенно

положительных полученных результатах по-прежнему остается актуальной задача разработки новых эффективных теплоизоляционных материалов, устойчивых к воздействию температуры и влажности окружающей среды. И в первую очередь это относится к материалам, выполненным на основе наполнителей растительного происхождения, возобновляемом ресурсе по своей природе [279,197].

Jiř Zach в работе [313] исследовал свойства теплоизоляционных материалов на основе конопли, джута и льна. Разработанные авторами композиционные материалы имеют значение коэффициента теплопроводности в интервале 0,041...0,050 Вт/(м·К) в зависимости от плотности, типа органических волокон и содержания костры. В работе [201] рассмотрены физико-механические и эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов, выполненных из хлопковых отходов, золы и бетона, коэффициент теплопроводности которых составляет от 0,231 до 0,260 Вт/(м·К). Таким образом, теплоизоляционные материалы из растительных отходов имеют большой диапазон значений коэффициента теплопроводности в зависимости от состава и структуры композита.

В России теплоизоляционные материалы в соответствии с требованиями ГОСТ 16381–77 должны обладать теплопроводностью не более 0,175 Вт/(м·К), иметь плотность (объемную массу) не более 500 кг/м<sup>3</sup>, обладать стабильными физико-механическими и теплотехническими свойствами и не выделять токсических веществ и пыли в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации.

Исследованиями процесса теплообмена применительно к новым материалам, в том числе растительного происхождения, занимаются зарубежные [226, 292] и отечественные ученые – Н.И. Ватин, С.В. Федосов, В.Г. Гагарин, В.Н. Куприянов, А.Д. Жуков и др. [24, 163, 155, 30, 31, 85, 134]. Этими и другими исследователями было установлено, что теплообмен (главным образом, его интенсивность и количество переносимой теплоты) зависит от

формы тела, его размеров, химического состава, времени процесса, физических свойств.

### 5.1.1. Условия проведения и методика экспериментальных исследований

В данном разделе представлены результаты определения коэффициента теплопроводности, как одного из основных показателей теплофизических свойств материалов. Коэффициент теплопроводности композиционных материалов на основе растительных отходов (далее – композит) определялся с помощью измерителя теплопроводности ИТП–МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме» [48]. Внешний вид электронного измерителя теплопроводности ИТП–МГ4 представлен на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Электронный измеритель теплопроводности ИТП–МГ4: 1 – блок управления; 2 – электронный блок; 3 – теплоизоляция; 4 – верхняя плита с датчиком температуры; 5 – образец; 6 – установка для нагрева

Сущность метода испытания заключается в создании теплового потока, направленного перпендикулярно к наибольшей стороне образца определенной толщины, измерении плотности стационарного теплового потока и температур на противоположных гранях образца.

Для испытаний изготавливались образцы с размерами  $100 \times 100 \times h$  мм. Высота образцов  $h$  составляла 20...30 мм. Коэффициент теплопроводности определялся на образцах, высушенных до постоянной массы при температуре  $100\text{ }^\circ\text{C}$  согласно методике ГОСТ 7076–99. Перед испытанием образцы выдерживались в помещении лаборатории в течение двух часов. Температура помещения лаборатории составляла  $22\text{ }^\circ\text{C}$ . В установку для нагрева укладывали образец (5). Толщина образца измерялась штангенциркулем в четырех углах на расстоянии 50 мм от вершины угла и посередине каждой стороны. За толщину образца принимают среднее арифметическое значение результатов всех измерений. Проверялось заземление прибора и подключалась тепловая установка к электронному блоку (2) и далее к сети переменного тока напряжением 220 В. Далее на клавиатуре электронного блока вводили высоту образца. После нажатия кнопки «Пуск» начиналось формирование установившегося теплового потока через исследуемый образец. При этом происходило соответствующее понижение температуры «холодной» стороны образца на несколько градусов и соответствующее повышение температуры «теплой» стороны образца также на несколько градусов. Эксперимент по определению коэффициента теплопроводности образца начинался после формирования установившегося теплового режима и продолжался примерно 30...40 минут. По завершении процесса измерения на экране высвечивались величины коэффициента теплопроводности  $\lambda$  образцов композитов.

## 5.2. Результаты эксперимента

В работе экспериментально определен коэффициент теплопроводности композиционных материалов из невозвратных отходов прядения льна и

хлопка, мягких отходов древесины, производимых по технологии мягких древесноволокнистых плит. Результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности образцов композитов представлены в таблицах 5.1, 5.2. Также в таблицах 5.1, 5.2 приведены значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные с использованием математических моделей, представленных в гл. 2. Массовая доля связующего была определена по сухому веществу – массовой доле нелетучих остатков, так как вода, содержащаяся в связующем, испарилась в процессе сушки композита.

Для всех видов композитов значения коэффициента теплопроводности отображают способность эффективно тормозить прохождение тепла через плитный материал. 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.



Таблица 5.1 – Коэффициент теплопроводности двухкомпонентных композиционных материалов

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)				Различие расчетных и экспериментальных данных, %
	наполнителя	связующего	наполнителя	связующего	композиата		
					расчетный	экспериментальный	
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,99	0,01	0,066 0,056	0,400	<u>0,067</u> 0,057	<u>0,064</u> 0,054	<u>4,93</u> 4,68
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,97	0,03			<u>0,069</u> 0,059	<u>0,067</u> 0,056	<u>3,57</u> 4,54
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,95	0,05			<u>0,072</u> 0,061	<u>0,070</u> 0,059	<u>2,35</u> 4,34
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,93	0,07			<u>0,073</u> 0,064	<u>0,071</u> 0,062	<u>4,9</u> 4,16
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,91	0,09			<u>0,075</u> 0,066	<u>0,074</u> 0,064	<u>1,14</u> 4,05
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,88	0,12			<u>0,077</u> 0,070	<u>0,079</u> 0,068	<u>4,49</u> 5,12
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,87	0,13			<u>0,078</u> 0,071	<u>0,080</u> 0,069	<u>4,44</u> 5,06
<u>Хлопок/КФС</u> Лен/КФС	0,84	0,16			<u>0,079</u> 0,073	<u>0,081</u> 0,071	<u>4,21</u> 4,11

Продолжение таблицы 5.1

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)				Различие расчетных и экспериментальных данных, %
			наполнителя	связующего	композиата		
	наполнителя	связующего			расчетный	экспериментальный	
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,98	0,02	0,066 0,056	0,300	<u>0,068</u>	<u>0,066</u>	<u>4,87</u>
					0,058	0,056	4,61
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,96	0,04			<u>0,069</u>	<u>0,067</u>	<u>4,76</u>
					0,060	0,058	4,47
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,94	0,06			<u>0,071</u>	<u>0,069</u>	<u>3,48</u>
					0,062	0,059	4,34
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,93	0,07			<u>0,072</u>	<u>0,070</u>	<u>3,44</u>
					0,063	0,060	4,28
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,91	0,09			<u>0,072</u>	<u>0,072</u>	<u>2,27</u>
					0,065	0,063	4,11
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,89	0,11	<u>0,074</u>	<u>0,074</u>	<u>0</u>		
			0,068	0,065	4,00		
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,87	0,13	<u>0,076</u>	<u>0,077</u>	<u>1,11</u>		
			0,070	0,067	5,26		
<u>Хлопок/ФФС</u> Лен/ФФС	0,84	0,16	<u>0,078</u>	<u>0,079</u>	<u>1,11</u>		
			0,073	0,070	4,28		

Окончание таблицы 5.1

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)				Различие расчетных и экспериментальных данных, %
			наполнителя	связующего	композиата		
	наполнителя	связующего			расчетный	экспериментальный	
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,98	0,02	<u>0,066</u> 0,056	0,500	<u>0,068</u>	<u>0,066</u>	<u>4,87</u>
					0,058	0,056	4,61
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,96	0,04			<u>0,071</u>	<u>0,068</u>	<u>4,76</u>
					0,061	0,058	4,47
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,94	0,06			<u>0,074</u>	<u>0,072</u>	<u>3,48</u>
					0,063	0,060	4,34
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,93	0,07			<u>0,076</u>	<u>0,073</u>	<u>3,44</u>
					0,065	0,062	4,28
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,91	0,09			<u>0,079</u>	<u>0,077</u>	<u>2,27</u>
					0,067	0,064	4,11
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,89	0,11	<u>0,082</u>	<u>0,082</u>	<u>0</u>		
			0,070	0,067	4,00		
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,87	0,13	<u>0,085</u>	<u>0,084</u>	<u>1,11</u>		
			0,073	0,070	5,26		
<u>Хлопок/ЖС</u> Лен/ЖС	0,84	0,16	<u>0,090</u>	<u>0,089</u>	<u>1,11</u>		
			0,078	0,075	4,28		

Таблица 5.2 – Коэффициент теплопроводности трехкомпонентных композиционных материалов

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента			Коэффициент теплопроводности композита, Вт/(м·К)		Различие рас- четных и экс- перименталь- ных данных, %
	наполнителя		связующего	расчетный	экспери- ментальный	
	хлопок, лен	древесина				
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,79	0,2	0,01	<u>0,069</u>	<u>0,066</u>	<u>4,93</u>
Лен + древесина/КФС				0,061	0,058	4,28
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,77	0,2	0,03	<u>0,071</u>	<u>0,068</u>	<u>4,87</u>
Лен + древесина/КФС				0,063	0,060	4,16
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,75	0,2	0,05	<u>0,072</u>	<u>0,070</u>	<u>3,65</u>
Лен + древесина/КФС				0,064	0,062	2,70
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,73	0,2	0,07	<u>0,074</u>	<u>0,071</u>	<u>2,40</u>
Лен + древесина/КФС				0,066	0,064	3,84
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,71	0,2	0,09	<u>0,077</u>	<u>0,076</u>	<u>2,38</u>
Лен + древесина/КФС				0,068	0,066	2,53
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,68	0,2	0,12	<u>0,079</u>	<u>0,078</u>	<u>1,17</u>
Лен + древесина/КФС				0,071	0,069	2,38
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,67	0,2	0,13	<u>0,081</u>	<u>0,076</u>	<u>2,32</u>
Лен + древесина/КФС				0,072	0,071	1,19
<u>Хлопок + древесина/КФС</u>	0,64	0,2	0,16	<u>0,083</u>	<u>0,082</u>	<u>1,14</u>
Лен + древесина/КФС				0,074	0,072	2,32

Окончание таблицы 5.2

Вид наполнителя/ Вид связующего	Массовая доля компонента			Коэффициент теплопроводности композита, Вт/(м·К)		Различие рас- четных и экс- перименталь- ных данных, %
	наполнителя		связующего	расчетный	экспери- ментальный	
	хлопок, лен	древесина				
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,79	0,2	0,01	<u>0,069</u>	<u>0,066</u>	<u>3,79</u>
Лен + древесина/ФФС				0,061	0,058	4,11
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,78	0,2	0,02	<u>0,070</u>	<u>0,067</u>	<u>3,79</u>
Лен + древесина/ФФС				0,061	0,059	2,77
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,76	0,2	0,04	<u>0,072</u>	<u>0,069</u>	<u>3,75</u>
Лен + древесина/ФФС				0,063	0,061	2,74
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,74	0,2	0,06	<u>0,073</u>	<u>0,071</u>	<u>3,75</u>
Лен + древесина/ФФС				0,064	0,062	2,74
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,73	0,2	0,07	<u>0,074</u>	<u>0,072</u>	<u>2,53</u>
Лен + древесина/ФФС				0,066	0,064	2,70
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,71	0,2	0,09	<u>0,075</u>	<u>0,073</u>	<u>2,50</u>
Лен + древесина/ФФС				0,068	0,067	2,70
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,69	0,2	0,11	<u>0,077</u>	<u>0,075</u>	<u>3,65</u>
Лен + древесина/ФФС				0,071	0,069	2,70
<u>Хлопок + древесина/ФФС</u>	0,67	0,2	0,13	<u>0,079</u>	<u>0,077</u>	<u>3,65</u>
Лен + древесина/ФФС				0,073	0,071	2,66

### **5.3. Исследование влияние влагосодержания на размерную стабильность и коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов из отходов производства хлопковых и льняных волокон**

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.

Оценивалась теплопроводность и размерная стабильность композиционных плит после обработки паром при температуре  $(98 \pm 2)^\circ\text{C}$  от 30 минут до трех часов с интервалом в 30 минут.

Для обработки паром образцы в вертикальном положении помещались на решетку над паровой баней, пропаривались, после чего определялись влагопоглощение по массе  $W_{\text{п}}$ , %, коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К) и относительное изменение параметров – коэффициента теплопроводности  $\Delta_{\lambda}$ , % и толщины материала  $\Delta_{\text{п}}$ , %. Значение коэффициента теплопроводности материала определялось с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076–99 [48]. Для контроля испытывались образцы древесно-стружечной плиты (ДСтП) и плиты из минеральной ваты.

Результаты определения параметров материалов после обработки паром представлены в таблице 5.3.

В начале испытаний композиты и минераловатные плиты имели сопоставимые значения влагопоглощения, древесно-стружечные плиты на фенольном связующем поглотили влаги в два раза меньше (в сравнении с остальными плитными материалами).

Таблица 5.3 – Результаты определения показателей материала\* после обработки паром

Вид композита, время обработки, ч	Влагопоглощение $W_{п}$ , %	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Изменение коэффициента теплопроводности $\Delta\lambda$ , %	Разбухание по толщине $\Delta_n$ , %
Контрольные образцы без обработки паром:				
- без связующего		0,06/0,056		
- на КФС		0,088/0,076		
- на ФФС		0,084/0,073		
- на ЖС		0,090/0,078		
- на АХФ		0,090/0,078		
ДСтП		0,131		
Минеральная вата		0,048		
Образцы после обработки 0,5 ч				
- без связующего	14,3/17,8	0,099/0,098	65/75	3,3/3,1
- на КФС	15,5/16,8	0,121/0,116	41/93	1,3/1,5
- на ФФС	14,9/16,1	0,117/0,114	40/86	1,4/1,5
- на ЖС	13,4/16,0	0,116/0,114	42/86	1,4/1,9
- на АХФ	13,2/15,8	0,116/0,113	42/88	1,8/2,6
ДСтП	8,0	0,145	11	5,0
Минеральная вата	15,3	0,208	333	2,7
Образцы после обработки 1 ч				
- без связующего	20,4/25,8	0,139/0,115	131/105	6,6/6,1
- на КФС	23,9/25,8	0,156/0,132	81/120	3,6/3,4
- на ФФС	22,6/24,4	0,147/0,128	71/109	3,2/3,4

Продолжение таблицы 5.3

Вид композита, время обработки, ч	Влагопоглощение $W_{п}$ , %	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Изменение коэффициента теплопроводности $\Delta\lambda$ , %	Разбухание по толщине $\Delta_n$ , %
- на ЖС	19,3/24,0	0,147/0,127	75/108	3,2/3,4
- на АХФ	18,4/23,7	0,146/0,125	76/108	3,2/4,1
ДСтП	22,4	0,152	16	15,2
Минеральная вата	31,7	0,364	658	13,5
Образцы после обработки 1,5 ч				
- без связующего	25,0/30,0	0,144/0,132	140/135	9,6/9,1
- на КФС	26,3/29,5	0,164/0,151	91/152	6,9/5,6
- на ФФС	26,1/26,5	0,156/0,148	81/142	6,3/5,4
- на ЖС	23,9/25,8	0,151/0,146	80/139	5,9/5,3
- на АХФ	23,1/24,9	0,150/0,143	80/138	6,2/5,7
ДСтП	35,3	0,198	51	30,6
Минеральная вата	42,8	0,520	983	25,1
Образцы после обработки 2 ч				
- без связующего	41,3/50,2	0,182/0,147	203/162	11,8/11,3
- на КФС	44,6/46,3	0,212/0,195	146/225	8,6/7,2
- на ФФС	42,2/43,8	0,211/0,194	145/218	8,2/7,1
- на ЖС	41,1/41,9	0,209/0,192	149/215	8,5/7,3
- на АХФ	40,2/40,7	0,205/0,190	147/216	8,7/7,6
ДСтП	57,5	0,274	109	59,1
Минеральная вата	56,3	0,637	1227	48,5
Образцы после обработки 2,5 ч				



Окончание таблицы 5.3

Вид композита, время обработки, ч	Влагопоглощение $W_p$ , %	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Изменение коэффициента теплопроводности $\Delta_\lambda$ , %	Разбухание по толщине $\Delta_n$ , %
- без связующего	57,0/68,0	0,199/0,198	231/235	14,5/14,1
- на КФС	60,5/63,4	0,231/0,216	168/260	12,2/11,3
- на ФФС	59,4/62,6	0,229/0,213	166/249	12,4/11,6
- на ЖС	56,3/61,4	0,226/0,211	169/246	12,7/11,8
- на АХФ	68,0/59,7	0,224/0,208	170/247	12,8/11,9
ДСтП	79,1	0,394	200	108,7
Минеральная вата	70,2	0,798	1562	83,3
Образцы после обработки 3 ч				
- без связующего	75,5/80,4	0,260/0,250	333/346	16,5/16,3
- на КФС	78,9/80,4	0,249/0,246	189/310	15,1/13,5
- на ФФС	75,4/78,8	0,246/0,245	186/302	15,3/13,8
- на ЖС	66,2/75,6	0,243/0,241	189/295	15,2/13,6
- на АХФ	63,4/75,5	0,241/0,240	190/300	15,4/13,8
ДСтП	92,5	0,498	280	156
Минеральная вата	101,3	1,076	2141	153,4

\*над чертой значения показателя для плит из хлопка, под чертой из льна

При этом максимальную стабильность толщины после пропаривания показали композиты на термореактивных и неорганических связующих, а минимальное изменение коэффициента теплопроводности – ДСтП.

После трехчасовой обработки паром лучшую стабильность толщины показали образцы всех композитов (как без связующего, так и со всеми видами связующих). Образцы минераловатных плит полностью деструктурировали, коэффициент теплопроводности вырос более чем в 22 раза. Зависимости разбухания по толщине и коэффициента теплопроводности материала от влагопоглощения представлены на рисунках 5.2, 5.3.

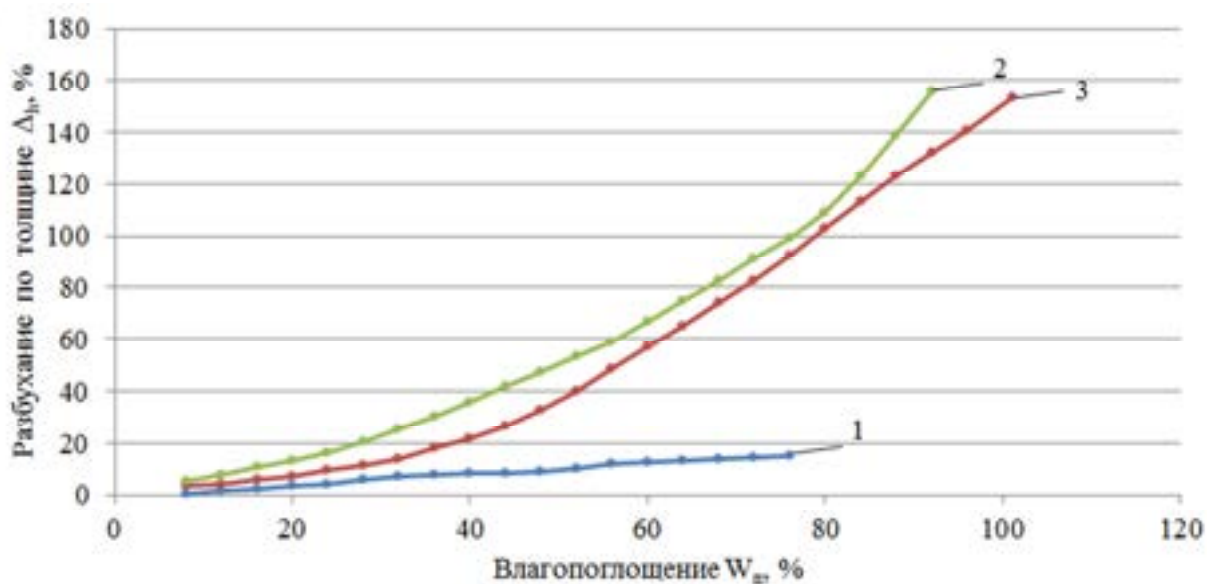


Рисунок 5.2 – Зависимости разбухания плит по толщине  $\Delta_h$  от влагопоглощения: 1 – композиты из хлопка на ФФС; 2 – ДСтП на ФФС; 3 – минеральная вата

Увлажнение теплоизоляционного материала, т.е. замещение содержащегося в его порах воздуха водой, имеющей коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,5$  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.

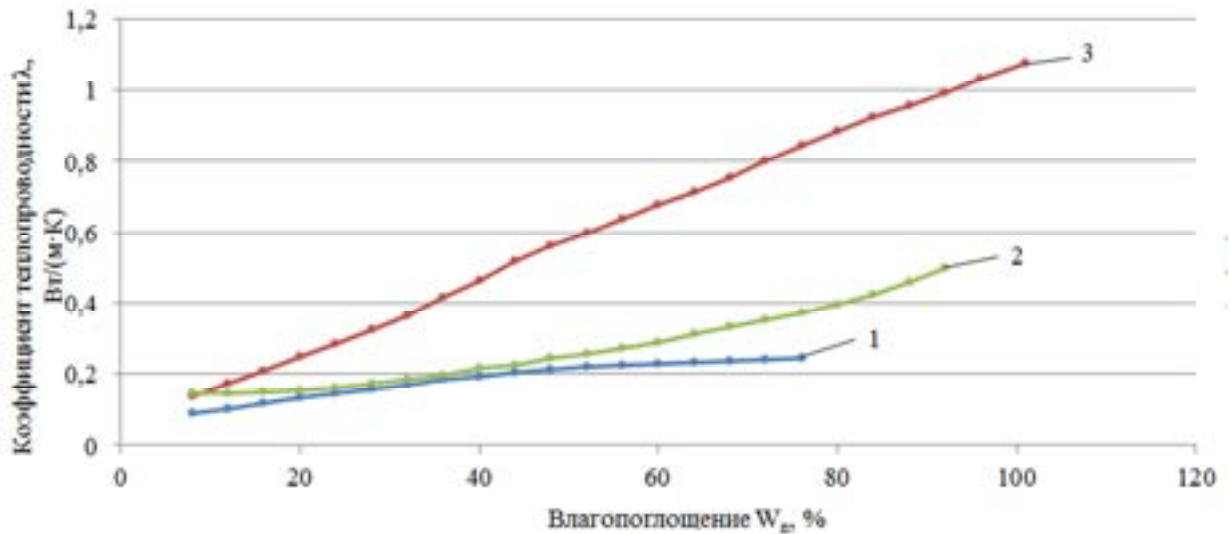


Рисунок 5.3 – Зависимости коэффициента теплопроводности плит от влагопоглощения: 1 – композиты из хлопка на ФФС; 2 – ДСтП на ФФС; 3 – минеральная вата

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.

К критериям выбора теплоизоляционного материала необходимо отнести не только значение коэффициента теплопроводности, но и его изменение при увеличении влагосодержания, а также стабильность геометрических размеров при изменении влажности. В лабораторных условиях возможна экстремальная оценка стабильности эксплуатационных показателей теплоизоляционных плит при воздействии пара при температуре  $(98 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

Таким образом, из испытанных теплоизоляционных материалов наилучшую размерную стабильность и устойчивость коэффициента теплопроводности при длительной термовлагообработке показали плиты из отходов прядения хлопковых и льняных волокон на основе матрицы из синтетических термореактивных или неорганических связующих.

## 5.4. Разработка математических моделей зависимости теплопроводности от структуры и технологических параметров производства композита

### 5.4.1. Модели для композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем

Композиционный материал изготавливался средней плотности  $275 \text{ кг/м}^3$ . В качестве матрицы использованы синтетические и неорганические связующие, расход КФС варьировался на трёх уровнях – 0, 20 и 40 % от массы наполнителя. Образцы материала сушились при температуре, °С – 100, 135 и 170.

С помощью дисперсионного анализа были выявлены факторы, значительно влияющие на теплофизические показатели композиционных плит.

Для оценки области значений показателей композитов было решено использовать метод регрессионного анализа, в частности – В-план второго порядка. План второго порядка дает возможность численно оценить влияние варьируемых технологических факторов процесса производства на теплофизические показатели композита.

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Таблица 5.4 – Диапазоны, уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение фактора		Уровни варьирования			Интервал варьирования, $\Delta_i$
	Натуральное	Кодированное	-1	0	+1	
Доля добавки связующего, %	$P_{св}$	$X_1$	0	20	40	20
Температура сушки, °С	$T_{суш}$	$X_2$	100	135	170	35
Доля добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя	$D_{др}$	$X_3$	0	25	50	25

Таблица 5.5 – План эксперимента в натуральном обозначении факторов

№	$P_{св}, \%$	$T_{суш}, ^\circ C$	$D_{др}, \%$
1	40	170	50
2	0	170	50
3	40	100	50
4	0	100	50
5	40	170	0
6	0	170	0
7	40	135	0
8	0	100	0
9	40	135	25
10	0	135	25
11	20	170	25
12	20	100	25
13	20	135	50
14	20	135	0

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.6.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

$$\lambda = 0,070 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.1)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00006 + 0,00009 + 0,00007 + 0,00005 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00008 + 0,00009 + 0,00004 + 0,00004) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

Таблица 5.6 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,077	0,081	0,055	0,062	0,071	0,071	0,065	0,072	0,073	0,063	0,069	6·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,060	0,073	0,07	0,073	0,058	0,049	0,07	0,063	0,079	0,075	0,067	9·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,061	0,08	0,07	0,062	0,081	0,063	0,07	0,072	0,085	0,076	0,072	7·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,08	0,079	0,071	0,07	0,069	0,059	0,071	0,07	0,062	0,059	0,069	5·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,06	0,61	0,063	0,06	0,072	0,071	0,06	0,07	0,062	0,071	0,067	3·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,059	0,061	0,053	0,064	0,06	0,045	0,059	0,068	0,066	0,06	0,060	3·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,056	0,076	0,072	0,073	0,064	0,064	0,071	0,072	0,072	0,07	0,069	4·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,066	0,074	0,63	0,061	0,06	0,065	0,062	0,065	0,059	0,55	0,063	3·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,064	0,077	0,063	0,071	0,074	0,069	0,07	0,072	0,085	0,075	0,072	4·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,066	0,074	0,065	0,063	0,062	0,066	0,064	0,067	0,056	0,057	0,064	3·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,062	0,065	0,054	0,055	0,074	0,082	0,073	0,071	0,07	0,074	0,068	8·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,065	0,064	0,065	0,062	0,092	0,084	0,071	0,073	0,074	0,07	0,072	9·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,077	0,081	0,067	0,072	0,068	0,075	0,063	0,066	0,065	0,066	0,07	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,072	0,068	0,079	0,071	0,065	0,074	0,06	0,067	0,061	0,063	0,068	4·10 <sup>-5</sup>

$$\lambda = 0,070 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.2)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,069	0,07
2	-	+	+	0,067	0,066
3	+	-	+	0,072	0,072
4	-	-	+	0,069	0,068
5	+	+	-	0,067	0,068
6	-	+	-	0,060	0,06
7	+	-	-	0,069	0,07
8	-	-	-	0,063	0,062
9	+	0	0	0,072	0,071
10	-	0	0	0,064	0,065
11	0	+	0	0,068	0,069
12	0	-	0	0,072	0,071
13	0	0	+	0,07	0,071
14	0	0	-	0,068	0,067

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,069 - 0,07)^2 + (0,067 - 0,066)^2 + (0,072 - 0,072)^2 + (0,069 - 0,068)^2 + (0,067 - 0,068)^2 + (0,060 - 0,060)^2 + (0,069 - 0,07)^2 + (0,063 - 0,062)^2 + (0,072 - 0,071)^2 + (0,064 - 0,065)^2 + (0,068 - 0,069)^2 + (0,072 - 0,071)^2 + (0,07 - 0,071)^2 + (0,068 - 0,067)^2) / 7 = 0,00001$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,2 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ао}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.



$$\lambda = 0,06494 + 0,0004 P_{\text{св}} - 0,000007 T_{\text{суш}} + 0,00012 D_{\text{др}} - 0,000005 P_{\text{св}}^2 - 0,0000016 D_{\text{др}}^2 - 0,000002 P_{\text{св}} D_{\text{др}}. \quad (5.3)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.4 – 5.6.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

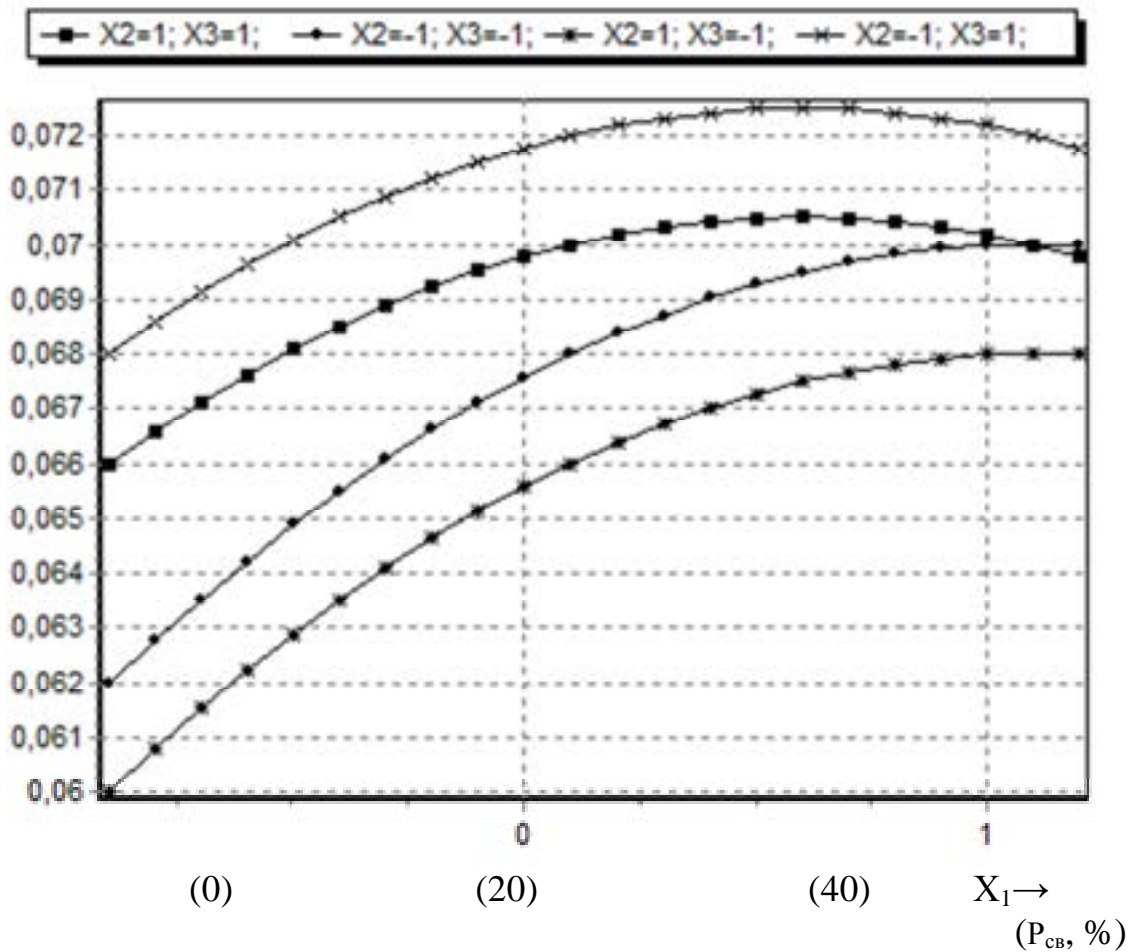


Рисунок 5.4 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

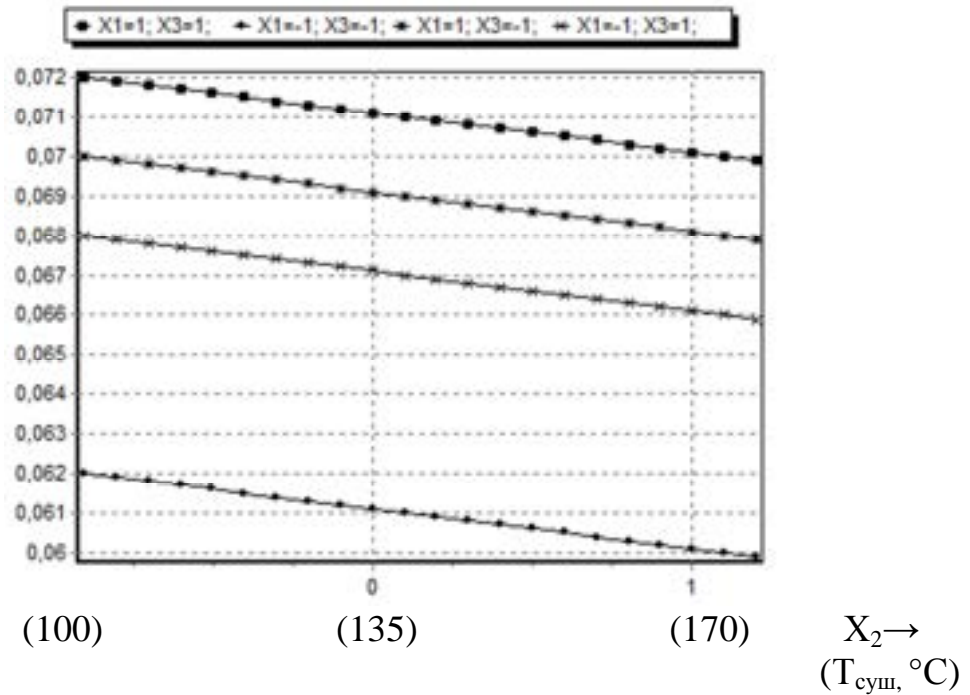


Рисунок 5.5 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

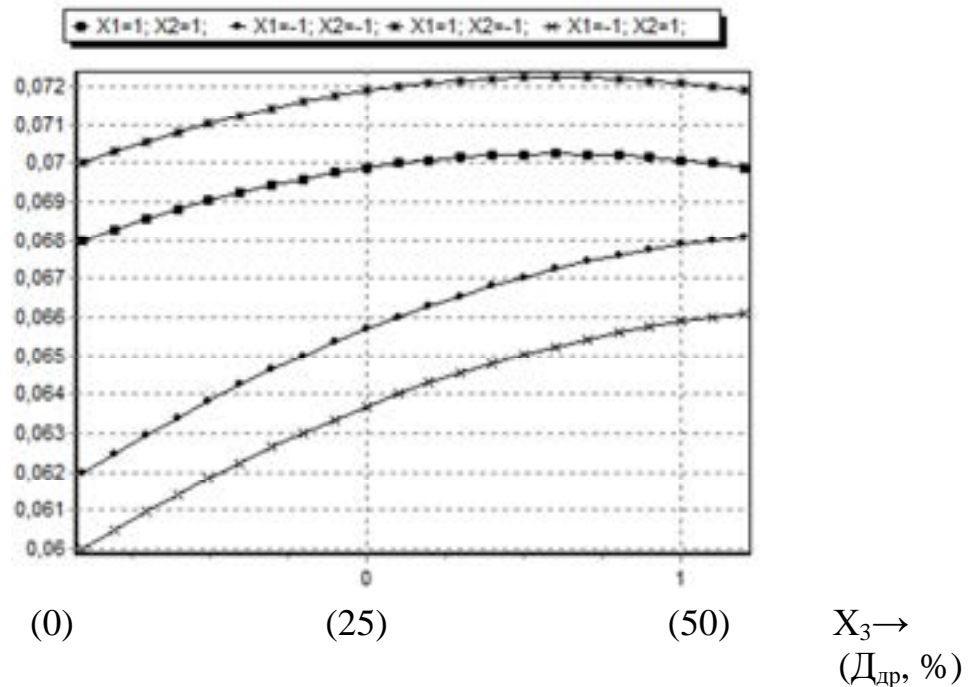


Рисунок 5.6 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

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 карбамидо-

формальдегидном связующем с комбинированным наполнителем из мягких отходов древесины и невозвратных отходов прядения льна.

#### **5.4.2. Модели для композита из отходов льна на фенолформальдегидном связующем**

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.8.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

$$\lambda = 0,067 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.4)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00006 + 0,00009 + 0,00007 + 0,00005 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00008 + 0,00009 + 0,00004 + 0,00004) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,067 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.5)$$

Таблица 5.8 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,060	0,073	0,07	0,073	0,058	0,049	0,07	0,063	0,079	0,075	0,067	9·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,065	0,06	0,069	0,068	0,07	0,058	0,057	0,065	0,074	0,064	0,065	3·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,077	0,081	0,067	0,072	0,068	0,075	0,063	0,066	0,065	0,066	0,070	4·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,066	0,061	0,069	0,068	0,073	0,059	0,057	0,066	0,077	0,064	0,066	4·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,060	0,077	0,064	0,057	0,055	0,073	0,068	0,069	0,061	0,066	0,065	5·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,058	0,053	0,061	0,060	0,065	0,048	0,049	0,056	0,068	0,052	0,057	4·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,06	0,61	0,063	0,06	0,072	0,071	0,06	0,07	0,062	0,071	0,067	3·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,059	0,061	0,053	0,064	0,06	0,045	0,059	0,068	0,066	0,06	0,060	3·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,075	0,063	0,066	0,065	0,066	0,077	0,081	0,067	0,072	0,068	0,070	4·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,062	0,057	0,065	0,064	0,069	0,048	0,053	0,060	0,076	0,056	0,061	7·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,064	0,059	0,067	0,066	0,072	0,060	0,054	0,062	0,088	0,068	0,066	9·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,077	0,081	0,055	0,062	0,071	0,071	0,065	0,072	0,073	0,063	0,069	6·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,062	0,065	0,054	0,055	0,074	0,082	0,073	0,071	0,07	0,074	0,068	8·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,063	0,059	0,065	0,065	0,071	0,060	0,062	0,061	0,077	0,067	0,065	3·10 <sup>-5</sup>

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,067	0,067
2	-	+	+	0,065	0,063
3	+	-	+	0,070	0,069
4	-	-	+	0,066	0,065
5	+	+	-	0,065	0,065
6	-	+	-	0,057	0,057
7	+	-	-	0,067	0,067
8	-	-	-	0,060	0,059
9	+	0	0	0,070	0,070
10	-	0	0	0,061	0,064
11	0	+	0	0,066	0,066
12	0	-	0	0,069	0,068
13	0	0	+	0,068	0,068
14	0	0	-	0,065	0,064

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,067 - 0,067)^2 + (0,065 - 0,063)^2 + (0,070 - 0,069)^2 + (0,066 - 0,065)^2 + (0,065 - 0,065)^2 + (0,057 - 0,057)^2 + (0,067 - 0,067)^2 + (0,060 - 0,059)^2 + (0,070 - 0,070)^2 + (0,061 - 0,064)^2 + (0,066 - 0,066)^2 + (0,069 - 0,068)^2 + (0,068 - 0,068)^2 + (0,065 - 0,064)^2) / 7 = 0,00002$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,4 < F_T = 3,23$  — дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,06194 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{сущ} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.6)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.7 – 5.9.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

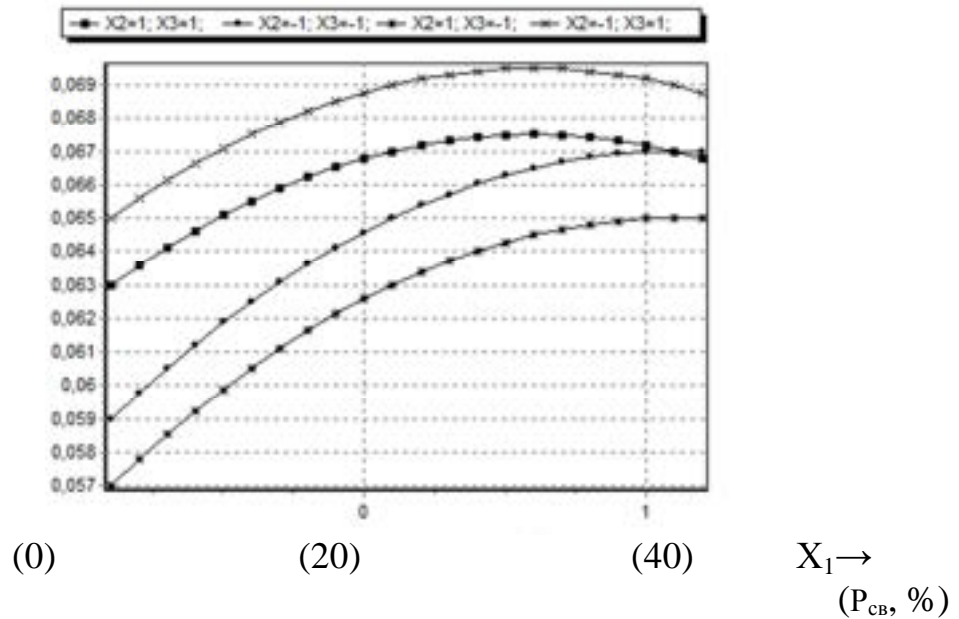


Рисунок 5.7 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

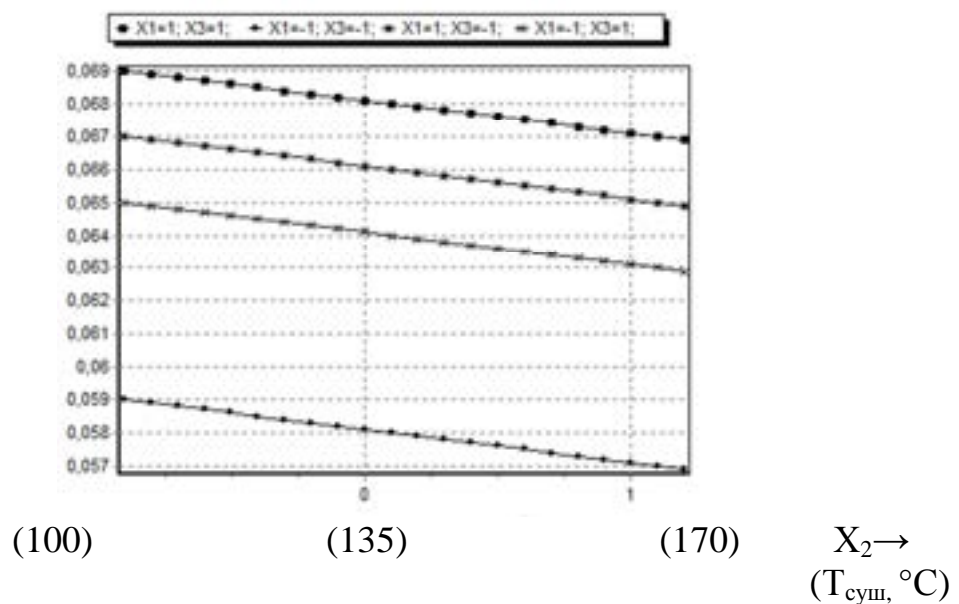


Рисунок 5.8 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

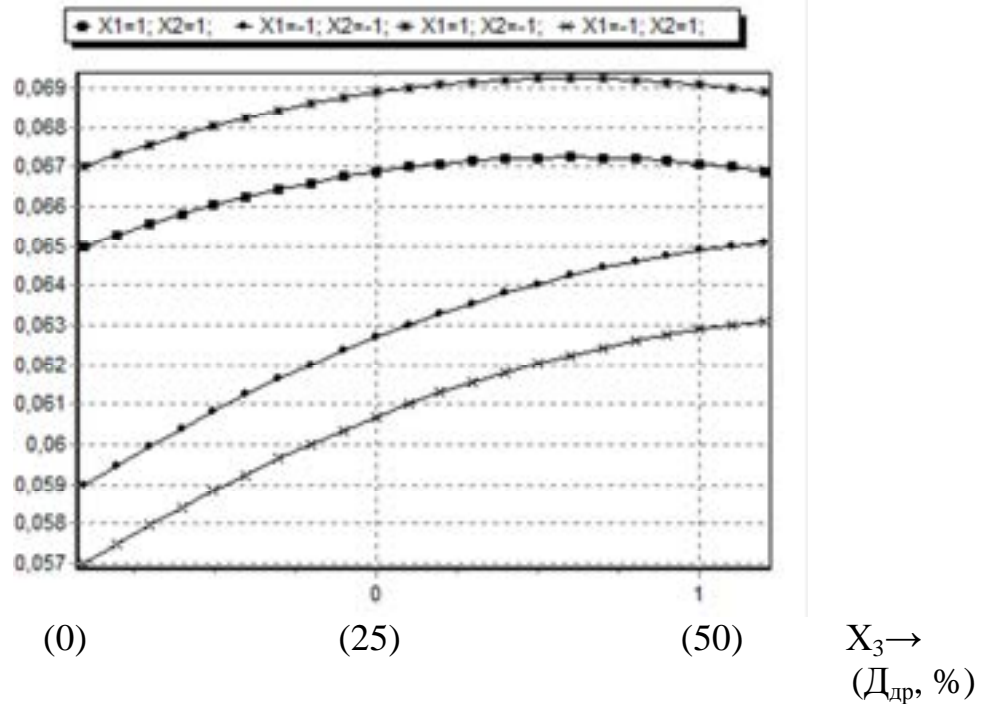


Рисунок 5.9 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.7 – 5.9 видно, что они аналогичны графикам модели композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

### 5.4.3. Модели для композита из отходов льна на основе жидкого стекла

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.10.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:



Таблица 5.10 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,074	0,070	0,076	0,076	0,082	0,071	0,073	0,072	0,088	0,078	0,076	3·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,075	0,085	0,068	0,069	0,067	0,078	0,072	0,071	0,065	0,070	0,072	4·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,064	0,074	0,075	0,083	0,088	0,072	0,076	0,075	0,096	0,087	0,079	9·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,081	0,088	0,071	0,070	0,066	0,082	0,077	0,069	0,058	0,068	0,073	8·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,068	0,061	0,069	0,077	0,082	0,069	0,070	0,071	0,082	0,081	0,073	5·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,060	0,061	0,059	0,069	0,076	0,061	0,062	0,063	0,070	0,069	0,065	3·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,068	0,71	0,069	0,067	0,088	0,071	0,072	0,073	0,090	0,081	0,075	7·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,066	0,069	0,062	0,062	0,079	0,064	0,065	0,066	0,072	0,075	0,068	3·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,085	0,086	0,076	0,075	0,074	0,089	0,072	0,068	0,079	0,076	0,078	4·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,067	0,070	0,059	0,063	0,080	0,065	0,066	0,067	0,076	0,077	0,069	4·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,072	0,075	0,058	0,061	0,085	0,075	0,071	0,072	0,084	0,087	0,074	9·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,075	0,078	0,068	0,064	0,088	0,078	0,074	0,075	0,084	0,086	0,077	6·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,085	0,077	0,067	0,068	0,082	0,077	0,073	0,074	0,083	0,074	0,076	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,071	0,074	0,068	0,065	0,079	0,074	0,069	0,071	0,080	0,079	0,073	3·10 <sup>-5</sup>

$$\lambda = 0,075 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.7)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00003 + 0,00004 + 0,00009 + 0,00008 + 0,00005 + 0,00003 + 0,00007 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00004 + 0,00009 + 0,00006 + 0,00004 + 0,00003) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,075 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.8)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,076	0,075
2	-	+	+	0,072	0,071
3	+	-	+	0,079	0,077
4	-	-	+	0,073	0,073
5	+	+	-	0,073	0,073
6	-	+	-	0,065	0,065
7	+	-	-	0,075	0,075
8	-	-	-	0,068	0,067
9	+	0	0	0,078	0,076
10	-	0	0	0,069	0,070
11	0	+	0	0,074	0,074
12	0	-	0	0,077	0,076
13	0	0	+	0,076	0,076
14	0	0	-	0,073	0,072

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,076 - 0,075)^2 + (0,072 - 0,071)^2 + (0,079 - 0,077)^2 + (0,073 - 0,073)^2 + (0,073 - 0,073)^2 + (0,065 - 0,065)^2 + (0,075 - 0,075)^2 + (0,068 - 0,067)^2 + (0,078 - 0,076)^2 + (0,069 - 0,070)^2 + (0,074 - 0,074)^2 + (0,077 - 0,076)^2 + (0,076 - 0,076)^2 + (0,073 - 0,072)^2) / 7 = 0,00002$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,4 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,06994 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{суш} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.9)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.10 – 5.12.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

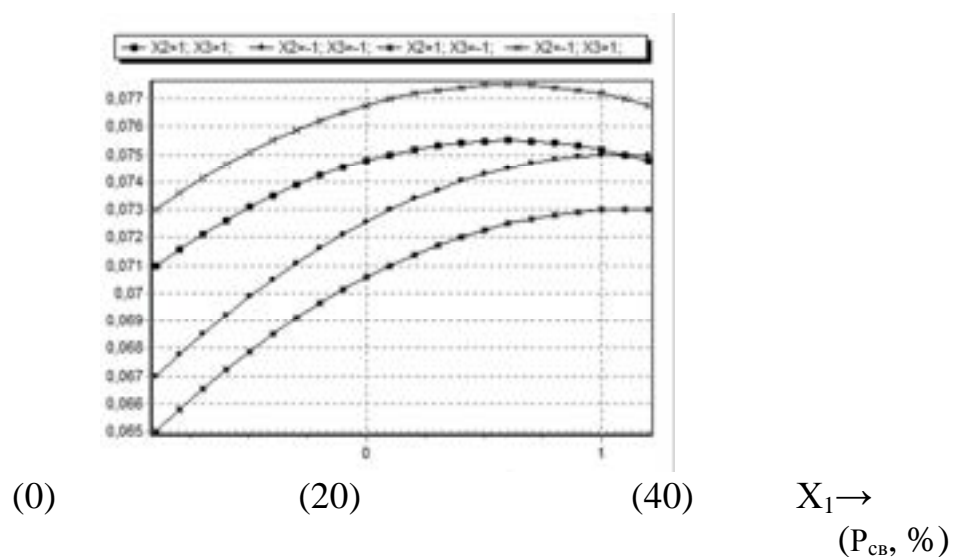


Рисунок 5.10 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

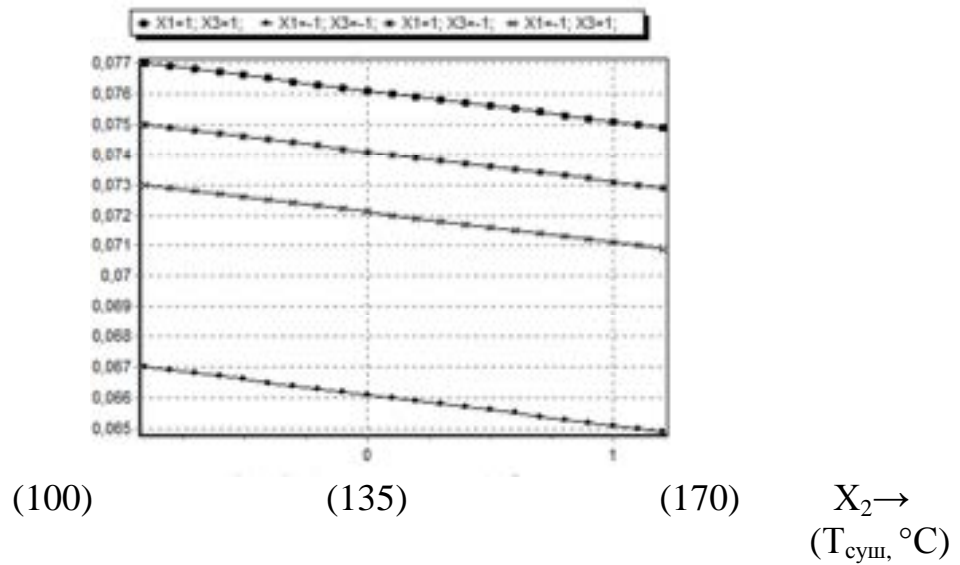


Рисунок 5.11 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

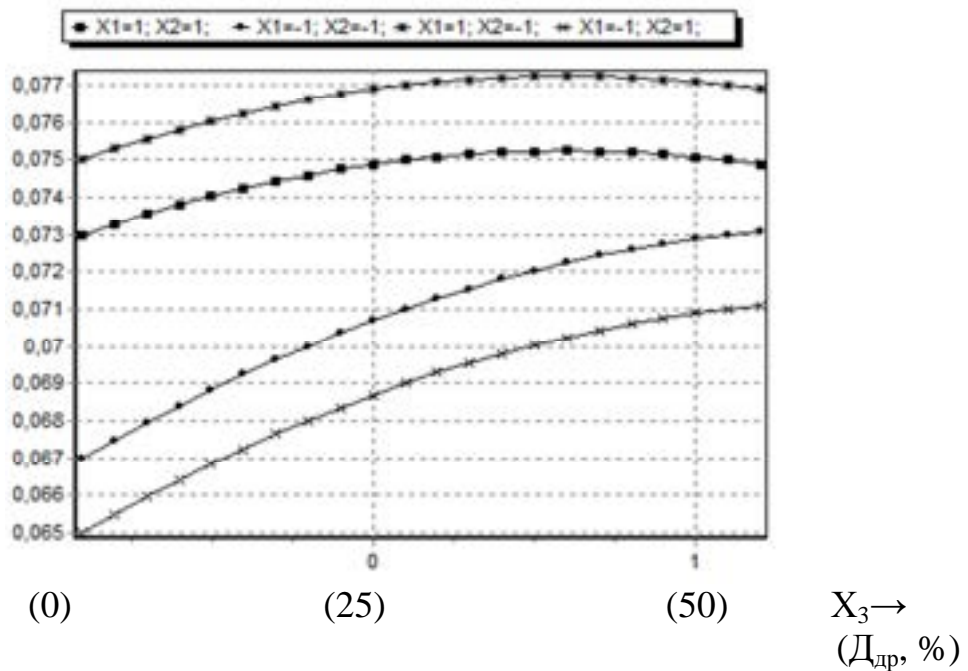


Рисунок 5.12 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.10 – 5.12 видно, что они аналогичны графикам модели композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

#### 5.4.4. Модели для композита из отходов льна на алюмохромфосфатном связующем

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.12.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

$$\lambda = 0,077 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.10)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00003 + 0,00004 + 0,00009 + 0,00008 + 0,00005 + 0,00003 + 0,00007 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00004 + 0,00009 + 0,00006 + 0,00004 + 0,00003) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,077 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.11)$$

Таблица 5.12 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,075	0,081	0,067	0,069	0,083	0,078	0,073	0,076	0,086	0,082	0,077	4·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,080	0,074	0,071	0,082	0,076	0,081	0,067	0,067	0,079	0,073	0,075	3·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,086	0,085	0,068	0,070	0,087	0,085	0,088	0,071	0,089	0,091	0,082	8·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,078	0,079	0,063	0,071	0,080	0,078	0,063	0,081	0,084	0,073	0,075	5·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,068	0,061	0,069	0,074	0,082	0,067	0,070	0,082	0,086	0,081	0,074	7·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,061	0,061	0,062	0,067	0,075	0,060	0,063	0,070	0,077	0,074	0,067	4·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,083	0,085	0,080	0,073	0,071	0,085	0,077	0,072	0,073	0,071	0,077	3·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,063	0,066	0,065	0,077	0,076	0,064	0,067	0,073	0,074	0,075	0,070	3·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,074	0,073	0,071	0,087	0,086	0,065	0,077	0,090	0,084	0,093	0,080	9·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,062	0,066	0,064	0,078	0,077	0,066	0,068	0,078	0,075	0,076	0,071	4·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,064	0,071	0,067	0,083	0,081	0,071	0,073	0,086	0,080	0,083	0,076	6·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,062	0,074	0,070	0,086	0,085	0,074	0,076	0,089	0,083	0,091	0,079	9·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,073	0,067	0,085	0,072	0,073	0,084	0,085	0,075	0,084	0,082	0,078	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,068	0,070	0,069	0,080	0,079	0,070	0,072	0,082	0,079	0,081	0,075	3·10 <sup>-5</sup>

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,077	0,077
2	-	+	+	0,075	0,073
3	+	-	+	0,082	0,079
4	-	-	+	0,075	0,075
5	+	+	-	0,074	0,075
6	-	+	-	0,067	0,067
7	+	-	-	0,077	0,077
8	-	-	-	0,070	0,069
9	+	0	0	0,080	0,078
10	-	0	0	0,071	0,072
11	0	+	0	0,076	0,076
12	0	-	0	0,079	0,078
13	0	0	+	0,078	0,078
14	0	0	-	0,075	0,074

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,077 - 0,077)^2 + (0,075 - 0,073)^2 + (0,082 - 0,079)^2 + (0,075 - 0,075)^2 + (0,074 - 0,075)^2 + (0,067 - 0,067)^2 + (0,077 - 0,077)^2 + (0,070 - 0,069)^2 + (0,080 - 0,078)^2 + (0,071 - 0,072)^2 + (0,076 - 0,076)^2 + (0,079 - 0,078)^2 + (0,078 - 0,078)^2 + (0,075 - 0,074)^2) / 7 = 0,00003$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,6 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,07194 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{сущ} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.12)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.13 – 5.15.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

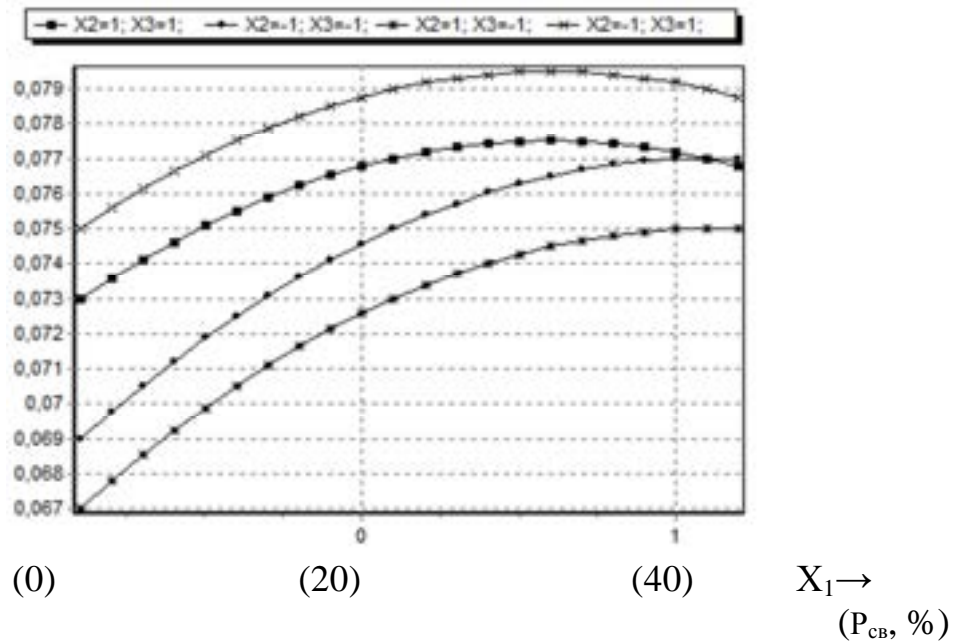


Рисунок 5.13 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

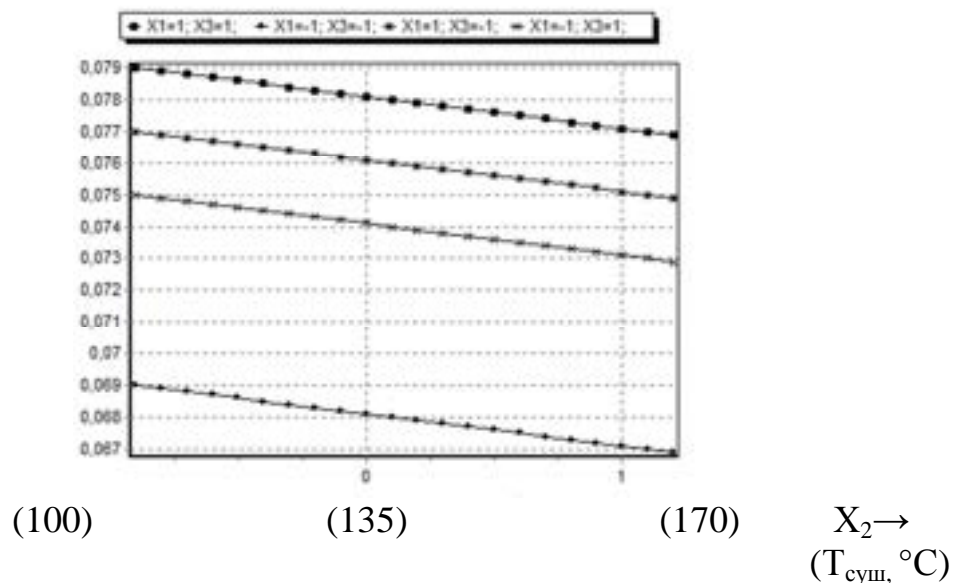


Рисунок 5.14 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки



$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

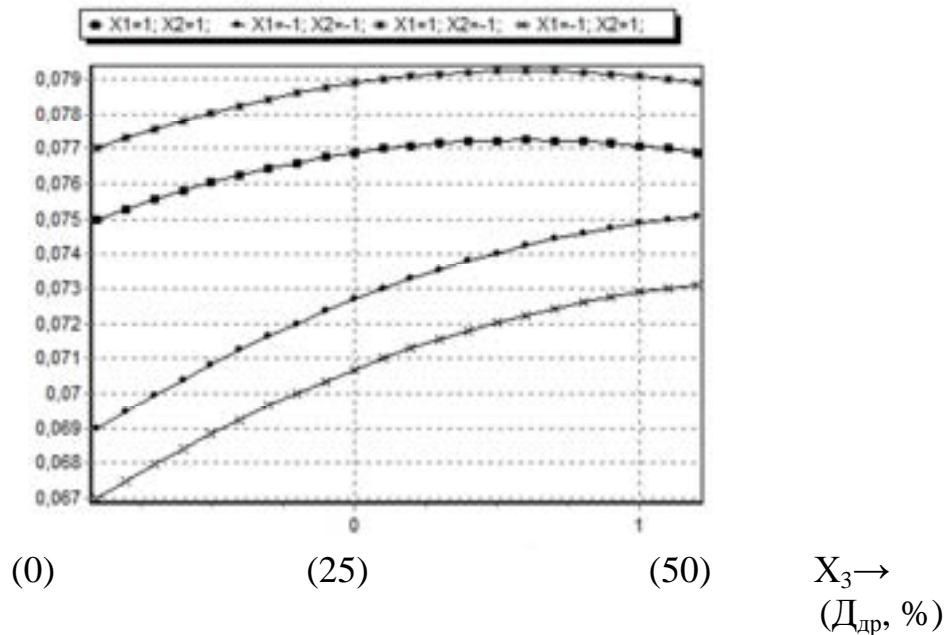


Рисунок 5.15 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.13 – 5.15 видно, что они аналогичны графикам модели композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

#### 5.4.5. Модели для композита из отходов хлопка на карбамидоформальдегидном связующем

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.14.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

$$\lambda = 0,088 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 -$$

$$- 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.13)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00008 + 0,00007 + 0,00005 + 0,00006 + 0,00004 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00009 + 0,00004 + 0,00004) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,088 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.14)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.15.

Таблица 5.14 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,081	0,094	0,091	0,094	0,079	0,070	0,091	0,084	0,099	0,097	0,088	8·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,09	0,081	0,089	0,090	0,079	0,068	0,089	0,082	0,097	0,095	0,086	7·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,086	0,095	0,094	0,095	0,084	0,077	0,094	0,087	0,099	0,099	0,091	5·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,081	0,090	0,089	0,090	0,075	0,074	0,092	0,087	0,094	0,098	0,087	6·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,080	0,089	0,088	0,089	0,074	0,078	0,091	0,086	0,093	0,092	0,086	4·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,072	0,081	0,080	0,081	0,066	0,070	0,083	0,078	0,085	0,084	0,078	4·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,090	0,092	0,091	0,078	0,091	0,093	0,080	0,095	0,088	0,092	0,088	3·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,075	0,084	0,083	0,085	0,072	0,073	0,085	0,081	0,084	0,088	0,081	3·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,094	0,098	0,091	0,097	0,081	0,082	0,095	0,093	0,094	0,085	0,091	4·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,075	0,084	0,083	0,086	0,076	0,073	0,086	0,083	0,088	0,086	0,082	3·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,080	0,089	0,088	0,091	0,081	0,078	0,091	0,088	0,093	0,091	0,087	3·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,075	0,092	0,095	0,094	0,079	0,076	0,098	0,096	0,098	0,097	0,090	9·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,080	0,091	0,091	0,093	0,081	0,080	0,092	0,095	0,094	0,093	0,089	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,077	0,088	0,089	0,090	0,077	0,077	0,089	0,092	0,091	0,090	0,086	4·10 <sup>-5</sup>

Таблица 5.15 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,088	0,088
2	-	+	+	0,086	0,084
3	+	-	+	0,091	0,090
4	-	-	+	0,087	0,086
5	+	+	-	0,086	0,086
6	-	+	-	0,078	0,078
7	+	-	-	0,088	0,088
8	-	-	-	0,081	0,080
9	+	0	0	0,091	0,089
10	-	0	0	0,082	0,083
11	0	+	0	0,087	0,087
12	0	-	0	0,090	0,089
13	0	0	+	0,089	0,089
14	0	0	-	0,086	0,085

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,088 - 0,088)^2 + (0,086 - 0,084)^2 + (0,091 - 0,090)^2 + (0,087 - 0,086)^2 + (0,086 - 0,086)^2 + (0,078 - 0,078)^2 + (0,088 - 0,088)^2 + (0,081 - 0,080)^2 + (0,091 - 0,089)^2 + (0,082 - 0,083)^2 + (0,087 - 0,087)^2 + (0,090 - 0,089)^2 + (0,089 - 0,089)^2 + (0,086 - 0,085)^2) / 7 = 0,00002$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,4 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,08294 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{сущ} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.15)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от

температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.16 – 5.18.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

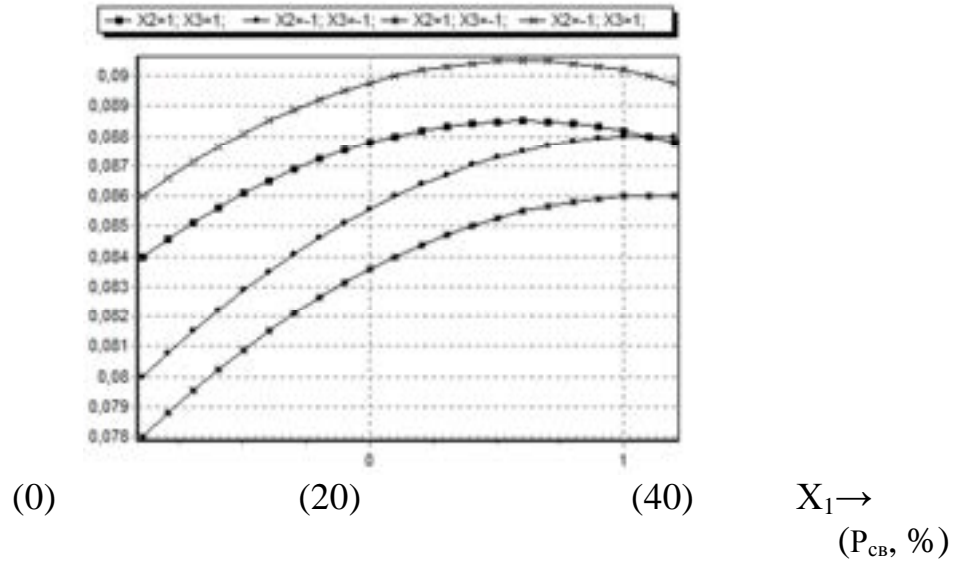


Рисунок 5.16 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

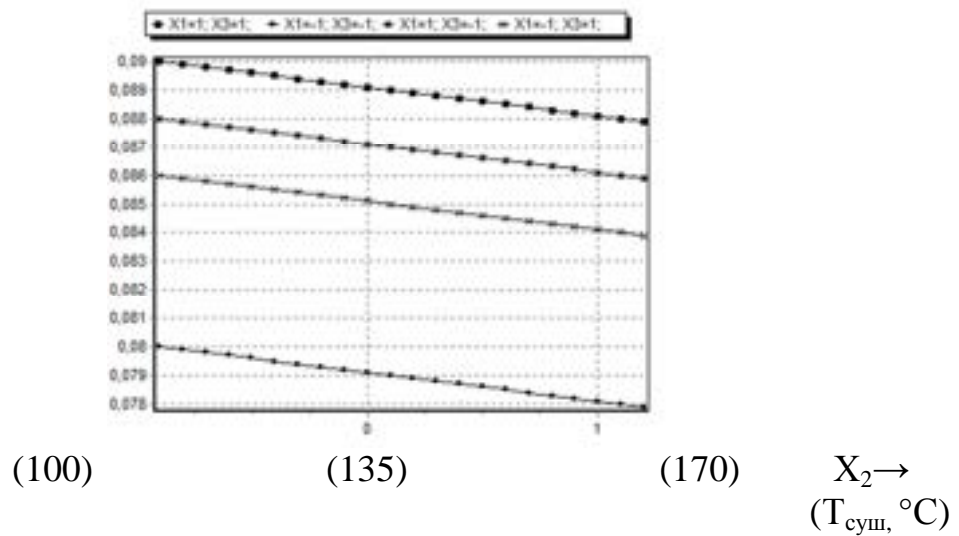


Рисунок 5.17 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

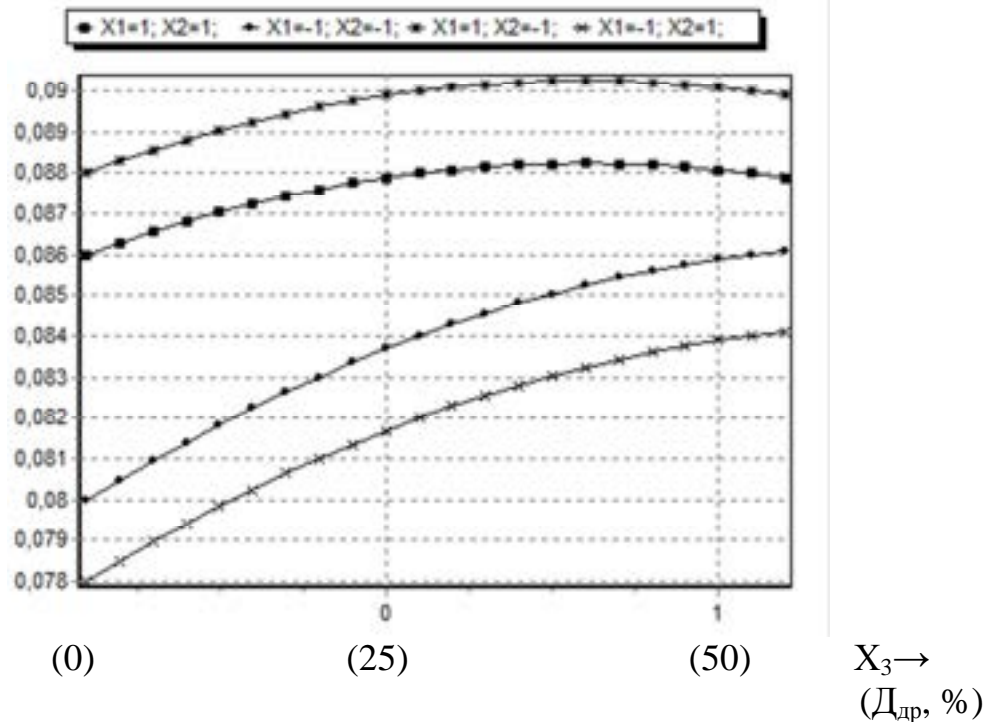


Рисунок 5.18 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.16 – 5.18 видно, что они аналогичны регрессионным моделям для композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

#### 5.4.6. Модели для композита из отходов хлопка на фенолформальдегидном связующем

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.16.

Таблица 5.16 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,076	0,075	0,079	0,090	0,089	0,080	0,092	0,082	0,094	0,093	0,085	5·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,069	0,069	0,086	0,073	0,073	0,089	0,078	0,090	0,091	0,092	0,081	9·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,094	0,092	0,095	0,086	0,080	0,092	0,093	0,082	0,083	0,083	0,088	3·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,086	0,074	0,080	0,089	0,086	0,088	0,087	0,076	0,077	0,077	0,082	3·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,075	0,072	0,074	0,087	0,088	0,074	0,082	0,091	0,087	0,090	0,082	6·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,072	0,065	0,067	0,080	0,081	0,068	0,075	0,083	0,080	0,079	0,075	4·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,081	0,068	0,076	0,089	0,090	0,077	0,084	0,094	0,089	0,092	0,084	7·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,065	0,087	0,067	0,080	0,067	0,063	0,083	0,076	0,084	0,088	0,076	9·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,080	0,089	0,077	0,089	0,079	0,079	0,091	0,085	0,091	0,090	0,085	3·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,074	0,083	0,071	0,083	0,073	0,084	0,085	0,073	0,079	0,085	0,079	3·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,087	0,078	0,087	0,075	0,077	0,074	0,087	0,089	0,088	0,088	0,083	4·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,078	0,087	0,075	0,090	0,078	0,074	0,096	0,094	0,096	0,092	0,086	8·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,090	0,091	0,090	0,090	0,076	0,078	0,090	0,080	0,087	0,078	0,085	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,075	0,084	0,077	0,086	0,076	0,072	0,092	0,086	0,087	0,085	0,082	4·10 <sup>-5</sup>

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

$$\lambda = 0,084 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.16)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00005 + 0,00009 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00006 + 0,00004 + 0,00007 + 0,00009 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00008 + 0,00004 + 0,00004) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,084 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.17)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.17.

Таблица 5.17 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,085	0,084
2	-	+	+	0,081	0,080
3	+	-	+	0,088	0,086
4	-	-	+	0,082	0,082
5	+	+	-	0,082	0,082
6	-	+	-	0,075	0,074
7	+	-	-	0,084	0,084
8	-	-	-	0,076	0,076
9	+	0	0	0,085	0,085
10	-	0	0	0,079	0,079
11	0	+	0	0,083	0,083
12	0	-	0	0,086	0,085
13	0	0	+	0,085	0,085
14	0	0	-	0,082	0,081



Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,085 - 0,084)^2 + (0,081 - 0,080)^2 + (0,088 - 0,086)^2 + (0,082 - 0,082)^2 + (0,082 - 0,082)^2 + (0,075 - 0,074)^2 + (0,084 - 0,084)^2 + (0,076 - 0,076)^2 + (0,085 - 0,085)^2 + (0,079 - 0,079)^2 + (0,083 - 0,083)^2 + (0,086 - 0,085)^2 + (0,085 - 0,085)^2 + (0,082 - 0,081)^2) / 7 = 0,00004$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,8 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,07894 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{суш} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.18)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.19 – 5.21.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

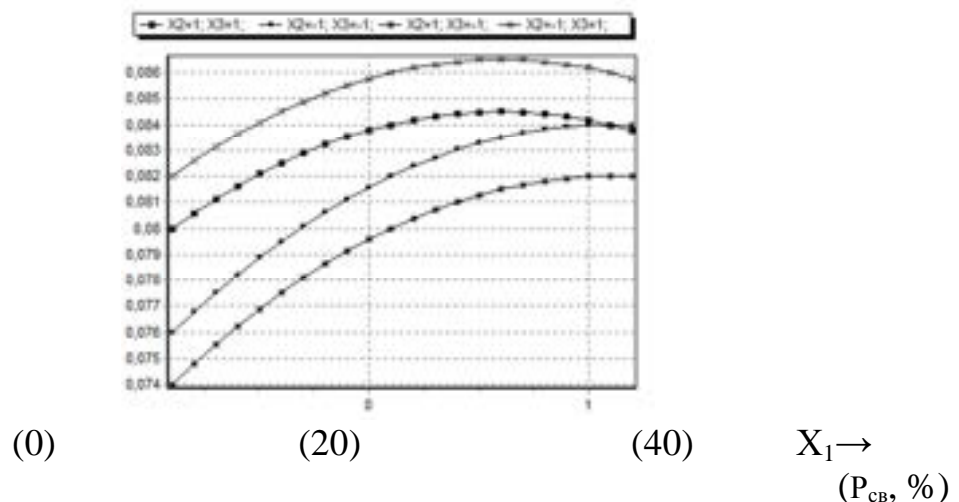


Рисунок 5.19 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

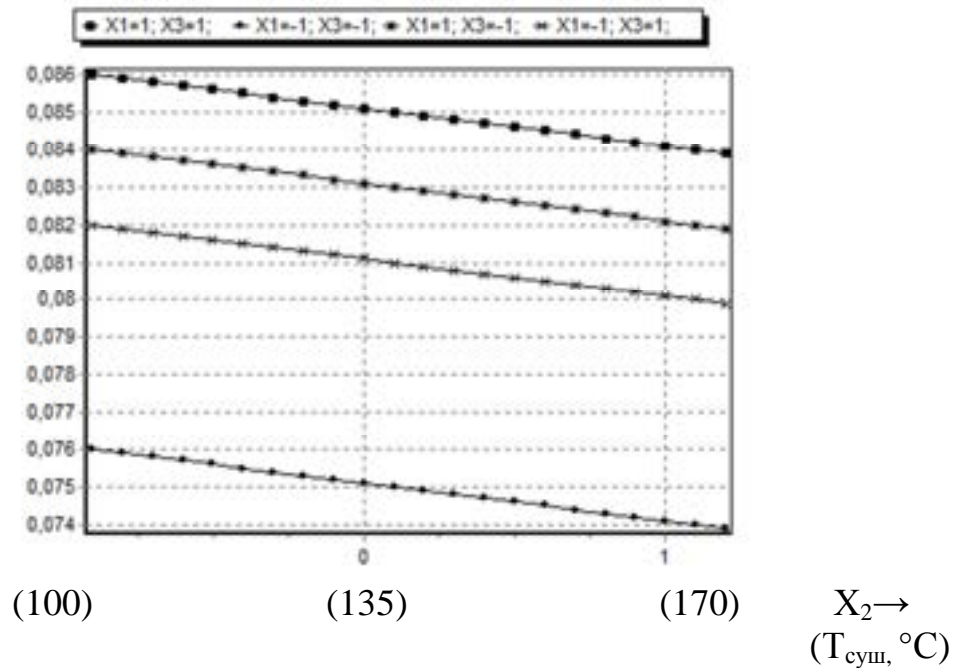


Рисунок 5.20 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

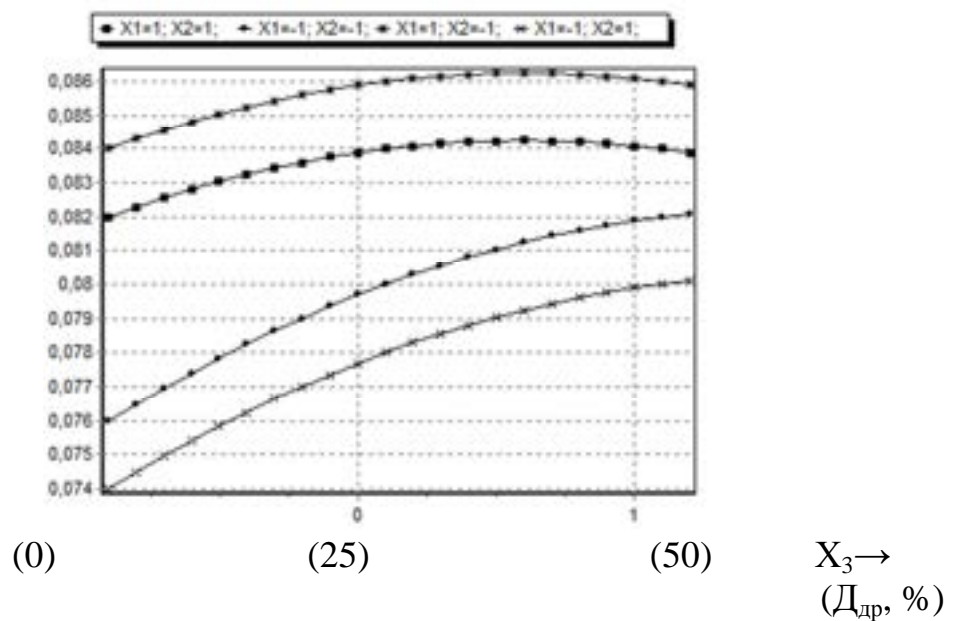


Рисунок 5.21 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.19 – 5.21 видно, что они аналогичны графикам модели композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

#### **5.4.7. Модели для композита из отходов хлопка на основе жидкого стекла**

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.18.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

$$\lambda = 0,093 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.19)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00004 + 0,00004 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00005 + 0,00009 + 0,00007 + 0,00006 + 0,00003 + 0,00009 + 0,00003 + 0,00008 + 0,00004 + 0,00004) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,093 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.20)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.19.

Таблица 5.18 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,089	0,097	0,090	0,099	0,089	0,085	0,104	0,099	0,099	0,099	0,095	4·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,095	0,085	0,095	0,093	0,095	0,086	0,095	0,085	0,081	0,100	0,091	4·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,090	0,098	0,092	0,099	0,090	0,088	0,105	0,098	0,100	0,100	0,096	3·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,101	0,096	0,094	0,096	0,084	0,086	0,088	0,095	0,094	0,086	0,092	3·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,085	0,093	0,083	0,094	0,083	0,083	0,104	0,093	0,097	0,095	0,091	5·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,074	0,082	0,076	0,082	0,076	0,075	0,097	0,097	0,086	0,095	0,084	9·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,106	0,095	0,104	0,103	0,087	0,085	0,091	0,085	0,091	0,083	0,093	7·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,075	0,083	0,077	0,083	0,079	0,080	0,096	0,088	0,094	0,095	0,085	6·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,089	0,094	0,088	0,092	0,090	0,089	0,100	0,097	0,101	0,100	0,094	3·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,079	0,088	0,075	0,086	0,084	0,078	0,099	0,091	0,102	0,098	0,088	9·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,092	0,089	0,083	0,090	0,088	0,086	0,099	0,095	0,100	0,098	0,092	3·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,083	0,092	0,095	0,093	0,088	0,084	0,106	0,098	0,107	0,104	0,095	8·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,100	0,101	0,097	0,105	0,086	0,087	0,092	0,087	0,094	0,091	0,094	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,091	0,084	0,088	0,089	0,084	0,083	0,102	0,094	0,098	0,097	0,091	4·10 <sup>-5</sup>

Таблица 5.19 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,095	0,093
2	-	+	+	0,091	0,089
3	+	-	+	0,096	0,095
4	-	-	+	0,092	0,091
5	+	+	-	0,091	0,091
6	-	+	-	0,084	0,083
7	+	-	-	0,093	0,093
8	-	-	-	0,085	0,085
9	+	0	0	0,094	0,094
10	-	0	0	0,088	0,088
11	0	+	0	0,092	0,092
12	0	-	0	0,095	0,094
13	0	0	+	0,094	0,094
14	0	0	-	0,091	0,090

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,095 - 0,093)^2 + (0,091 - 0,089)^2 + (0,096 - 0,095)^2 + (0,092 - 0,091)^2 + (0,091 - 0,091)^2 + (0,084 - 0,083)^2 + (0,093 - 0,093)^2 + (0,085 - 0,085)^2 + (0,094 - 0,094)^2 + (0,088 - 0,088)^2 + (0,092 - 0,092)^2 + (0,095 - 0,094)^2 + (0,094 - 0,094)^2 + (0,091 - 0,090)^2) / 7 = 0,00004$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,8 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,08794 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{суш} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.21)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от

температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.22 – 5.24.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

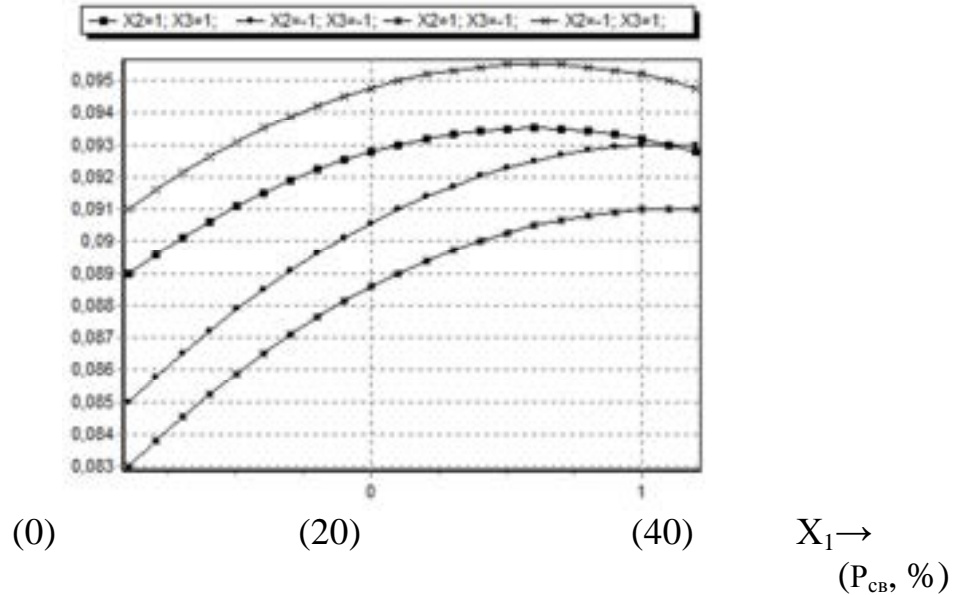


Рисунок 5.22 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

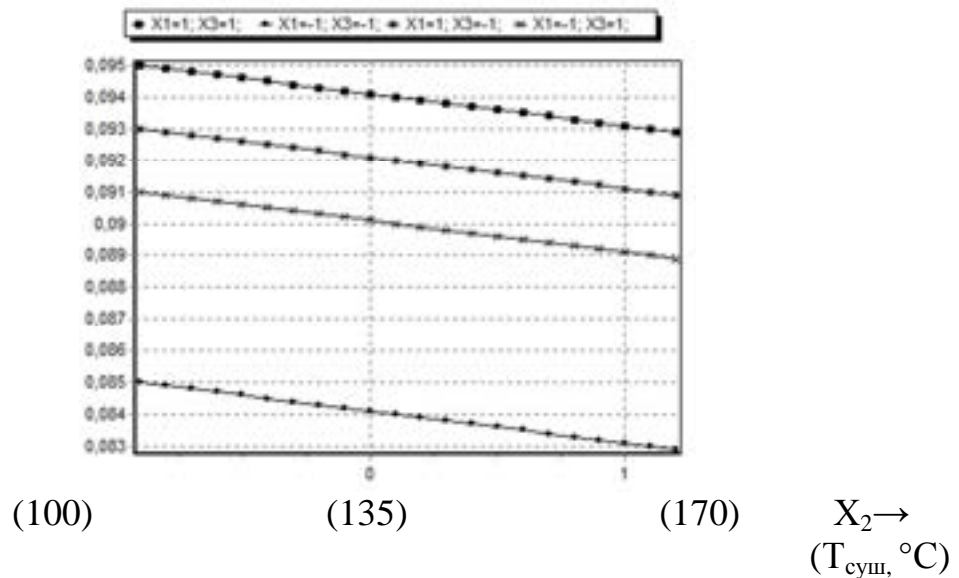


Рисунок 5.23 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

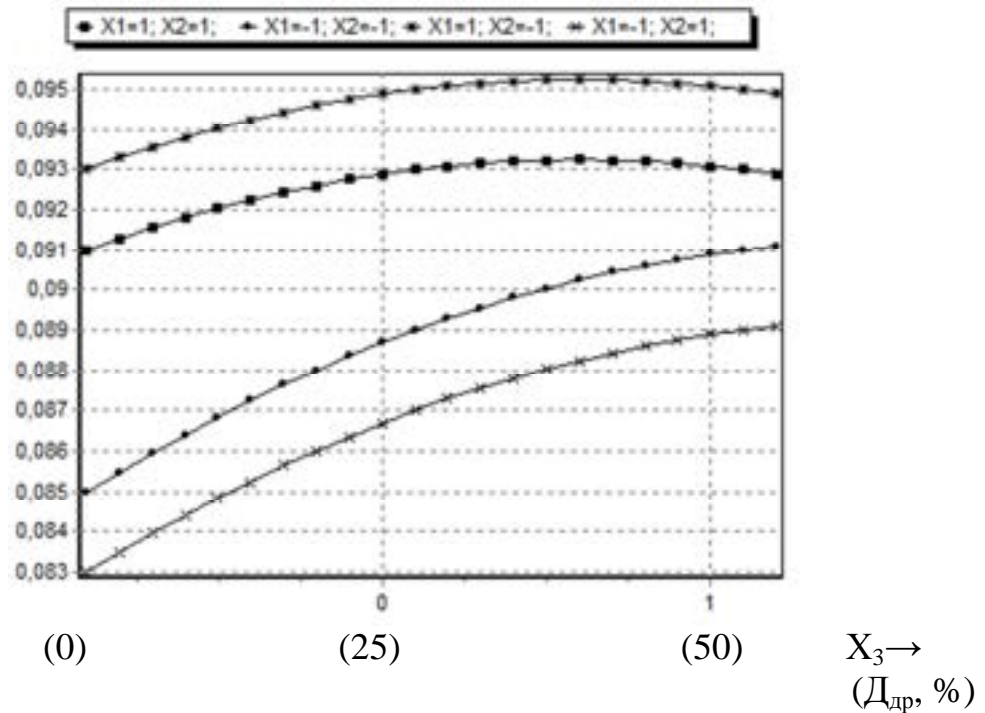


Рисунок 5.24 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.22 – 5.24 видно, что они аналогичны графикам модели композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

#### 5.4.8. Модели для композита из отходов хлопка на алюмохромфосфатном связующем

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 5.4, 5.5. Выходная величина:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в таблице 5.20.

После расчета коэффициентов регрессии математическая модель приобретает вид:

Таблица 5.20 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	s <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,092	0,099	0,092	0,101	0,092	0,088	0,104	0,101	0,102	0,099	0,097	3·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,093	0,086	0,095	0,087	0,085	0,082	0,098	0,095	0,096	0,093	0,091	3·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,099	0,101	0,093	0,100	0,099	0,092	0,091	0,089	0,103	0,102	0,097	3·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,101	0,096	0,094	0,096	0,084	0,086	0,088	0,095	0,094	0,086	0,093	3·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,086	0,094	0,088	0,096	0,085	0,083	0,100	0,096	0,098	0,094	0,092	4·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,079	0,088	0,081	0,075	0,069	0,068	0,090	0,090	0,079	0,088	0,085	4·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,085	0,096	0,090	0,099	0,087	0,084	0,102	0,100	0,101	0,096	0,094	5·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,076	0,088	0,082	0,091	0,078	0,076	0,096	0,092	0,093	0,088	0,086	6·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,083	0,098	0,090	0,101	0,084	0,085	0,106	0,102	0,106	0,105	0,096	9·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,077	0,082	0,084	0,080	0,078	0,072	0,093	0,085	0,096	0,092	0,090	9·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,081	0,096	0,088	0,099	0,084	0,085	0,103	0,100	0,101	0,103	0,094	7·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,083	0,098	0,090	0,101	0,085	0,087	0,106	0,102	0,103	0,105	0,096	8·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,087	0,097	0,090	0,100	0,086	0,088	0,100	0,099	0,101	0,102	0,095	4·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,095	0,085	0,098	0,088	0,086	0,084	0,097	0,098	0,100	0,099	0,093	4·10 <sup>-5</sup>



$$\lambda = 0,094 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 - 0,000X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,00X_2X_3 \quad (5.22)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости  $S_y^2 = (0,00003 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00004 + 0,00005 + 0,00006 + 0,00009 + 0,00009 + 0,00007 + 0,00008 + 0,00004 + 0,00004) / 14 = 0,00005$ .

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой мягких древесных отходов (в кодированных обозначениях факторов):

$$\lambda = 0,094 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (5.23)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходной величины по уравнению регрессии представлены в таблице 5.21.

Таблица 5.21 – Значения выходной величины, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели в кодированных обозначениях

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К
1	+	+	+	0,097	0,094
2	-	+	+	0,091	0,090
3	+	-	+	0,097	0,096
4	-	-	+	0,093	0,092
5	+	+	-	0,092	0,092
6	-	+	-	0,085	0,084
7	+	-	-	0,094	0,094
8	-	-	-	0,086	0,086
9	+	0	0	0,096	0,095
10	-	0	0	0,090	0,089
11	0	+	0	0,094	0,093
12	0	-	0	0,096	0,095
13	0	0	+	0,095	0,095
14	0	0	-	0,093	0,091

Дисперсия адекватности  $S_{ад}^2 = 10 ((0,097 - 0,094)^2 + (0,091 - 0,090)^2 + (0,097 - 0,096)^2 + (0,093 - 0,092)^2 + (0,092 - 0,092)^2 + (0,085 - 0,084)^2 + (0,094 - 0,094)^2 + (0,086 - 0,086)^2 + (0,096 - 0,095)^2 + (0,090 - 0,089)^2 + (0,094 - 0,093)^2 + (0,096 - 0,095)^2 + (0,095 - 0,095)^2 + (0,093 - 0,091)^2) / 7 = 0,00003$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,6 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Перевод модели из кодированных обозначений факторов в натуральные.

$$\lambda = 0,08894 + 0,0004 P_{св} - 0,000007 T_{суш} + 0,00012 D_{др} - 0,000005 P_{св}^2 - 0,0000016 D_{др}^2 - 0,000002 P_{св} D_{др}. \quad (5.24)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности плиты ( $\lambda$ ), от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), от доли добавки отходов древесины, % по массе растительного наполнителя ( $X_3$ ), представленные на рисунках 5.25 – 5.27.

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

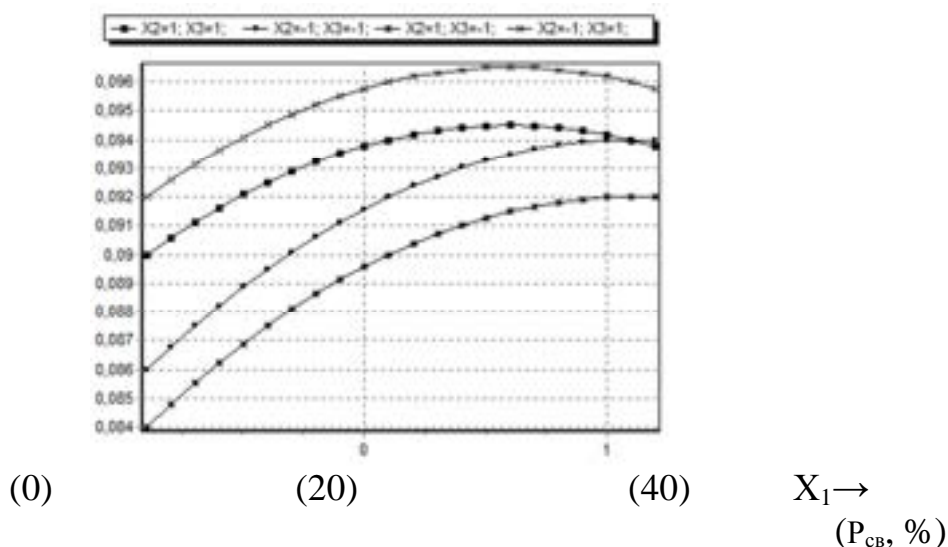


Рисунок 5.25 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

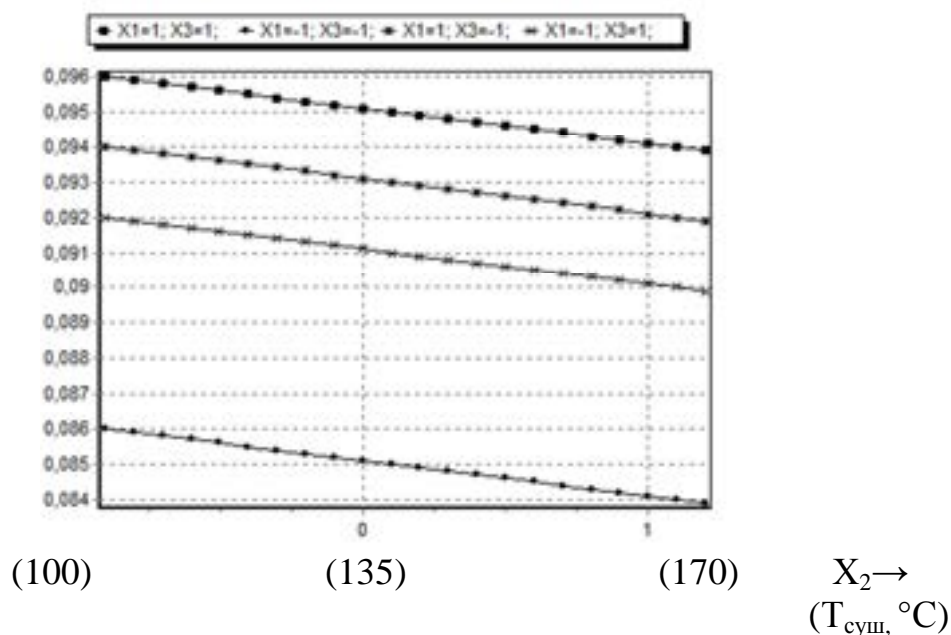


Рисунок 5.26 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки

$\lambda \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

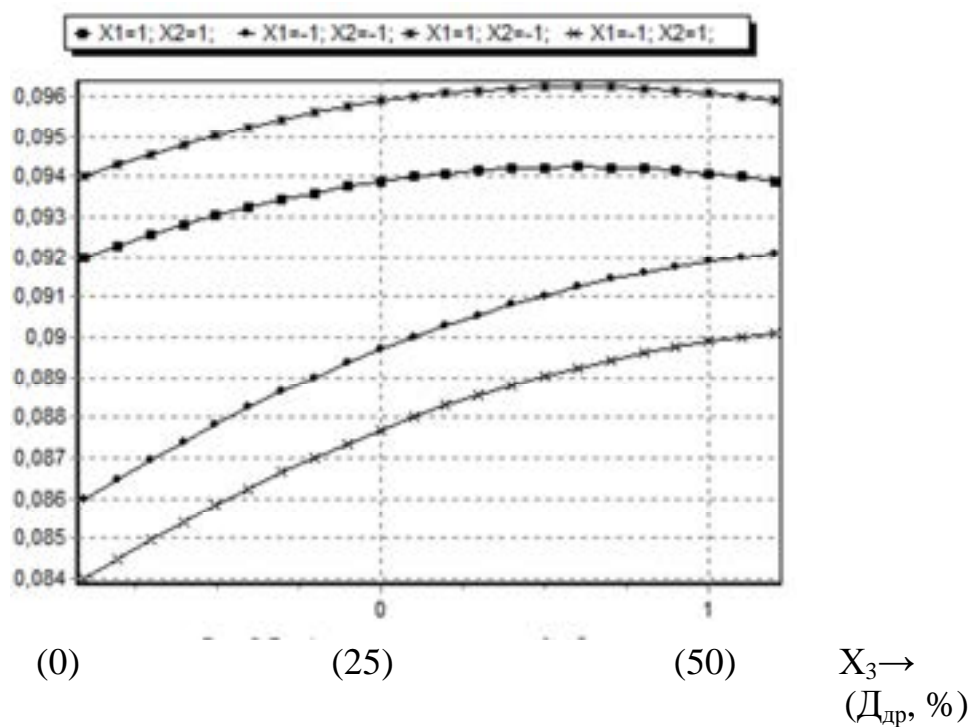


Рисунок 5.27 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки отходов древесины

Из графиков 5.25 – 5.27 видно, что они аналогичны графикам модели композита из отходов льна на карбамидоформальдегидном связующем.

Таким образом, исследование показало, что разработанные композиционные материалы из неиспользуемых отходов прядения льняных и хлопковых волокон можно использовать в качестве теплоизоляционного элемента конструкций зданий и сооружений.

### **5.5. Рекомендуемые параметры процесса структурообразования теплоизоляционного композита**

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 5.22.

Таблица 5.22 – Минимальные значения коэффициента теплопроводности,  $\sigma_{и} = 0,4$  МПа

Вид наполнителя/ Вид связующего	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·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 рисунках 5.28–5.35 представлена зависимость водопоглощения и коэффициента теплопроводности от доли добавки связующих для композитов из отходов льна, хлопка с добавкой различных видов мягких отходов древесины.

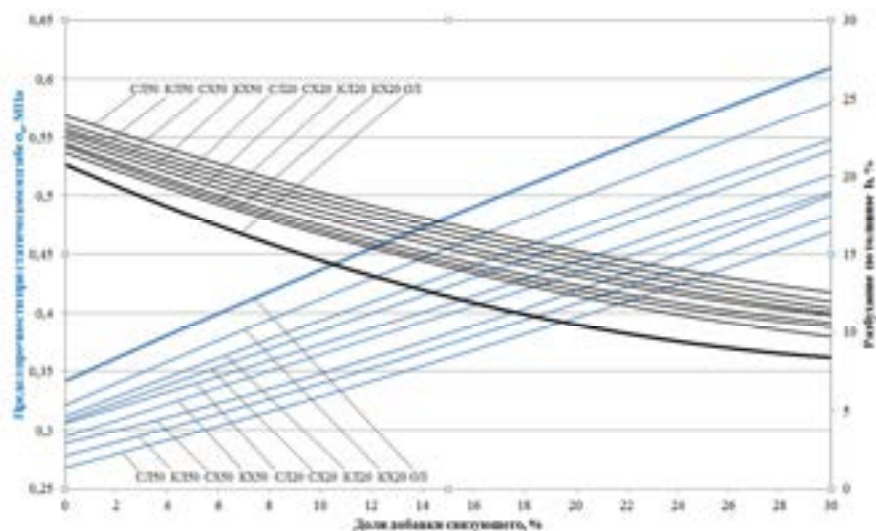


Рисунок 5.28 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (ФФС) для композита из отходов льна с добавкой мягких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОЛ – отходы льна; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

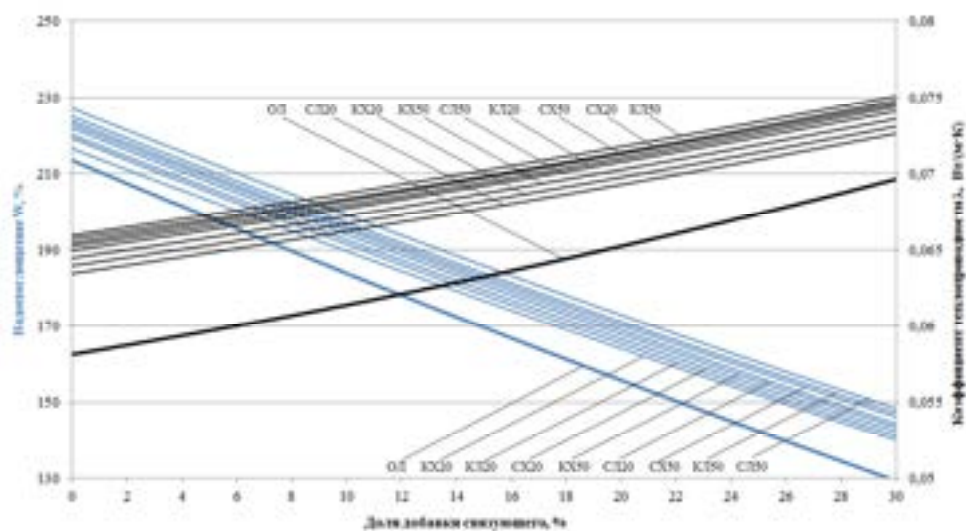


Рисунок 5.29 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (ФФС) для композита из отходов льна с добавкой мягких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОЛ – отходы льна; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

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

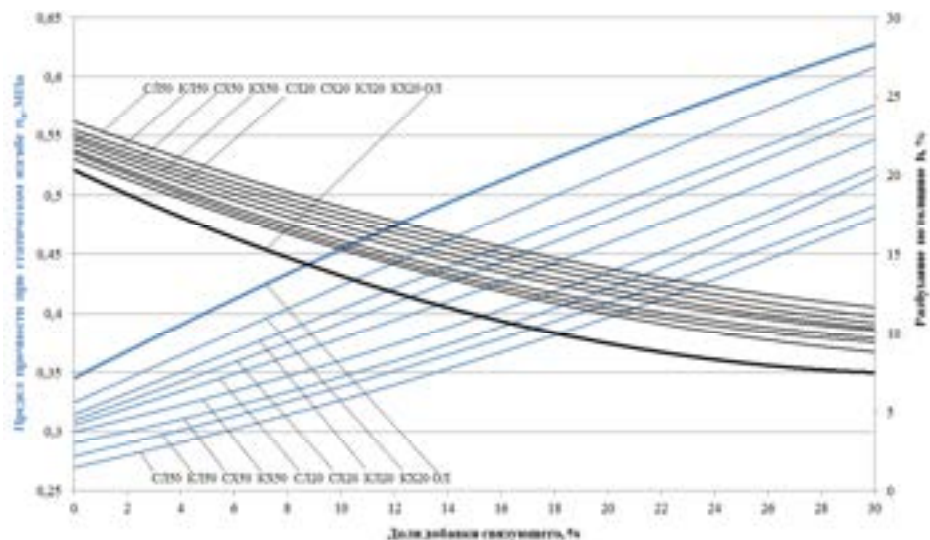


Рисунок 5.30 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (АХФ) для композита из отходов льна с добавкой мягких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОЛ – отходы льна; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

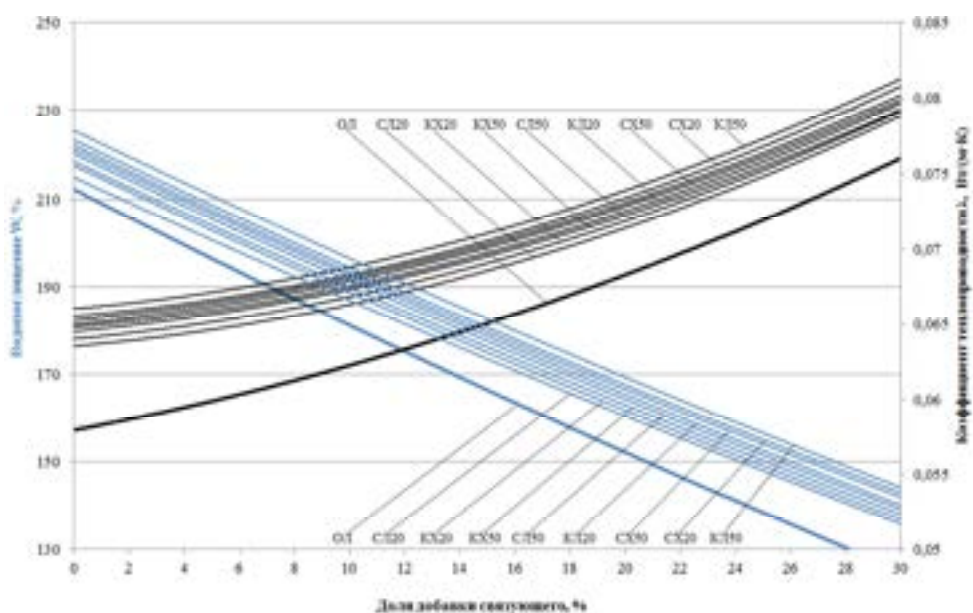


Рисунок 5.31 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (АХФ) для композита из отходов льна с добавкой мягких



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

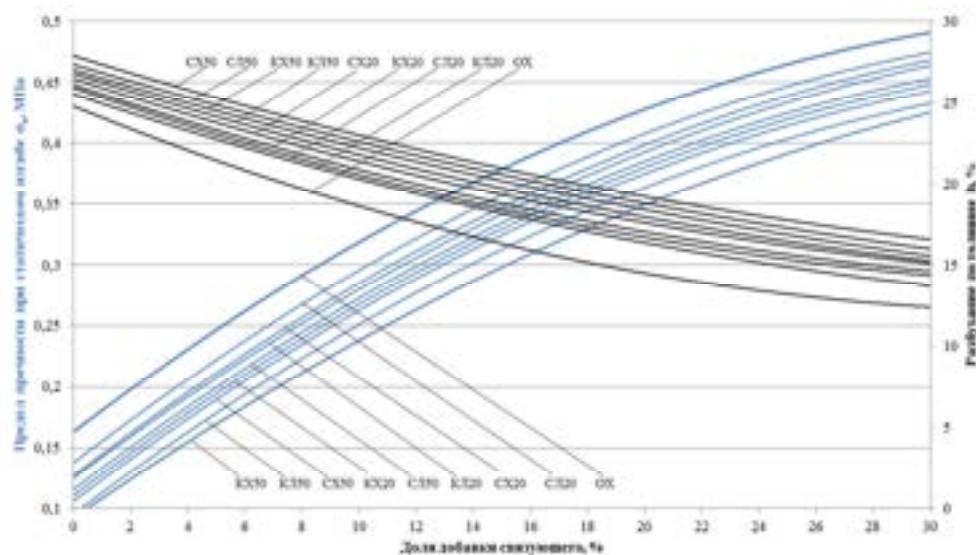


Рисунок 5.32 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (ФФС) для композита из отходов хлопка с добавкой мягких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОХ – отходы хлопка; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

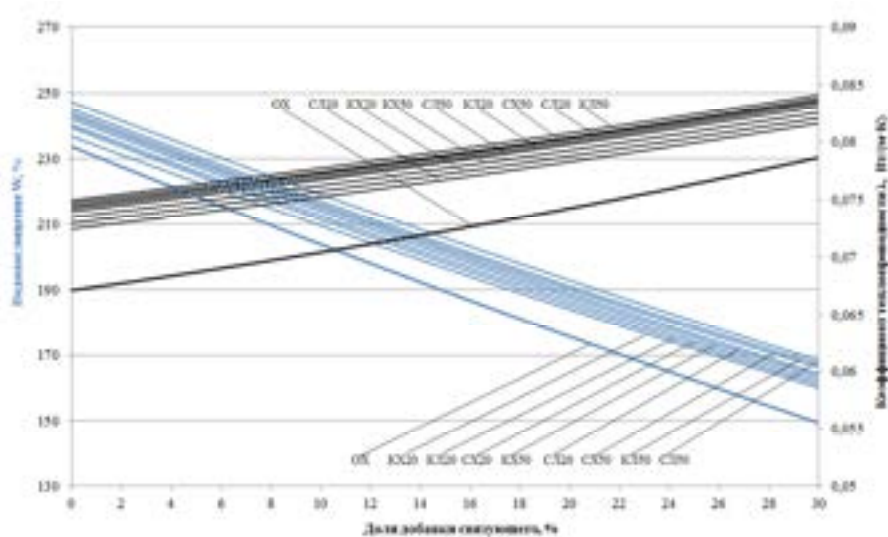


Рисунок 5.33 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (ФФС) для композита из отходов хлопка с добавкой мяг-

ких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОХ – отходы хлопка; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

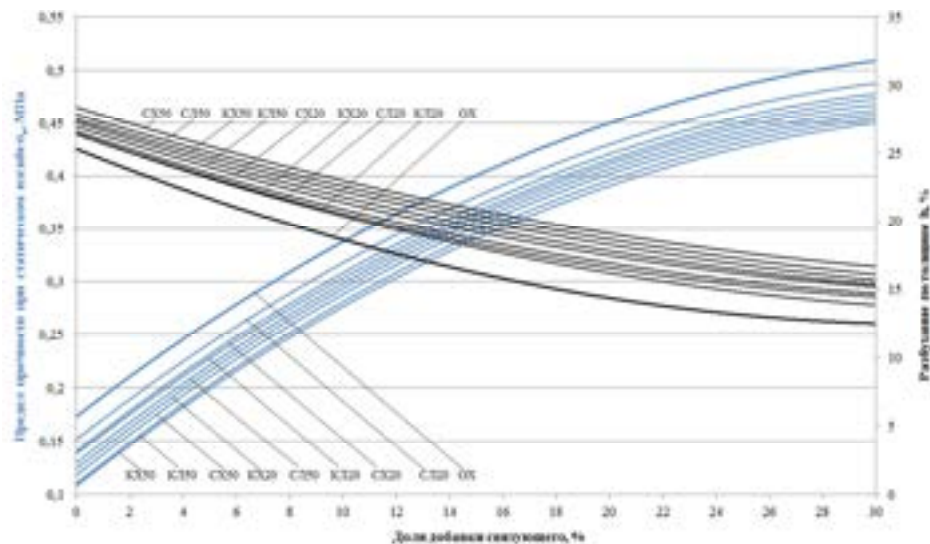


Рисунок 5.34 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (АХФ) для композита из отходов хлопка с добавкой мягких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОХ – отходы хлопка; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

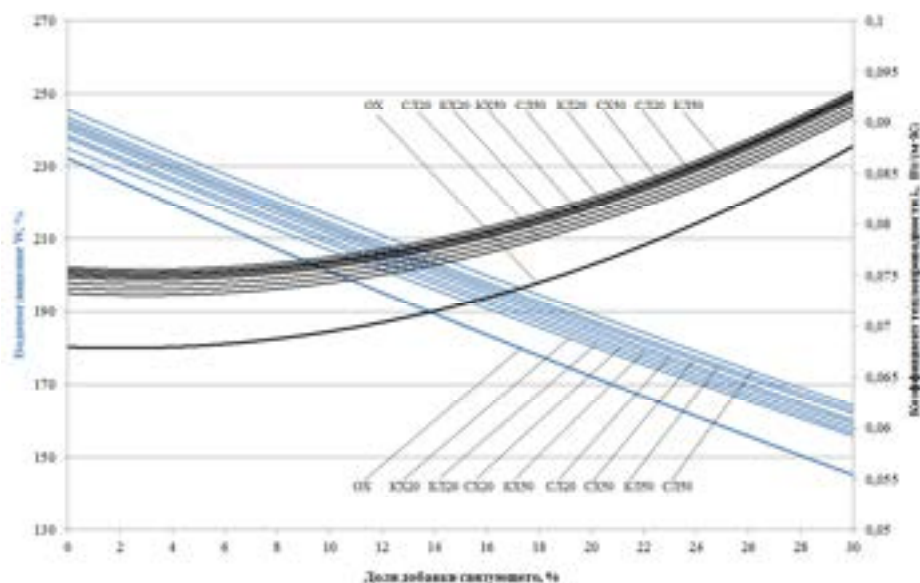


Рисунок 5.35 – Зависимости физико-механических показателей от доли добавки связующего (АХФ) для композита из отходов хлопка с добавкой мягких отходов древесины: плотность и коэффициент теплопроводности: ОХ – отходы хлопка; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя



ких отходов древесины: водопоглощение и коэффициент теплопроводности: ОХ – отходы хлопка; КХ – кора хвойных пород; КЛ – кора лиственных пород; СХ – стружка хвойных пород; СЛ – стружка лиственных пород; цифрами обозначены доли добавки наполнителя

### **5.6. Исследование влияния структуры композита из целлюлозосодержащих отходов на его эксплуатационные показатели**

Одной из главных задач современного строительного производства является рациональное использование энергоресурсов и повышение энергоэффективности зданий. Работы по ресурсо- и энергосбережению в строительной отрасли относятся к приоритетным направлениям развития науки и техники Российской Федерации. Огромная доля в потреблении энергоресурсов принадлежит зданиям; общий технологический потенциал энергосбережения в РФ консервативно оценивается в 350 млн. тонн условного топлива, из которых около 130 млн. тонн условного топлива – за счет снижения непроизводительных энергопотерь в зданиях [4].

Строительство зданий, как жилых, так и общественных и большинства промышленных, должно осуществляться в соответствии с требованиями к тепловой защите. Для удовлетворения этим требованиям в практике строительного производства применяются многослойные стеновые конструкции с эффективными теплоизоляционными материалами [53]. Ассортимент применяемых теплоизоляционных материалов достаточно разнообразен по виду исходного сырья, структуре, форме, их техническим и теплофизическим характеристикам [41]. Преимущественно на отечественном рынке используются волокнистые материалы на основе стеклянного и базальтового волокна, минеральной и шлаковой ваты. Минераловатные утеплители для стен имеют, пожалуй, самую низкую по сравнению с другими утеплителями объемную массу (плотность) – от 40 кг/м<sup>3</sup>. Однако минеральная вата имеет ряд существенных недостатков – она дорогостояща, пылит при изготовлении и мон-

таже [17], негативно воздействуя на органы дыхания, имеет высокое водопоглощение, дает усадку при эксплуатации [57, 58, 187, 188].

Многолетний опыт применения минераловатных утеплителей выявил и другие трудноустраняемые недостатки таких материалов, а именно - возможность конденсатообразования в сечении конструкции [54], приводящего к снижению теплотехнической эффективности утеплителя; ограниченная долговечность теплоизоляционных материалов [81].

Отмеченные недостатки инициировали поиск и разработку других альтернативных материалов теплоизоляционного назначения, в первую очередь, получаемых на основе матрицы из поликонденсационного связующего и многокомпонентного наполнителя из целлюлозосодержащих отходов прядения хлопка, льна и мягких отходов переработки древесины, являющихся возобновляемым ресурсом по своей природе [295, 280].

С позиций теории тепломассопереноса [94] мягкие отходы деревообработки, а также отходы прядения льна и хлопка можно рассматривать как систему мелкодисперсных частиц, каждая из которых представляет собой капиллярно-пористое тело, содержащее влагу в макро- и микрокапиллярах, а также осмотическую влагу, входящую в растительные клетки. Так как вода имеет коэффициент теплопроводности в 25 раз больше, чем неподвижный воздух, то ее количество будет оказывать влияние на основной эксплуатационный показатель теплоизоляционных материалов – коэффициент теплопроводности и характер температурных полей в структуре композита.

В общем случае, согласно теории Фурье, температурное поле тела определяется характером его теплообмена с окружающей средой, причём теплообмен обусловлен двумя факторами – непосредственной передачей тепла от нагретого тела к более холодной среде и излучением тепла в окружающее пространство.

При эксплуатации зданий наружные и внутренние стороны ограждающих конструкций практически всегда находятся в разных температурных условиях. Вследствие этого формируется градиент температур  $grad T$ , и из-за

разницы температур происходит перенос теплоты, или тепловой поток. Согласно закону Био–Фурье, вектор теплового потока  $q$  прямо пропорционален градиенту температуры  $T$ :

$$q = -\lambda \text{grad}T \quad (5.25)$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  уравнения (1), то есть коэффициент теплопроводности, Вт/(мК), характеризует способность материала проводить теплоту. Именно коэффициент теплопроводности является одним из основных параметров термического сопротивления материала. Коэффициент теплопроводности зависит от комплекса характеристик материала – его природы, температуры, плотности, влажности и др. Если не затрагивать теплопередачу в металлах, можно для твердых тел утверждать, что теплопередача обусловлена колебательными движениями молекул. Исходя из этого, изменение температуры влияет на коэффициент теплопроводности, однако на практике при ограниченном изменении температуры материала (порядка 50...60 °С) изменение коэффициента теплопроводности невелико, в строительных расчетах оно обычно не учитывается.

Существенное влияние на величину коэффициента теплопроводности оказывает плотность материала. Коэффициент теплопроводности материала тем меньше, чем меньше объемная масса материала. Эта зависимость обусловлена тем, что в материале меньшей плотности больше пор, заполненных воздухом, теплопроводность которого очень низкая.

Одной из задач создания эффективных теплоизоляционных материалов является получение такой структуры композита, которая удовлетворяла бы требованиям к тепловой защите [142], а также при неизбежных процессах конденсации влаги внутри утеплителя вследствие образования точки росы позволила бы обеспечить формоустойчивость материала и продлить срок его службы.

Рассматривая, в качестве одного из примеров, краевую задачу тепло-массопереноса в целлюлозосодержащем материале под воздействием циклических изменений нагревание – охлаждение в анализируемой системе [163], процесс изменения температуры принято описывать системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа с нелинейными граничными условиями и произвольным видом функций, определяющих начальные распределения потенциалов переноса без учета влияния баропереноса [95, 253, 239, 134]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(a \operatorname{grad}(t)) + \varepsilon \frac{r^*}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)) \end{aligned} \right\}. \quad (5.26)$$

Первое уравнение может быть названо дифференциальным уравнением теплопереноса, второе – уравнением влагопереноса. Эти уравнения описывают тепловлажностное состояние теплоизоляционного материала под воздействием изменяющихся параметров окружающей среды. Здесь:  $a$ ,  $k$  – коэффициенты температуро- и влагопроводности наполнителя;  $\delta_T$  – коэффициент термодиффузии, характеризующий влияние градиента влагосодержания на теплоперенос;  $c$  – теплоемкость древесины;  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения, показывающий долю влаги, перемещающейся в материале в виде пара;  $r^*$  – скрытая теплота парообразования.

В общем случае коэффициенты тепло-, температуро- и массопроводности, а также теплофизические характеристики материала зависят от его температуры, плотности, влажности и могут изменяться во времени процесса. Поэтому они и находятся под знаками математических операторов дивергенции [163]. Также следует отметить, что целлюлозосодержащий материал является сложным комплексом макромолекул с различной плотностью упаковки. Согласно одной из структурных схем [1], макромолекулы целлюлозы представляют из себя немного свернутую спиралевидную ленту с поперечным размером  $0,39 \times 0,83$  нм. Ленты укладываются в плоскости по 10–

15 штук в пачки макромолекул из 8...10 слоев. Вследствие обширного фронта межмолекулярных водородных связей для целлюлозы крайне длительное время сохраняется жесткая и прочная структура, но это утверждение справедливо только для кристаллической области макромолекулы, составляющей 15...17 нм. Следующие за кристаллическими областями аморфные участки имеют в длину 2,5...3,0 нм.

Физические характеристики материала целлюлозосодержащего наполнителя изменяются в процессе сорбции. Внутри аморфных областей имеются поры размером 0,5...1,0 нм. При сорбции влаги макромолекулы целлюлозы на данных участках раздвигаются и приобретают характер «бус». Именно это является причиной изменения физических характеристик целлюлозосодержащих материалов при увлажнении.

Кристаллические участки целлюлозы обеспечивают начальную стойкость материала к воздействию воды, внутрь кристаллитов целлюлозы адсорбат не проникает. Создание адсорбционного монослоя воды приводит к расклинивающим воздействиям в аморфной области целлюлозы, и как следствие – к разбуханию материала [55], причем моноадсорбированная вода прочно связана с активной поверхностью адсорбента [56]. Насколько велико негативное влияние влаги на формоустойчивость и теплопроводность композита из целлюлозосодержащих отходов можно оценить по результатам лабораторных исследований.

В лаборатории кафедры Лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств (ЛДП) Костромского государственного университета (КГУ), г. Кострома, Россия разработаны теплоизоляционные композиционные плиты на основе целлюлозосодержащих наполнителей и матрицы из синтетических связующих. Образцы изготавливались по технологии древесноволокнистых плит мокрого способа производства. В качестве матрицы для производства плит было использовано синтетическое термореактивное связующее – фенолоформальдегидная смола (ФФС). Композиционный плитный материал изготавливался средней плотности 240...260 кг/м<sup>3</sup>,

расход связующего составлял 40 % от массы растительного наполнителя. Образцы материала высушивались при 80 °С до влажности  $8\pm 0,5$  %. Оценивалась теплопроводность и размерная стабильность композиционных плит после пребывания в воде в течение 24 часов.

Определялись влагопоглощение по массе  $W_{п}$ , %, коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К) и относительное изменение параметров – коэффициента теплопроводности  $\Delta\lambda$ , % и толщины материала  $\Delta h$ , %. Значение коэффициента теплопроводности материала определялось с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076-99 [48].

На рисунке 5.36 представлены фото образцов плит из отходов прядения льна и мягких древесных отходов (а) из отходов прядения хлопка и мягких древесных отходов (б) и минеральной ваты (в) до и после пребывания в воде в течение 24 часов.

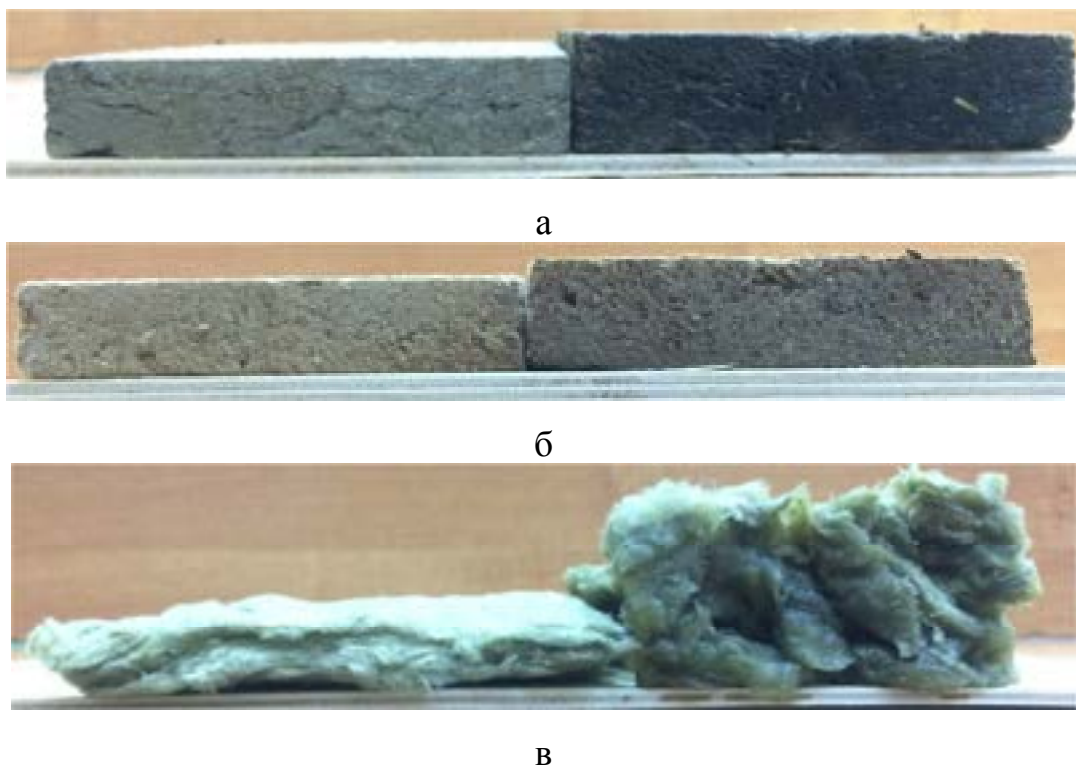


Рисунок 5.36 – Фото образцов плит до и после пребывания в воде в течение 24 часов:

а – из отходов прядения льна и мягких древесных отходов; б – из отходов прядения хлопка и мягких древесных отходов, в – минеральной ваты

Результаты определения параметров материалов после воздействия воды представлены в таблице 5.23.

Таблица 5.23 – Результаты определения параметров материалов после воздействия воды

Вид материала	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Изменение коэффициента теплопроводности $\Delta\lambda$ , %	Разбухание по толщине $P_h$ , %
	до увлажнения	после увлажнения		
Композит из отходов хлопка и древесины	0,086	0,246	186	15,3
Композит из отходов льна и древесины	0,061	0,245	302	13,8
Минеральная вата	0,048	1,076	2141	153,4

Как видно из таблицы 5.23, минераловатный утеплитель вследствие попадания в его структуру влаги значительно утратил свои теплоизоляционные свойства и увеличился по толщине. В то время как теплоизоляционный композит на основе целлюлозосодержащих отходов показал примерно в 10 раз лучшие показатели устойчивости к влажностным воздействиям. Тем самым в ходе лабораторных исследований было подтверждено предположение о том, что несмотря на наличие расклинивающих воздействий влаги в аморфной области целлюлозы, композит из отходов прядения льна, хлопка и мягких отходов деревообработки обладает более высокой стойкостью к влажностным воздействиям.

При изучении явления тепло-массопереноса в теплоизоляционном композите из целлюлозосодержащего наполнителя также следует предположить, что от равномерности распределения его компонентов будет зависеть его теплопроводность в целом. И наоборот, неоднородность структуры композита, наличие участков концентрации связующего или влаги будут ухудшать теплоизоляционные свойства материала. Поэтому в процессе его созда-

ния следует соблюдать рекомендуемые технологические режимы производства композита.

### **5.7. Выводы и рекомендации по результатам экспериментальных исследований**

1. 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).

2. Установлена степень влияния доли добавки связующего, температуры сушки на коэффициент теплопроводности. С увеличением доли добавки связующего коэффициент теплопроводности композитов растет, и при максимальной доле добавки связующего обеспечивается наибольшее значение коэффициента теплопроводности плит, как при минимальной, так и при максимальной температуре сушки.

3. Установлена высокая сходимость значений теплопроводности композита, рассчитанных по предложенной аналитической зависимости (глава 2) и определенных экспериментально – 0...5,26 %.

4. Установлено сочетание технологических факторов производства теплоизоляционных материалов, позволяющих повысить их устойчивость к циклическим термовлажностным воздействиям. Доказано, что разработанный теплоизоляционный материал имеет преимущества перед существующими. Теплоизоляционные материалы из отходов прядения хлопковых и льняных волокон на основе матрицы из синтетических термореактивных или неорганических связующих показали наилучшую стабильность размеров и коэффициента теплопроводности при длительном воздействии термовлагообработки.



5. По регрессионным моделям установлено, что наибольшее значение на коэффициент теплопроводности оказывает доля добавки связующих.

6. Сравнительные испытания теплоизоляционных материалов показали преимущества разработанного авторами композиционного материала на основе целлюлозосодержащего наполнителя по сравнению с минеральной ватой, что объясняется наличием обширного фронта прочных водородных связей в структуре композита.

7. Установлено, что при увлажнении сравниваемых видов утеплителей приращение коэффициента теплопроводности и разбухание минеральной ваты примерно в 10 раз выше, чем у композита на основе целлюлозосодержащих наполнителей.

## **Глава 6. ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕЗАЩИЩЕННОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

### **6.1. Анализ процессов термодеструкции композиционных материалов на основе растительных отходов и влияния замедлителей горения на показатели горючести**

#### **6.1.1. Теоретическое обоснование оценки горючести композиционных материалов с растительным наполнителем**

Основным недостатком растительных материалов является их горючесть, способность легко воспламеняться и распространять пламя с выделением большого количества тепла, дыма и токсичных газообразных продуктов. Все это повышает риск возникновения пожароопасной ситуации. Распространение пожара, приобретая характер техногенной катастрофы, приводит к человеческим жертвам, поэтому особую значимость имеют исследования в области повышения огнезащитности материалов.

К недостаткам целлюлозосодержащих материалов относится их повышенная горючесть [224, 252, 268].

Основным горючим компонентом отходов является целлюлоза – органический полимер биологического происхождения, макромолекула которого построена из глюкопиранозных звеньев. Общая формула целлюлозы  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , структурная формула приведена на рисунке 6.1.

Горение целлюлозосодержащих материалов – это химический окислительно-восстановительный процесс, сопровождающийся выделением тепла и ряда продуктов протекающих при этом реакций. При воздействии высоких температур деструкция целлюлозы проходит ряд последовательных стадий.

При температурах 200–230 °С деструктурирует в основном аморфная часть, а кристаллическая часть сохраняется. При этом довольно быстро падает степень полимеризации. Расщепление цепей по гликозидным связям сопровождаются реакциями дегидратации и окисления.

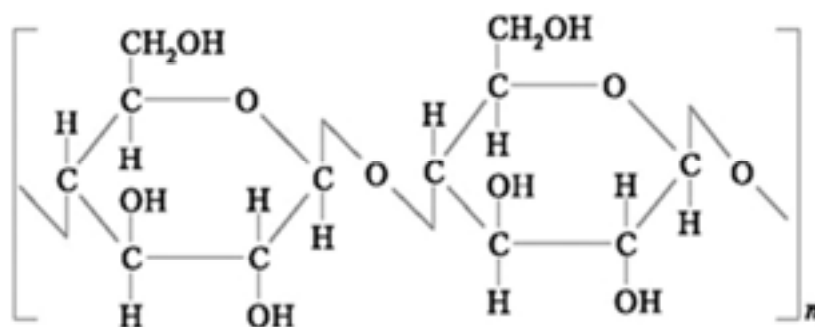


Рисунок 6.1 – Структурная формула целлюлозы

При дальнейшем повышении температуры до 270–280 °С и выше начинает разрушаться кристаллическая часть с образованием в качестве основного продукта деструкции левоглюкозана (рисунок 6.2).

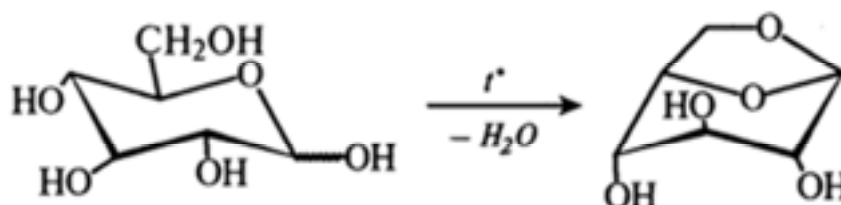


Рисунок 6.2 – Деструкция целлюлозы по гликозидной связи с образованием левоглюкозана

При дальнейшем повышении температуры свыше 320–350 °С из левоглюкозана образуется левоглюкозенон, 1,2-ангидроглюкопираноза и 1,4-ангидроглюкопираноза. При температуре около 340°С происходит полная аморфизация с потерей массы до 60 %. Затем начинается переход аморфизи-

рованной структуры целлюлозы в карбонизированную, формируется структура угля.

Поэтому при производстве композитов с растительными наполнителями необходимо применение антипиренов [76, 203, 218, 242, 270]. Наиболее распространенными замедлителями горения являются неорганические соединения, галогеносодержащие и фосфорсодержащие соединения. К неорганическим антипиренам относятся гидроокись алюминия, гидроокись магния, полифосфат аммония, красный фосфор и др. Эта группа составляет примерно 50 % от всего мирового производства замедлителей горения [263, 92]. Галогенсодержащие (хлор и бром) антипирены представляют наиболее значительную часть из всех замедлителей горения. В целом вся группа составляет около 25 % от мирового производства антипиренов. Фосфорорганические антипирены, в основном производные эфиров составляют примерно 20 % от всего мирового производства.

Основное действие неорганических антипиренов основано на усилении процессов коксообразования и дегидратации в конденсированной фазе, в результате чего уменьшается формирование горючих летучих продуктов в ходе термического разложения.

Наиболее подробно изучено действие фосфорсодержащих замедлителей горения на целлюлозу и материалы на ее основе. Л. Н. Машляковский с коллегами отмечают, что фосфорные добавки при термическом воздействии легко превращаются в фосфорную кислоту, которая образует сплошную стеклообразную пленку полифосфорной кислоты на поверхности горящего полимера, которая действует как барьер, препятствующий образованию теплоты, кислорода и топлива [101]. Кроме того, воздействие фосфорсодержащих антипиренов приводит к этерификации гидроксильных групп целлюлозы при высоких температурах, препятствуя выделению сильногорючего левоглюкозана.

При термическом воздействии на материал с галогеносодержащим антипиреном выделяется большое количество негорючих газов, снижающих со-

держание кислорода, а горение большинства веществ прекращается при снижении содержания кислорода в атмосфере защищаемого объекта до 12–15 %. Таким образом, огнезащита достигается воздействием на физические процессы, а именно замедляется диффузия кислорода к поверхности, горючие газы в зоне реакции разбавляются негорючими газообразными продуктами.

Галогенсодержащие добавки относятся к основным, или первичным замедлителям горения, но широко используются только хлор- и бромсодержащие добавки. По данным профессора В. И. Кодолова, замедление горения эффективно при добавлении аммонийных солей, особенно фторида аммония [76]. Имеется опыт использования фторида аммония в качестве наполнителя порошковых огнетушителей [87].

Тригидрат оксида алюминия (или тригидрат алюминия) является наиболее известным неорганическим замедлителем горения [79]. В начале XXI в. его свойства исследованы с использованием современных спектрометрических методов. В работе [281] выполнен термогравиметрический анализ данного антипирена, который показал, что материал имеет хорошую термическую стабильность, может выдержать температуру до 206 °С без деградации. В работе Planes E. [283] отмечено, что алюминий тригидрат является популярным антипиреном, потому что дешевый и нетоксичен.

Важной с экологической точки зрения проблемой является токсичность продуктов термического разложения антипиренов. Что касается тригидрата алюминия, его существенным преимуществом является то, что продукты разложения этого антипирена при горении содержащих его материалов не загрязняют окружающую среду. Исследования Leisewitz [260] подтвердили, что применение тригидрата алюминия не вызывает проблем с токсикологической точки зрения.

Кроме самых распространенных замедлителей горения, таких, как тригидрат алюминия, могут быть использованы карбонаты и карбамидосодержащие огнезащитные составы. Они начинают разлагаться в диапазоне температур 180...340 °С, при нагревании они обычно разлагаются эндотермически

и выделяют  $\text{H}_2\text{O}$ . В результате выделения воды уменьшается поток тепла и понижается температура в зоне пламенного горения. При термическом разложении карбонаты выделяют в газовую фазу диоксид углерода, это способствует уменьшению концентрации горючих газов в газовой смеси. В сравнении с фосфор- и галогенсодержащими замедлителями эффективность неорганических антипиренов меньше. Преимуществом неорганических замедлителей горения является то, что они менее токсичны. Поэтому их часто добавляют для снижения токсичности газообразных продуктов горения [76]. По данным Е. В. Анцупова и С. М. Родивилова [9], по активности ингибирующей горение способности соли натрия располагаются в следующей последовательности:

соли натрия:  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} > \text{NaHCO}_3 > \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaF}$ ;

карбонаты:  $\text{K}_2\text{CO}_3 > \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O} > \text{NaHCO}_3$ .

Таким образом, десятиводный карбонат натрия по эффективности следующий после тетрабората натрия.

Потеря массы за определенный период горения является важнейшей характеристикой горючести материалов, входящей во многие стандарты в качестве классификационного критерия [11]. Не менее важным показателем термостабильности материала является скорость потери массы при термолизе, позволяющая оценить процесс его термодеструкции. К современным методам определения показателей пожарной опасности твердых веществ, в том числе строительных материалов, относятся термический анализ и инфракрасная спектроскопия [127]. Применение этих методов для исследования процессов термоокисления материала дает возможность оценить выделение летучих продуктов распада, динамику потери массы, а также вид исследуемых огнезащитных средств [182, 6].

Использованный в настоящей работе метод дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) является современной разновидностью термического анализа и также получил широкое распространение для опре-

деления характеристик веществ и материалов, влияющих на их пожароопасные свойства [7]. В методе ДСК теплоту определяют через тепловой поток – производную теплоты по времени (отсюда в названии термин «дифференциальный»). Тепловые потоки измеряются по разнице температур в двух точках измерительной системы в один момент времени. В современных приборах предусмотрена возможность задавать различные температурные программы.

Одним из важных показателей, которые с большой точностью можно определить с использованием метода ДСК, является температура начала уменьшения массы ( $t_{н.у}$ ), соответствующая разнообразным физико-химическим процессам, происходящим в исследуемом образце: испарению, возгонке, термической деструкции. Эти процессы предваряют воспламенение.

Кроме того, на пожарную опасность веществ и материалов оказывают влияние скорость и характер (одно- и многоступенчатый) термического уменьшения массы.

По данным М. Rahman с коллегами, начало процесса термодеструкции хлопкового пуха соответствует температуре 300 °С, причем термостойкость хлопкового волокна повышается при его модифицировании перекисью водорода, уксусным ангидридом [285]. А. Н. Portella относит начальную потерю веса хлопкового наполнителя к интервалу 30...110 °С, а максимальную скорость разложения – к температуре 348 °С [215]. Работы исследователей еще раз подтверждают значимость влияния соотношения «лигнин-целлюлоза» на термостойкость материала. Т. Лоан относит начало деструкции лигнина лигноцеллюлозных волокон к области около 200 °С [298].

В качестве метода повышения термостабильности целлюлозных материалов традиционно применяют технологии ацетилирования [1]. В исследованиях Т. Зханга использован метод снижения горючести нетканого композита из хлопка и отходов сахарного тростника путем пластификации волокна ацетилирующими смесями, при этом интервал термического разложения

сдвигается до 250...370 °С, а максимальная скорость разложения до 600 °С [315].

Эффективными являются методы снижения горючести лигноцеллюлозных материалов путем использования фосфор- и кремнийорганических соединений [124], галоген- и азотсодержащих антипиренов, а также неорганических – боратов [25], фосфатов, гидратов оксидов металлов, азотсодержащих и комплексных соединений.

Снижает горючесть растительного наполнителя и щелочное модифицирование целлюлозных волокон. Обработка целлюлозных материалов щелочью (при концентрации 5 %) также повышает термическую стабильность материала за счет изменения кристаллической структуры целлюлозы [271]; однако, по данным В. И. Азарова, этот процесс возможен только при обработке высококонцентрированными растворами NaOH (10...16 %) [1].

Вопросы разработки новых композиционных строительных материалов с лигноцеллюлозными наполнителями [149] 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 исследовании были изготовлены композиционные плиты теплоизоляционного назначения из растительных отходов и разных связующих по технологии древесноволокнистых плит мокрого способа производства (по ГОСТ 4598–2018. Плиты древесноволокнистые) [46]. Для образцов плитных материалов определялись физико-механические показатели и потеря массы при горении.



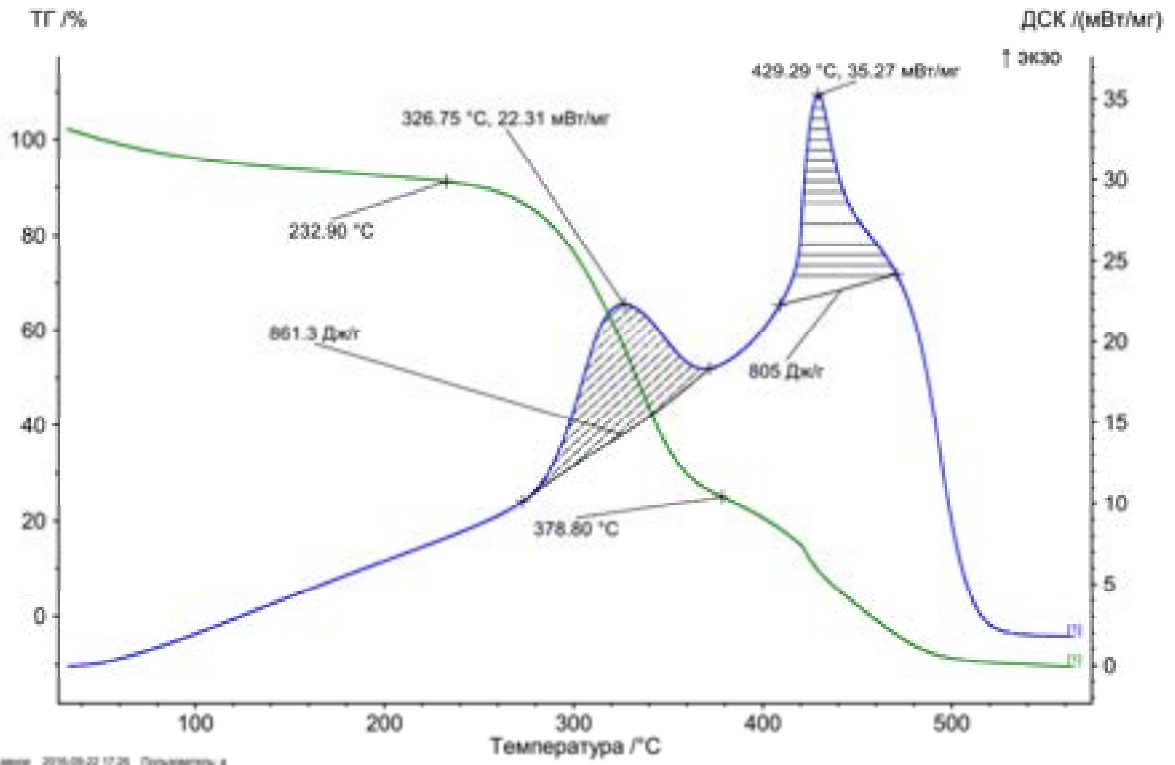
### **6.1.2. Термогравиметрический анализ растительных отходов и композиционных материалов на их основе**

Для получения информации о физических и химических процессах, протекающих при нагревании в материале наполнителя (растительные отходы), был использован метод дифференциально-сканирующей калориметрии. Термографические кривые снимали на установке синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3 Jupiter, совмещенной с приставкой ИК-Фурье. Термический анализ проводился в интервале 20...600 °С при скорости нагрева 10 °С/мин, масса испытуемых образцов составляла 1...5 мг.

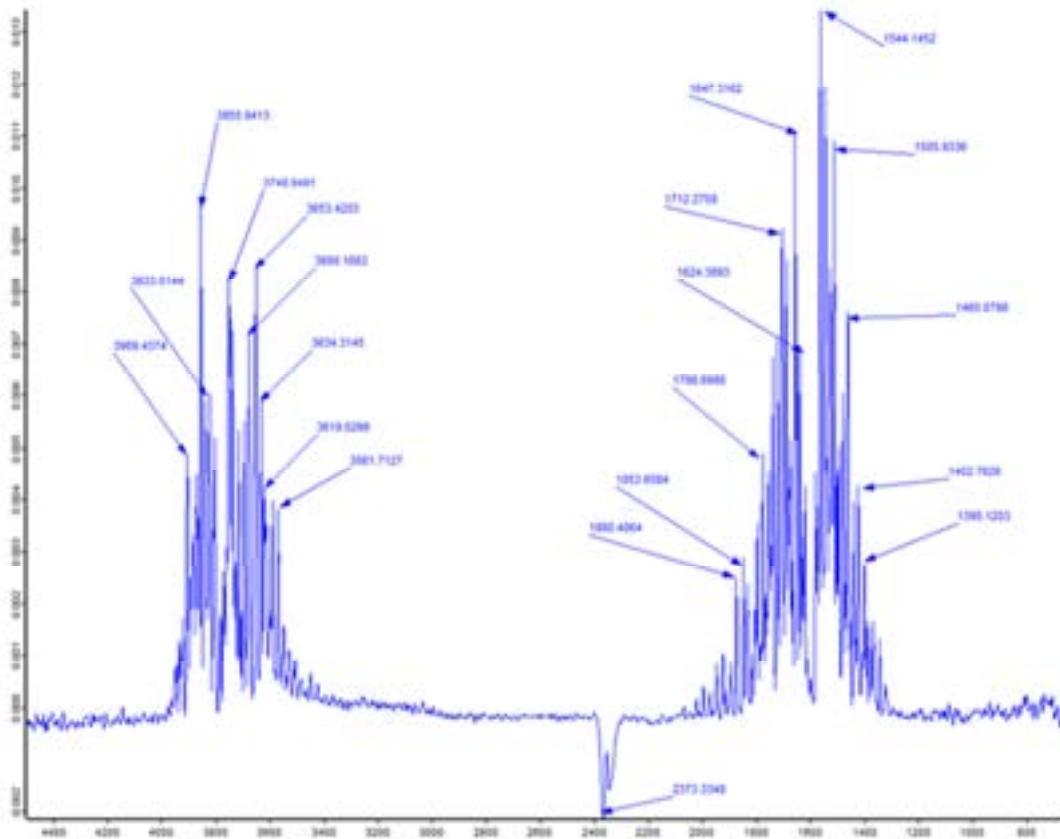
Разные виды отходов однолетников имеют различия в показателе термического сопротивления, поэтому необходимо проведение экспериментальных исследований пожароопасных свойств применительно к каждому конкретному виду растительного наполнителя композиционных материалов. Термический анализ материала дает возможность оценить выделение летучих продуктов распада и динамику потери массы [182, 6].

Результаты термического анализа отходов хлопкового и льняного волокон – кривые термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и ИК-спектры продуктов термолиза представлены на рисунках 6.3, 6.4. Результаты ИК-спектроскопии продуктов термолиза отходов хлопкового и льняного волокон – в таблицах 6.1, 6.2.

В интервале 50...232,9 °С (кривая ТГ отходов хлопкового волокна) идет удаление сорбционной влаги, потеря массы материала составляет 10 %. Наличие в ИК-спектре характеристической частоты около 1550 см<sup>-1</sup> свидетельствует о скелетных колебаниях С-С в ароматическом кольце ксилана, который активно распадается при температуре свыше 200 °С. Кроме удаления сорбционной влаги и термической деструкции гемицеллюлоз на потерю массы влияют начинающиеся в интервале 200...230 °С процессы деструкции аморфной части целлюлозы.

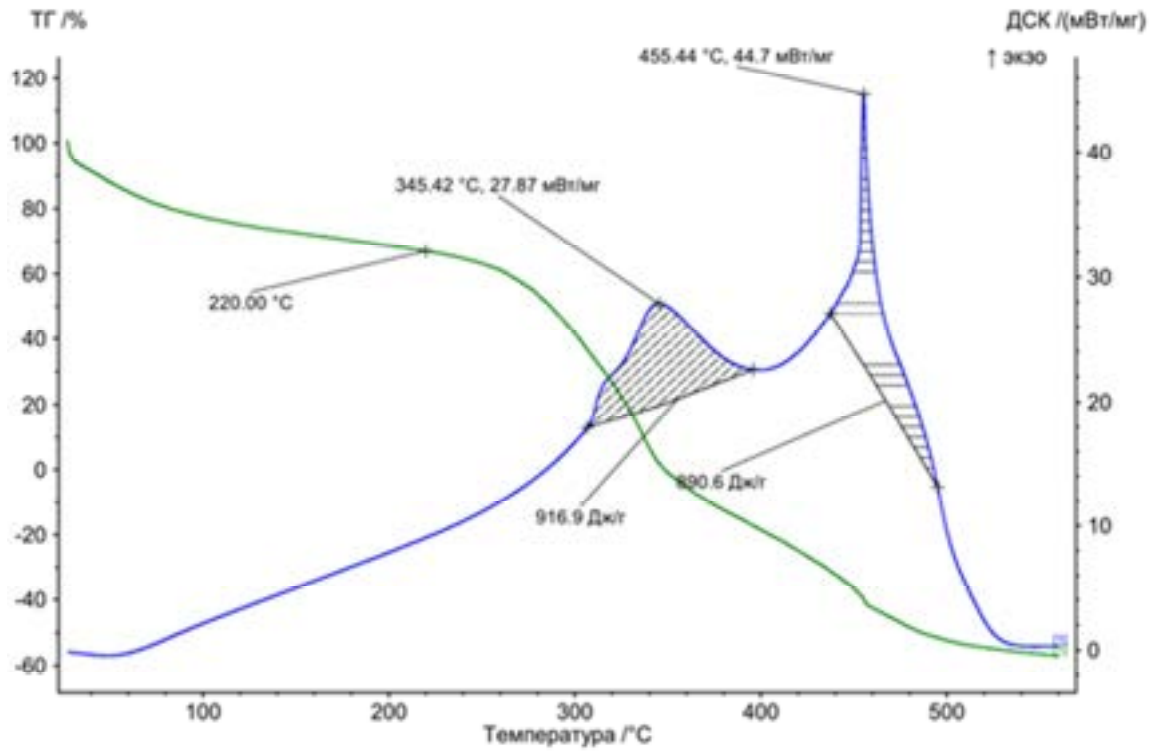


а

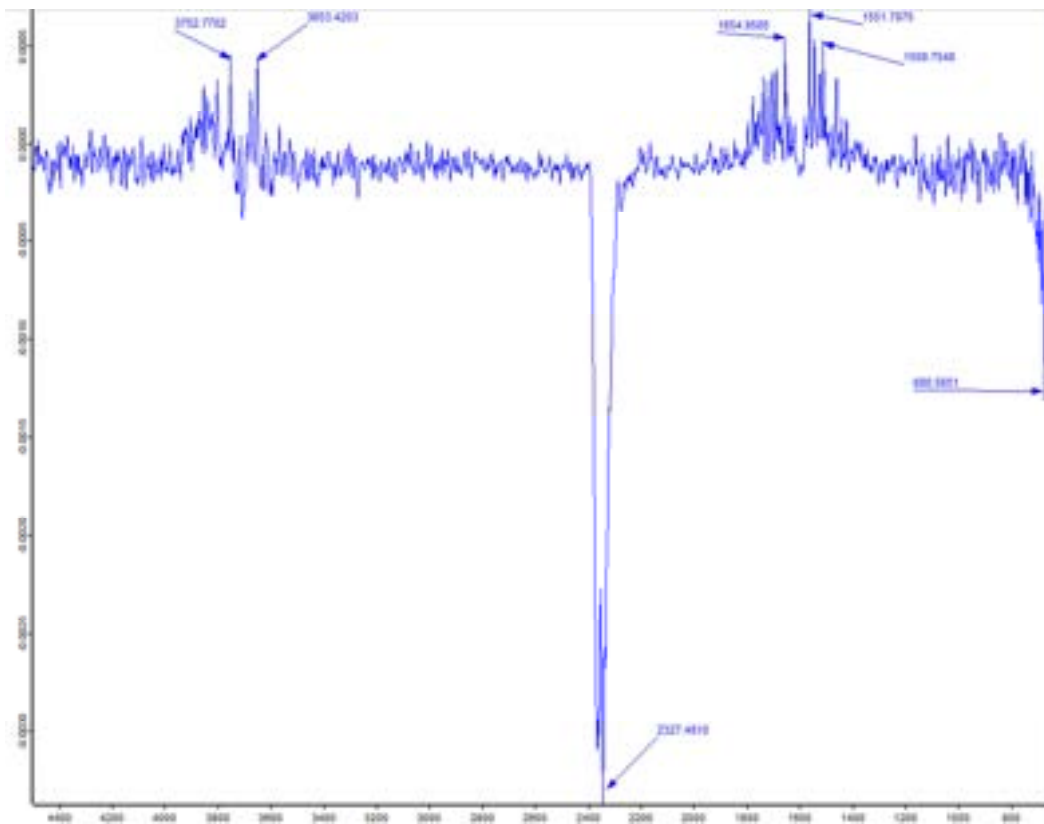


б

Рисунок 6.3 – Кривые продуктов термоллиза отходов хлопкового волокна: а – ТГ и ДСК; б – ИК-спектры



а



б

Рисунок 6.4 – Кривые продуктов термоллиза отходов льняного волокна: а – ТГ и ДСК; б – ИК-спектры

Таблица 6.1 – Полосы поглощения продуктов термоллиза отходов хлопкового волокна

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
3909,4374	0,0048	Свободные ОН-группы
3833,0144	0,0060	Свободные ОН-группы
3855,9413	0,0082	Свободные ОН-группы
3653,4203	0,0085	Свободные ОН-группы
3680,1683	0,0071	Свободные ОН-группы
3634,3145	0,0059	Свободные ОН-группы
3619,0299	0,0042	Свободные ОН-группы
3561,7127	0,0038	Свободные ОН-группы
2373,3348	- 0,002	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1995,1203	0,0028	Несопряженные колебания С=С
1880,4064	0,0025	Несопряженные колебания С=С
1853,6584	0,0030	Несопряженные колебания С=С
1788,6988	0,0050	Несопряженные колебания С=С
1712,2758	0,0093	Несопряженные колебания С=С
1647,3162	0,0110	Несопряженные колебания С=С
1624,3893	0,0071	Несопряженные колебания С=С
1544,1452	0,0135	Скелетные колебания С-С в ароматическом кольце ксилана
1505,9336	0,0109	Скелетные колебания С-С в ароматическом кольце ксилана
1460,0798	0,0077	С-ОН
1402,7626	0,0044	С-ОН

Таблица 6.2 – Полосы поглощения продуктов термоллиза отходов льняного волокна

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
3752,7702	0,0004	Свободные ОН-группы
3653,4203	0,0004	Свободные ОН-группы
2327,4810	- 0,003	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1654,9585	0,00051	Несопряженные колебания С=С
1551,7875	0,0007	Скелетные колебания С-С в ароматическом кольце ксилана
1509,7548	0,0005	Скелетные колебания С-С в ароматическом кольце ксилана
680,5651	-0,0014	CO <sub>2</sub> с деформационными колебаниями молекулы

При дегидратации идет расщепление цепей целлюлозы по гликозидным связям и частичный распад глюкопиранозных звеньев, о чем свидетельствует образование  $\text{CO}_2$ , причем проявляются и асимметричные колебания связей О-С-О отходов хлопкового волокна ( $2373 \text{ см}^{-1}$ ) отходов льняного волокна ( $2327$ ) и деформационные колебания отходов льняного волокна ( $680 \text{ см}^{-1}$ ).

В спектре продуктов термолиза отходов хлопкового волокна менее выражена интенсивность поглощения асимметричных валентных колебаний  $\text{CO}_2$  (таблица 6.1) и отсутствует пик с деформационными колебаниями молекулы. Это может объяснять наличие большого количества минеральных веществ в отходах хлопка, вызванное загрязнением в процессах сбора и транспортировки отходов.

Первый экзотермический пик при температуре  $326,75 \text{ }^\circ\text{C}$  характеризует удельную теплоту процесса термолиза  $861,3 \text{ Дж/г}$ . Данный пик свидетельствует о фазовом превращении – начале декристаллизации, т.е. разрушении кристаллической части целлюлозы. Интенсивное термическое разложение хлопкового волокна характеризуется максимальным углом наклона кривой потери массы ТГ.

При температуре около  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  (рисунок 6.3) происходит полная аморфизация целлюлозы отходов хлопкового волокна с потерей массы около 50%. Первый пик характеризует поверхностное воспламенение материала. Вторым пиком интенсивности термического разложения в области температур около  $429,29 \text{ }^\circ\text{C}$ . Он обусловлен продвижением фронта термолиза вглубь материала. Начинается переход аморфизированной целлюлозы в карбонизированную. Формируется структура угля. Вторым периодом термического разложения сопровождается удельной теплотой термического разложения  $805 \text{ Дж/г}$ , снижением энтальпии системы и переходом в новое равновесное состояние. Вторым периодом термического разложения характеризуется полной деструкцией отходов хлопкового волокна.

При нагревании отходов хлопкового волокна целлюлоза пластифицируется, ее цепи приобретают сегментальную подвижность. Поэтому полоса валентных колебаний свободных ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных Н-связях (в области  $4000...3000\text{ см}^{-1}$ ), которая практически отсутствует в спектре целлюлозы, в спектре продуктов термолиза отходов льняного волокна имеет высокую интенсивность поглощения. Деформационные колебания связей в молекулах Н-О-Н обусловлены удалением в процессе термолиза прочно связанной воды.

Деформационные колебания групп  $\text{CH}_2$  в области  $1400...1500\text{ см}^{-1}$  вызваны структурными превращениями групп, чувствительных к окислению. ИК-спектр термолиза отходов хлопкового волокна характеризует происходящие при нагреве химические изменения компонентов хлопка – реакции дегидратации, окисления и термической деструкции.

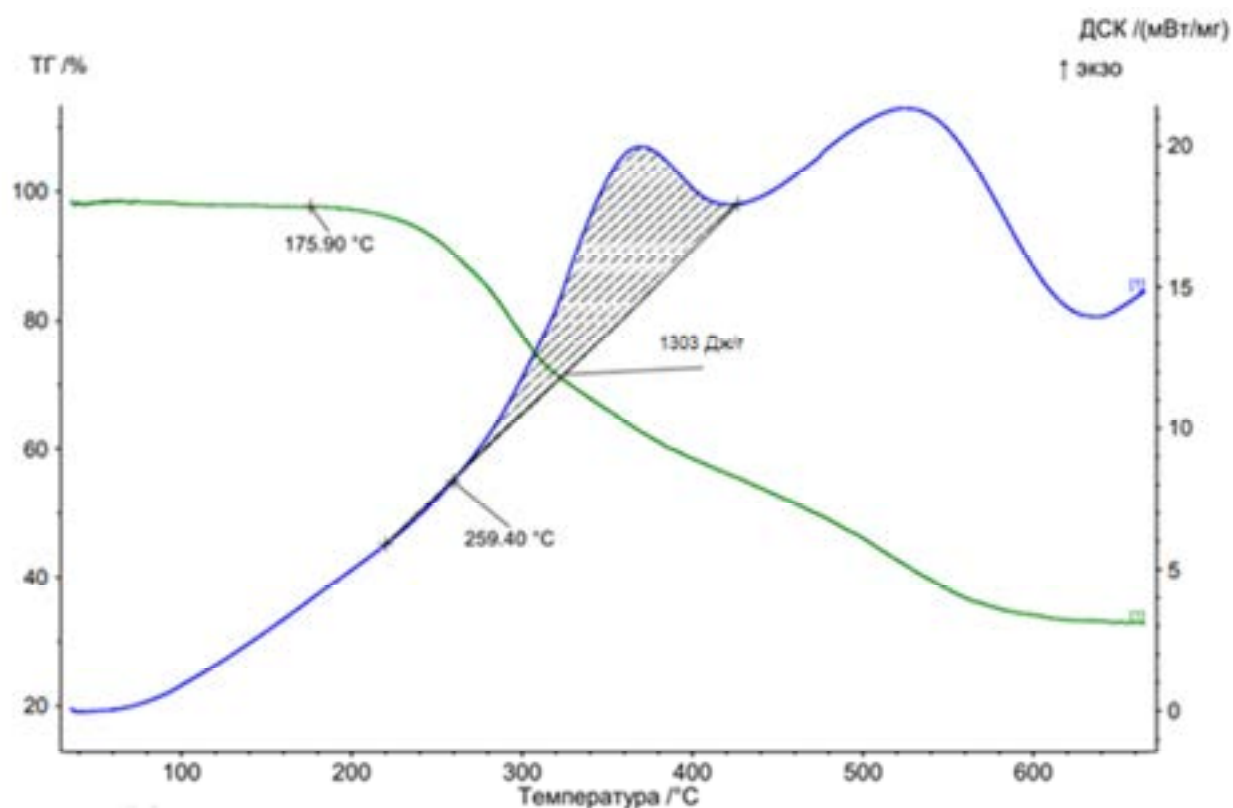
Процесс термолиза отходов льняного волокна имеет те же закономерности, что и для отходов хлопкового волокна, но удельная теплота процесса намного выше для обоих периодов ( $916,9\text{ Дж/г}$  и  $890,6\text{ Дж/г}$ ). Температура первого пика термического разложения отходов выше на  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , чем для отходов хлопкового волокна, что, возможно, обусловлено меньшим размером дискретных частиц, но при этом выше температура второго пика из-за наличия большого количества минеральных веществ в отходах.

ТГ и ДСК анализ отходов растительных материалов позволяет сделать вывод, что включение в композицию высокогорючих отходов значительно повышает пожароопасные свойства материала.

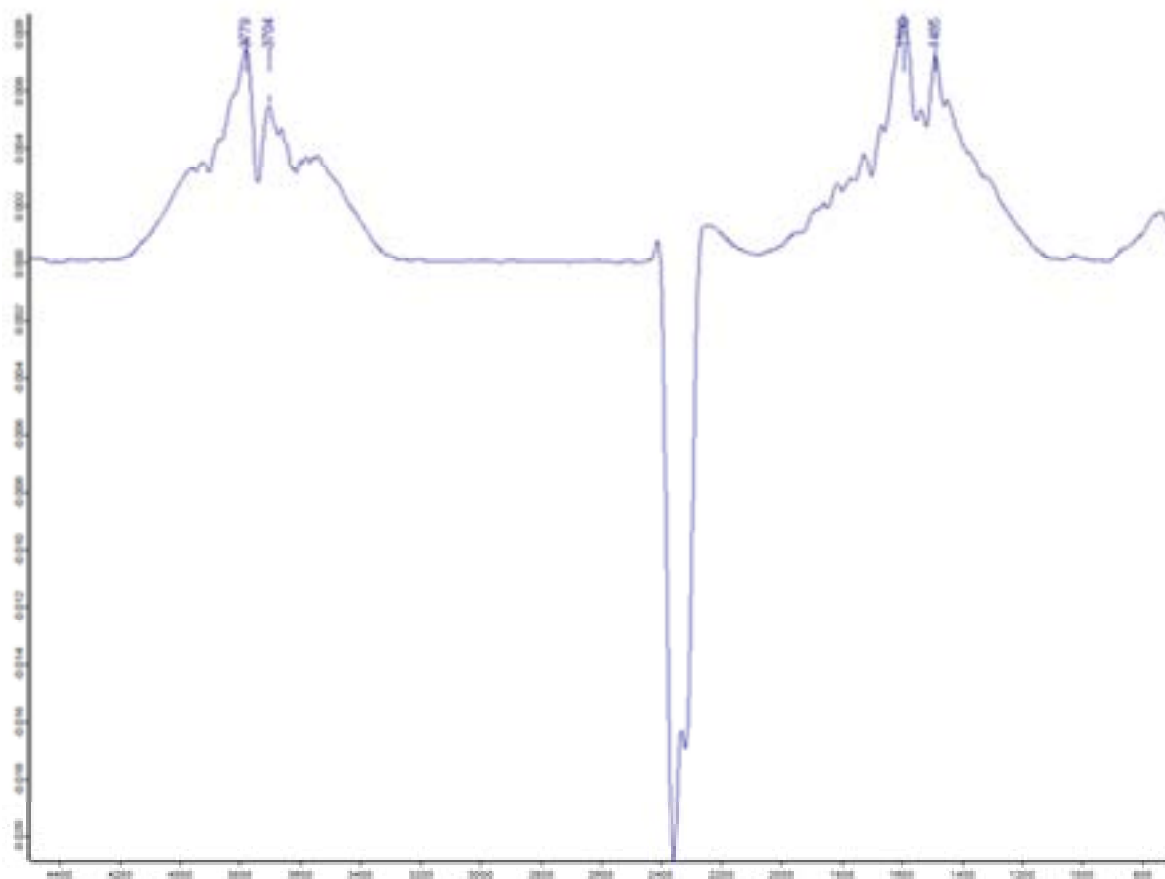
Результаты термического анализа композитов из отходов льняного волокна на основе синтетических и неорганическим связующих без добавки антипирена – кривые термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии и ИК-спектры продуктов термолиза представлены на рис. 6.5 – 6.8. Результаты ИК-спектроскопии продуктов термолиза композита из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего без добавки антипирена – в таблицах 6.3–6.6.

При использовании синтетических и минеральных связующих тепловой эффект реакции термолитиза композитов снижается. Это объясняется негорючими свойствами связующих. Полиметиленафенолы относятся к числу наиболее термостойких полимеров [93]. При длительном нагревании при температурах до 200 °С даже в присутствии кислорода воздуха в полимере не наблюдается никаких изменений. От 20 до 250 °С свойства полимера изменяются незначительно, и только выше 250–300 °С происходит резкое изменение состава. Термическая деструкция феноло-формальдегидных полимеров сопровождается выделением различных газообразных продуктов ( $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и т.д.) и образованием коксового остатка.

Тем не менее, остается задача повышения огнезащитности композитов.



а



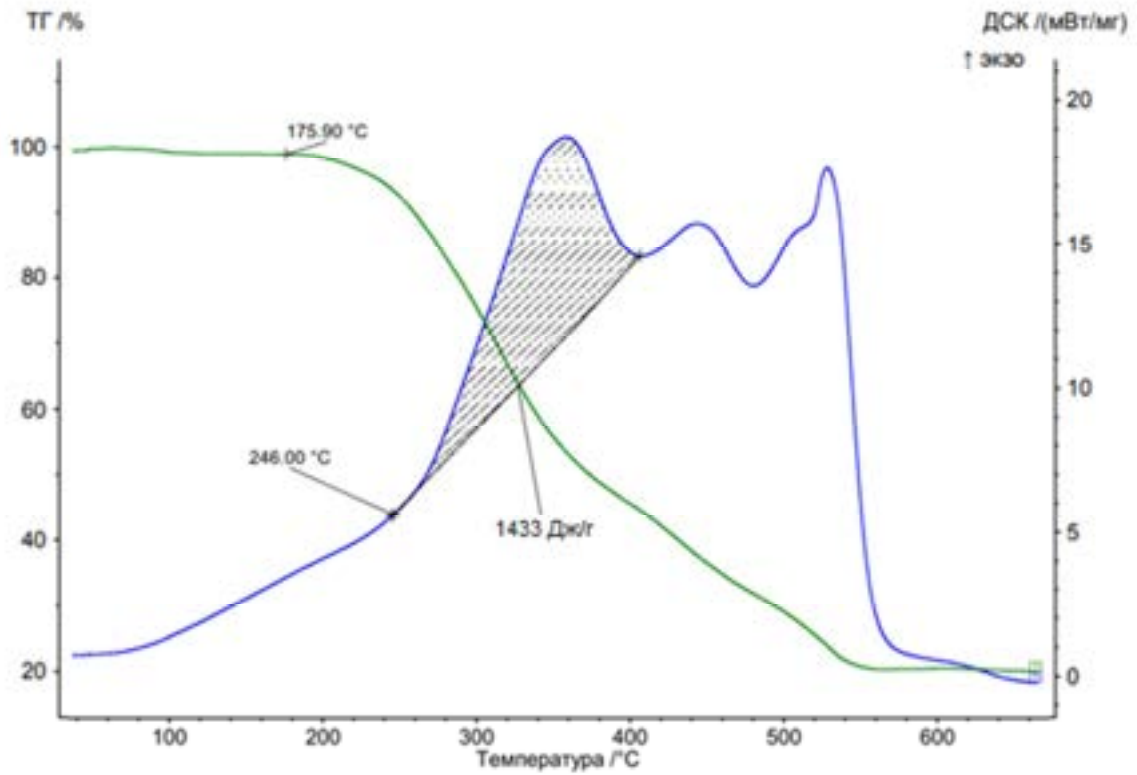
б

Рисунок 6.5 – Кривые композита из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего без добавки антипирена: а – ТГ и ДСК; б – ИК

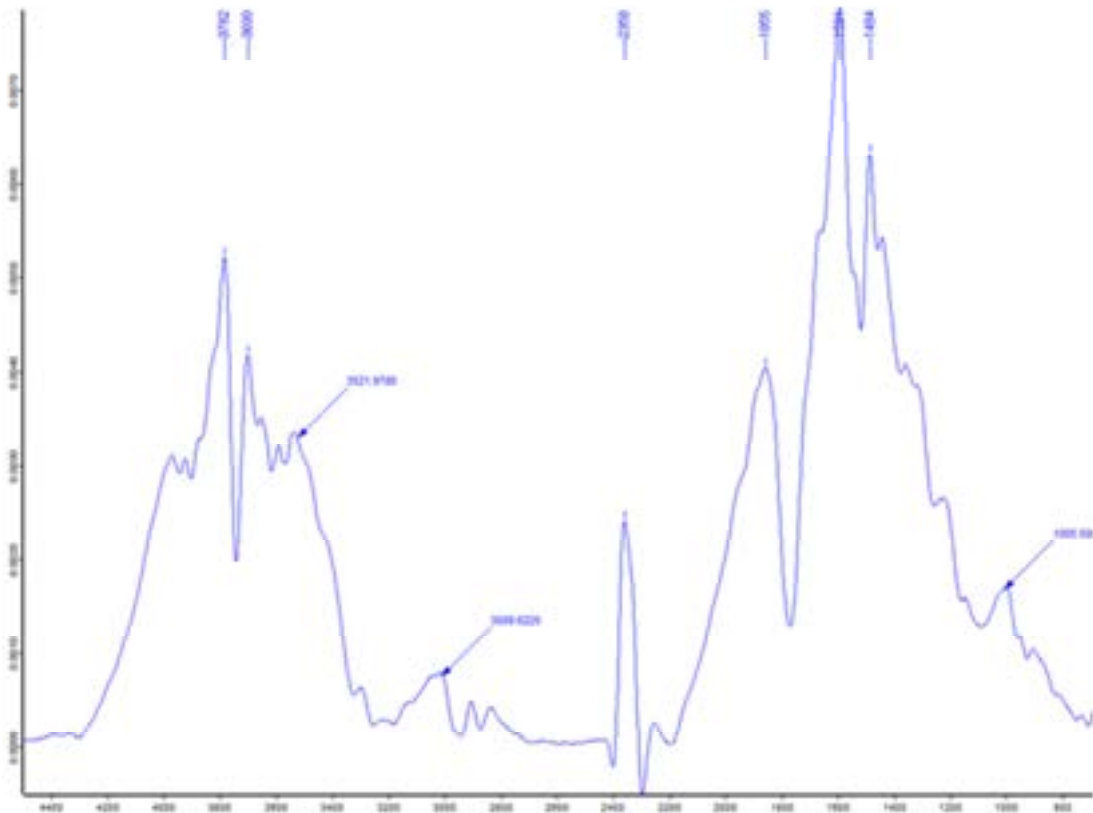
Таблица 6.3 – Полосы поглощения продуктов термоллиза композита из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего без добавки антипирена

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
3739	0,0076	Свободные ОН-группы
3704	0,0050	Свободные ОН-группы
2350	- 0,020	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1600	0,009	Несопряженные колебания С=С
1624,3893	0,0071	Несопряженные колебания С=С
1485	0,0070	С-ОН





а



б

Рисунок 6.6 – Кривые композитов из отходов льняного волокна на основе жидкого стекла без добавки антипирена: а – ТГ и ДСК; б – ИК

В интервале 50...179,7 °С (кривая ТГ композита из отходов льняного волокна) (рисунок 6.5) происходит снижение потери массы композита в сравнении с отходами льняного волокна и составляет менее 10 %. Процессы деструкции аморфной части целлюлозы аналогичны как для отходов льняного волокна в интервале 200...230 °С.

Таблица 6.4 – Полосы поглощения продуктов термоллиза композита из отходов льняного волокна на основе жидкого стекла без добавки антипирена

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
3782	0,0053	Свободные ОН-группы
3600	0,0042	Свободные ОН-группы
3521	0,0034	Свободные ОН-группы
3009	0,0008	Свободные ОН-группы
2358	0,0025	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1855	0,0042	Несопряженные колебания С=С
1591	0,0071	Несопряженные колебания С=С
1484	0,0065	С-ОН
1006	0,0018	С-ОН

Таблица 6.5 – Полосы поглощения продуктов термоллиза композита из отходов льняного волокна на основе фенолформальдегидного связующего без добавки антипирена

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
3781	-0,0004	Свободные ОН-группы
2416	- 0,0070	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1971	-0,0004	Несопряженные колебания С=С
1566	-0,00045	Скелетные колебания С-С в ароматическом кольце ксилана
607	-0,0005	CO <sub>2</sub> с деформационными колебаниями молекулы

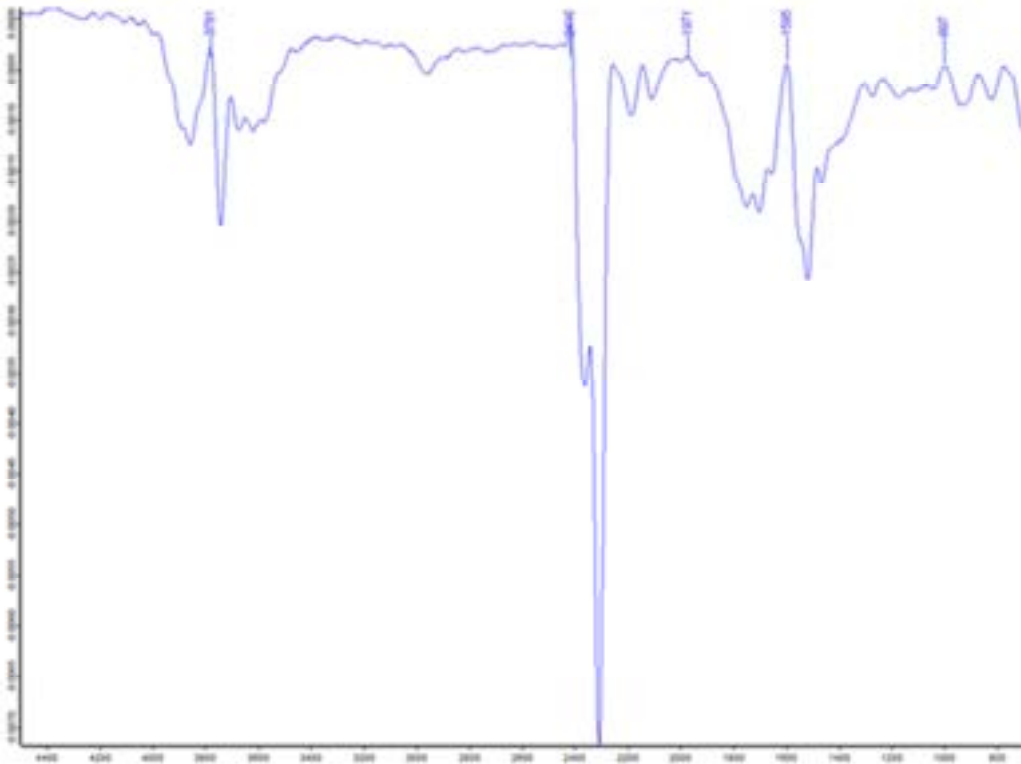
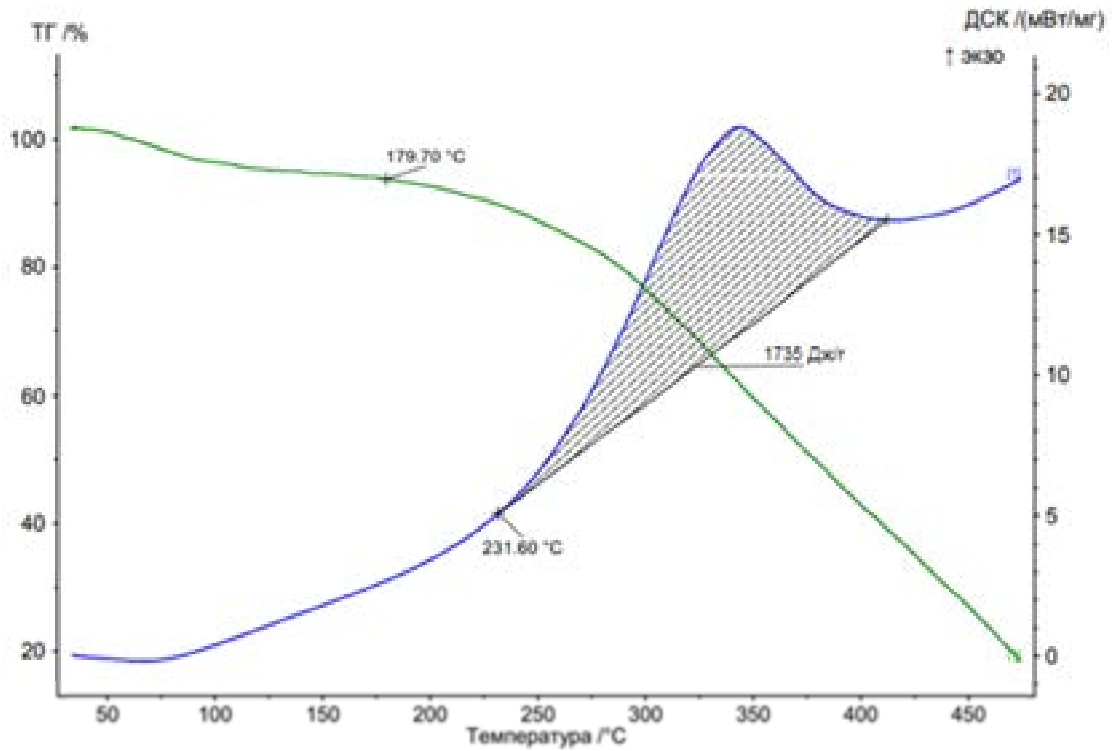
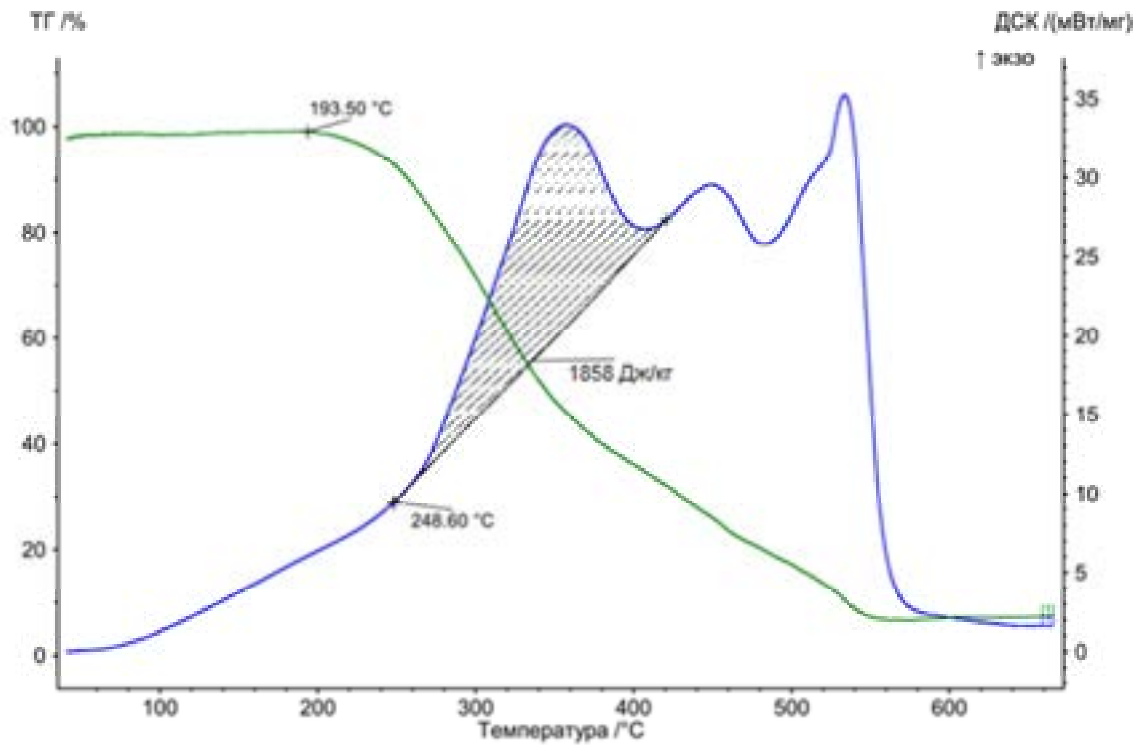
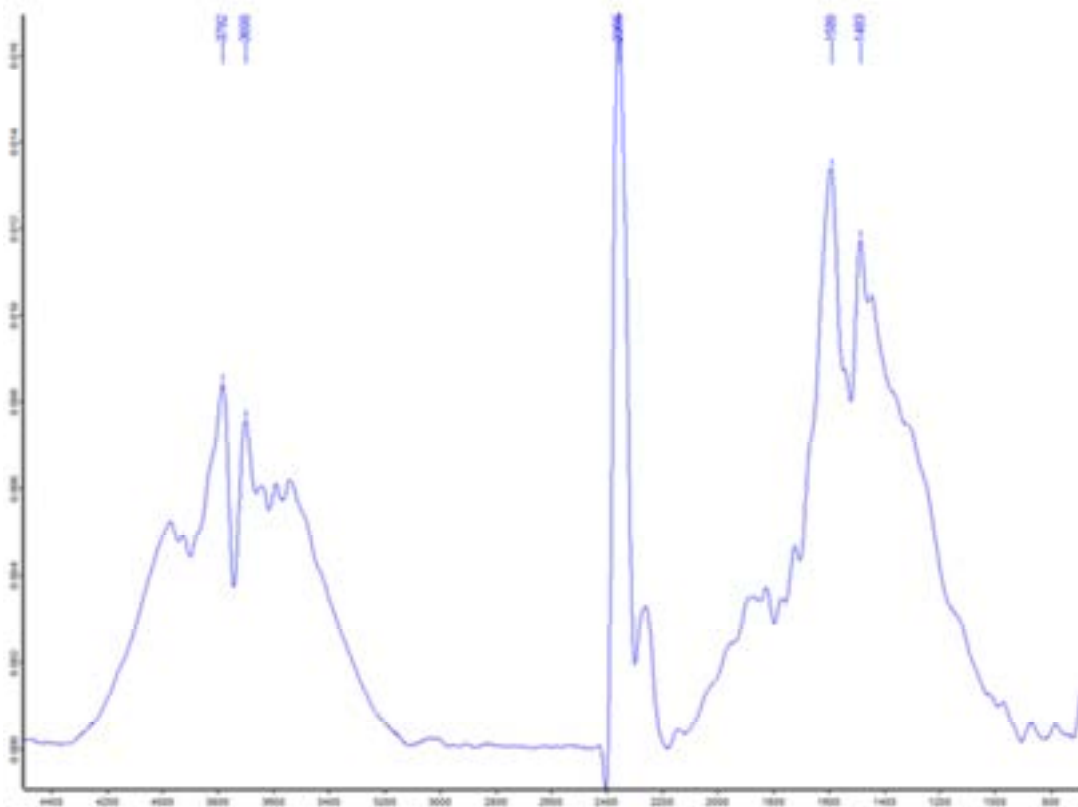


Рисунок 6.7 – Кривые ИК, ТГ и ДСК композитов из отходов льняного волокна на основе фенолформальдегидного связующего без добавки антипирена



а



б

Рисунок 6.8 – Кривые ИК, ТГ и ДСК композитов из отходов льняного волокна на основе карбамидоформальдегидного связующего без добавки антипирена

Таблица 6.6 – Полосы поглощения продуктов термоллиза композита из отходов льняного волокна на основе карбаминоформальдегидного связующего без добавки антипирена

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
3782	0,0082	Свободные ОН-группы
3699	0,0075	Свободные ОН-группы
2366	0,016	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1589	0,0135	Несопряженные колебания C=C
1483	0,012	C-ОН

При использовании алюмохромфосфатного связующего композита из отходов льняного волокна тепловой эффект реакции термоллиза снижается до 1303 Дж/г (в 1,4 раза меньше, чем эффект термоллиза отходов льняного волокна). Снижение теплового эффекта присутствует и для других композитов из отходов льняного волокна на синтетических и неорганических связующих.

Анализ термограмм ДСК показывает, что все образцы композитов имеют схожий характер термического разложения.

На всех термограммах регистрируются один экзотермический пик в интервале температур от 350 до 370°C. Температура начала их интенсивного разложения наблюдается при 231,6 < 246,0 < 248,6 < 259,4°C. Количество выделившегося при этом тепла составило 1303 < 1433 < 1735 < 1858 Дж/г. ТГ-кривые исследуемых образцов имеют схожий характер, и анализ полученных результатов представлен в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Результаты термогравиметрического анализа композитов из отходов льняного волокна на основе связующих без добавки антипирена

Композиционный материал	Потеря массы Δm, % в интервале температур					
	50–200	201–300	301–400	401–450	451–500	501–600
АХФ	5	22	40	45	50	68
ЖС	1	24	55	60	70	80
ФФС	7	22	55	72	-	-
КФС	1	30	65	72	82	90

В процессе экзотермической реакции у композита из отходов льняного волокна на основе карбаминоформальдегидного связующего наблюдается

наибольшая потеря по массе –90%. У композита из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего наблюдается наименьшая потеря по массе – до 68%.

## **6.2. Методика определения показателей горючести**

В соответствии с нормативными требованиями (ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть) [52], испытания проводились в установке «керамический короб» по ГОСТ Р 53292–2009 [49].

Образцы изготавливали в виде прямоугольных брусков с поперечным сечением 30х60 мм и длиной вдоль волокон 150 мм с влажностью 8–15%, отклонение от размеров не должно превышать 1 мм. Испытания проводили не менее чем на 10 образцах в вытяжном шкафу с принудительной вентиляцией, скорость движения воздуха не более 5 м/с. Керамический короб (рисунок 6.9) переводят в горизонтальное положение и зажигают газовую горелку, устанавливая высоту пламени от 15 до 25 см. После этого керамический короб возвращают в вертикальное положение, переводят зонтик в рабочее положение над коробом и регулируют расход газа так, чтобы температура, регистрируемая термоэлектрическим преобразователем, в течение 5 минут была равна  $(200\pm 5)$  °С, после чего фиксируют значение величины расхода газа в л/ч по показаниям ротаметра. Дополнительное регулирование температуры может осуществляться путем регулирования подачи воздуха в зону горения материала с помощью створок металлической подставки. Зонтик отводят, испытываемый образец, закрепленный в держателе, опускают в керамический короб, одновременно включают секундомер и возвращают зонтик в рабочее положение. Образец держат в пламени горелки в течение 2 минут. Расход газа в процессе испытания должен быть постоянным. Через 2 минуты подачу газа в горелку прекращают, образец оставляют в приборе для остывания.

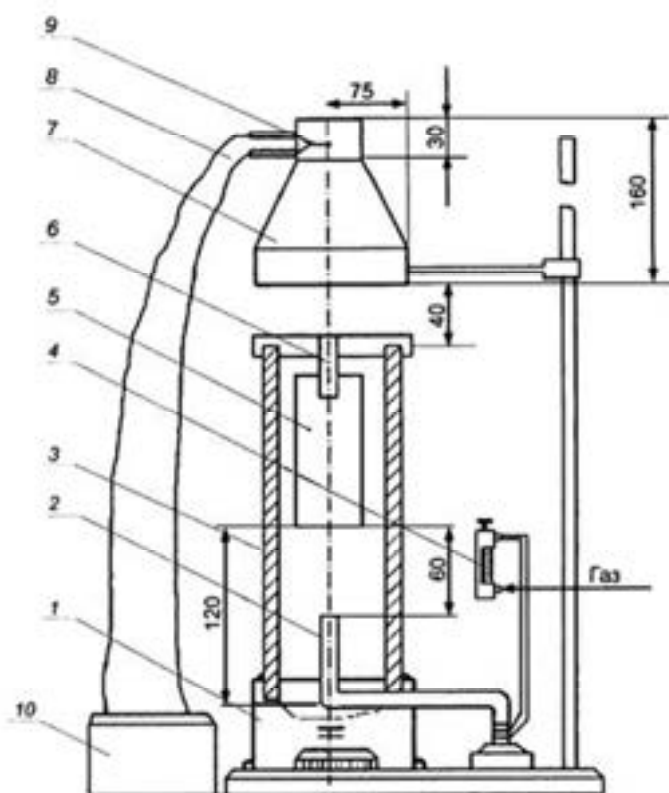


Рисунок 6.9 – Установка "Керамический короб": 1 – подставка; 2 – газовая горелка; 3 – керамический короб; 4 – ротаметр; 5 – образец; 6 – держатель образца; 7 – зонт; 8 – термоэлектрический преобразователь; 9 – верхний патрубок зонта; 10 – автоматический потенциометр

После остывания (температура отходящих газов в верхнем патрубке зонта равна комнатной) оставшуюся часть образца извлекают из керамического короба и взвешивают, результат округляют до 0,1 г.

Степень повреждения испытанного образца по массе при горении  $\Delta m$ , %, вычисляют

$$\Delta m = \frac{(m_{1i} - m_{2i}) \cdot 100}{m_{1i}}, \quad (6.1)$$

где  $m_{1i}$  - масса образца до испытания, г;

$m_{2i}$  - масса образца после испытания, г;

i - номер образца.

Определялись нормируемые характеристики горючести материалов – степень повреждения образцов по массе при горении и температура дымовых газов определялись согласно ФЗ 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [166] по результатам испытаний в установке для испытаний строительных материалов на горючесть (керамическая труба) (таблица 6.8).

Таблица 6.8 – Параметры и группы горючести материалов

Группа горючести	Параметры горючести			
	Температура дымовых газов, °С	Степень повреждения по длине, %	Степень повреждения по массе, %	Продолжительность самостоятельного горения, с
Г1	≤ 135	≤ 65	≤20	0
Г2	≤ 235	≤ 85	≤50	≤30
Г3	≤ 450	>85	≤50	≤300
Г4	>450	>85	>50	>300

### 6.3. Результаты определения показателей горючести композиционных материалов

Результаты определения показателей приведены в таблице 6.9. Результаты определения соответствия образцов композита группе горючести по показателям: температура дымовых газов, степень повреждения по массе, продолжительность самостоятельного горения выделены цветом в таблице: слабогорючие (Г1), умеренногорючие (Г2), нормальногорючие (Г3), сильногорючие (Г4).



Таблица 6.9 – Результаты определения минимальных и максимальных значений степени повреждения по массе при горении  $\Delta m$ , % и температуры дымовых газов  $T$ , °C образцов на разных связующих без добавки антипирена

Композиционный материал	Без добавки связующего	Вид связующего							
		КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
		$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max
без добавки мягких отходов древесины	<u>87,1(536)</u> 89,4(634)	<u>63,9(354)</u> 67,8 (416)	<u>87,0(535)</u> 88,5(623)	<u>61,7(341)</u> 65,4(393)	<u>85,0(515)</u> 86,3(601)	<u>59,4(332)</u> 63,2(370)	<u>82,8(493)</u> 84,1(579)	<u>57,2(321)</u> 61,1(355)	<u>80,6(471)</u> 82,0(558)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>88,4(547)</u> 90,7(645)	<u>65,0(360)</u> 68,9(427)	<u>88,1(546)</u> 89,6(634)	<u>63,1(351)</u> 66,7(405)	<u>86,2(526)</u> 87,6(614)	<u>60,6(338)</u> 64,5(382)	<u>84,1(506)</u> 85,5(593)	<u>58,9(329)</u> 62,6(364)	<u>82,1(486)</u> 83,6(574)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>89,7(562)</u> 92,0(658)	<u>66,3(366)</u> 70,0(438)	<u>89,2(557)</u> 90,8(646)	<u>64,6(358)</u> 68,1(419)	<u>87,7(542)</u> 89,1(629)	<u>62,0(345)</u> 65,9(397)	<u>85,5(520)</u> 86,8(606)	<u>60,5(337)</u> 64,2(380)	<u>83,7(502)</u> 85,3(591)

Продолжение таблицы 6.9

Композиционный материал	Без добавки связующего	Вид связующего							
		КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
		$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>89,1(556)</u> 91,5(653)	<u>65,4(362)</u> 69,1(429)	<u>88,6(551)</u> 90,0(638)	<u>63,8(354)</u> 67,5(413)	<u>86,8(533)</u> 88,2(620)	<u>61,2(341)</u> 65,0(388)	<u>84,6(511)</u> 86,0(598)	<u>59,7(333)</u> 63,5(372)	<u>83,0(495)</u> 84,5(583)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>90,5(570)</u> 92,7(665)	<u>66,8(368)</u> 70,6(441)	<u>90,0(565)</u> 91,4(652)	<u>65,3(361)</u> 68,9(427)	<u>88,4(549)</u> 89,9(637)	<u>62,5(347)</u> 66,4(402)	<u>86,0(525)</u> 87,3(611)	<u>61,2(341)</u> 64,9(387)	<u>84,4(509)</u> 85,9(597)
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>89,2(557)</u> 91,6(654)	<u>65,6(363)</u> 69,5(433)	<u>88,8(553)</u> 90,2(640)	<u>63,9(354)</u> 67,5(413)	<u>87,0(535)</u> 88,5(623)	<u>61,3(341)</u> 65,2(390)	<u>84,8(513)</u> 86,1(599)	<u>60,6(338)</u> 64,1(379)	<u>83,7(502)</u> 85,2(590)

Окончание таблицы 6.9

Композиционный материал	Без добавки связующего	Вид связующего							
		КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
		$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>90,1(565)</u>	<u>67,4(372)</u>	<u>89,7(562)</u>	<u>65,0(360)</u>	<u>88,2(547)</u>	<u>62,8(349)</u>	<u>86,3(528)</u>	<u>61,5(342)</u>	<u>84,6(511)</u>
	92,4(660)	71,3(451)	91,1(649)	68,5(423)	89,5(633)	66,7(405)	87,6(616)	64,9(387)	86,1(599)
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	<u>89,7(562)</u>	<u>66,7(368)</u>	<u>89,0(555)</u>	<u>64,3(356)</u>	<u>87,4(539)</u>	<u>62,1(345)</u>	<u>85,7(522)</u>	<u>61,0(340)</u>	<u>84,0(505)</u>
	92,1(659)	70,6(441)	90,6(644)	68,0(418)	88,8(626)	66,0(398)	87,0(608)	64,4(382)	85,6(594)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	<u>91,0(575)</u>	<u>68,9(379)</u>	<u>90,5(570)</u>	<u>65,9(364)</u>	<u>88,9(554)</u>	<u>63,7(353)</u>	<u>87,4(539)</u>	<u>62,6(348)</u>	<u>85,6(521)</u>
	93,2(670)	72,7(465)	92,1(659)	69,4(432)	90,4(642)	67,6(414)	88,6(624)	66,0(398)	87,1(609)

\* Над чертой для плит из хлопка; \*\* под чертой для плит из льна

Добавка связующего повышает огнезащищенность композиционных материалов в сравнении с материалом без применения связующего. Однако, испытание показало, что без веществ, замедляющих горение, композиционные плитные материалы из отходов хлопка, льна, мягких отходов древесины на основе синтетических и неорганических связующих относятся к группе горючести Г3, Г4.

Увеличение доли добавки связующего положительно сказывается на показателях горючести композитов. Интервалы снижения степени повреждения по массе при горении в «керамическом коробе» образцов материала из отходов производства хлопковых и льняных волокон и древесной стружки представлен в таблице 6.10.

Максимальное снижение степени повреждения по массе при горении соответствует для композиционных материалов из отходов прядения льна (1,46) и хлопка (1,52) на алюмохромфосфатном связующем. Минимальное снижение степени повреждения по массе при горении соответствует для композиционных материалов из отходов прядения льна (1,28) и хлопка (1,32) с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород на карбамидоформальдегидном связующем.

Для обеспечения показателей горючести групп Г2, Г1 необходимо применение антипиренов. Таким образом, необходима разработка рациональных путей снижения пожарной опасности разрабатываемых композиционных плитных материалов на основе растительных отходов.

Таблица 6.10 – Результаты определения повреждения по массе при горении композиционных плит

Композиционный материал	Интервалы снижения степени повреждения по массе при горении плитных материалов для видов связующего			
	КФС	ФФС	ЖС	АХФ
без добавки мягких отходов древесины	<u>1,00...1,36</u>	<u>1,02...1,41</u>	<u>1,05...1,46</u>	<u>1,08...1,52</u>
	1,01...1,31	1,04...1,36	1,06...1,41	1,09...1,46
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>1,00...1,36</u>	<u>1,02...1,40</u>	<u>1,05...1,46</u>	<u>1,07...1,50</u>
	1,01...1,32	1,03...1,36	1,06...1,40	1,08...1,45
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>1,01...1,35</u>	<u>1,02...1,39</u>	<u>1,05...1,45</u>	<u>1,07...1,48</u>
	1,01...1,31	1,03...1,35	1,06...1,39	1,07...1,43
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>1,00...1,36</u>	<u>1,02...1,39</u>	<u>1,05...1,45</u>	<u>1,07...1,49</u>
	1,01...1,32	1,04...1,36	1,06...1,41	1,08...1,44
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>1,00...1,35</u>	<u>1,02...1,38</u>	<u>1,05...1,44</u>	<u>1,07...1,48</u>
	1,01...1,31	1,03...1,34	1,06...1,39	1,08...1,42
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>1,00...1,36</u>	<u>1,02...1,40</u>	<u>1,05...1,45</u>	<u>1,06...1,47</u>
	1,01...1,32	1,03...1,36	1,06...1,40	1,07...1,43
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>1,00...1,34</u>	<u>1,02...1,38</u>	<u>1,04...1,43</u>	<u>1,06...1,46</u>
	1,01...1,30	1,03...1,35	1,05...1,38	1,07...1,42
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	<u>1,01...1,34</u>	<u>1,02...1,39</u>	<u>1,04...1,44</u>	<u>1,06...1,47</u>
	1,01...1,30	1,03...1,35	1,05...1,39	1,07...1,43
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	<u>1,00...1,32</u>	<u>1,02...1,38</u>	<u>1,04...1,43</u>	<u>1,06...1,45</u>
	1,01...1,28	1,03...1,34	1,05...1,38	1,07...1,41

#### **6.4. Разработка рекомендаций по снижению горючести композиционных плитных материалов из отходов производства растительных волокон путем добавки антипиренов**

Для предотвращения распространения пожара в зданиях и сооружениях с теплоизоляционными целлюлозосодержащими материалами применяются огнезащитные средства, различающиеся и по способу применения, и по механизму огнезащиты. Конструктивная огнезащита (обмазки, теплоотражающие покрытия) технологически наиболее просто реализуема, но средний слой материала остается незащищенным, и при нарушении целостности покрытия огнезащищенность резко снижается. Для таких целлюлозосодержащих материалов, как древесина, распространенными являются способы поверхностной и глубокой пропитки антипиренами, а также нанесение огнезащитных лакокрасочных покрытий вспучивающегося (интумесцентного) типа.

Одним из рациональных путей снижения пожарной опасности разрабатываемых композиционных плитных материалов с растительным наполнителем является использование в качестве матрицы антипиренов. Для композиционных плитных материалов из дискретных целлюлозосодержащих частиц более эффективным способом защиты является введение замедлителей горения в композицию на стадии структурообразования материала.

Состав компонентов в массовых долях по сухому веществу приведены в таблице 6.11. В качестве связующих использовались: ФФС – фенолоформальдегидное связующее; КФС – карбаминоформальдегидное связующее; ЖС – жидкое стекло; АХФ – алюмохромфосфатное связующее. Для огнезащиты композиционного материала использовались составы:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – хлорид аммония;  $\text{NH}_4\text{F}$  – фторид аммония;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  – тригидрат оксида алюминия;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 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 горю-

части Г1, Г2. Результаты определения показателей представлены в таблицах 6.12 – 6.14.

Таблица 6.11– Состав огнезащитного композиционного материала, %

Наполнитель растительные отходы	Связующее ФФС КФС ЖС АХФ	Отвердитель NH <sub>4</sub> Cl	Антипирен NH <sub>4</sub> F Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
80...40	10 ... 30	1	10...30

Наилучшие показатели для снижения горючести дает добавка в композицию 30 % замедлителя горения тригидрата алюминия, что позволяет получить композит с показателями, соответствующими группе горючести Г1. Кривые ИК, ТГ и ДСК композитов из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего с добавкой тригидрат оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O) представлены на рисунке 6.10.

Результаты ИК-спектроскопии продуктов термолиза композита из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего с добавкой тригидрат оксида алюминия приведены в таблице 6.15.

При использовании тригидрат оксида алюминия тепловой эффект реакции термолиза композитов снижается до 959 Дж/г (в 1,35 раза меньше, чем эффект термолиза композита из отходов льняного волокна и в 1,9 раза меньше, чем эффект термолиза отходов льняного волокна). Снижение теплового эффекта присутствует и для других композитов на основе отходов льняного волокна на синтетических и неорганических связующих с добавками антипиренов.

Таблица 6.12 – Результаты определения минимальных и максимальных значений степени повреждения по массе при горении  $\Delta m$ , % и температуры дымовых газов  $T$ , °C образцов на разных связующих с долей добавки  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$

Композиционный материал	Вид связующего							
	КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
без добавки мягких отходов древесины	<u>21,2(141)</u>	<u>82,6(491)</u>	<u>19,1(131)</u>	<u>80,3(465)</u>	<u>17,1(120)</u>	<u>78,1(446)</u>	<u>15,8(115)</u>	<u>76,0(425)</u>
	23,0(159)	85,4(592)	21,1(143)	83,2(570)	19,2(131)	81,1(549)	17,0(125)	78,9(527)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>22,1(145)</u>	<u>83,7(503)</u>	<u>20,7(137)</u>	<u>81,6(482)</u>	<u>18,6(128)</u>	<u>79,4(459)</u>	<u>17,5(122)</u>	<u>77,4(439)</u>
	24,2(168)	86,5(603)	22,8(156)	84,7(585)	20,7(138)	82,3(561)	18,8(129)	80,4(542)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>23,2(151)</u>	<u>84,8(513)</u>	<u>22,0(145)</u>	<u>83,0(495)</u>	<u>19,9(135)</u>	<u>80,8(473)</u>	<u>19,0(130)</u>	<u>79,0(455)</u>
	25,3(171)	87,7(615)	24,1(168)	86,3(601)	22,1(151)	83,7(575)	20,4(136)	82,1(559)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>22,3(146)</u>	<u>83,9(504)</u>	<u>21,5(142)</u>	<u>82,4(489)</u>	<u>19,0(130)</u>	<u>79,9(464)</u>	<u>18,2(127)</u>	<u>78,2(447)</u>
	24,4(169)	86,8(606)	23,6(163)	85,5(593)	21,3(145)	82,8(566)	19,6(133)	81,3(551)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>23,5(152)</u>	<u>85,3(518)</u>	<u>21,5(142)</u>	<u>83,8(503)</u>	<u>20,3(136)</u>	<u>81,3(478)</u>	<u>20,1(136)</u>	<u>79,6(461)</u>
	25,6(178)	88,2(620)	23,6(163)	87,1(609)	22,6(156)	84,2(580)	20,8(141)	82,7(565)



Композиционный материал	Вид связующего							
	КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>22,3(147)</u> 24,4(170)	<u>84,1(506)</u> 87,0(608)	<u>21,2(141)</u> 23,2(160)	<u>82,4(487)</u> 85,5(593)	<u>19,2(132)</u> 21,3(145)	<u>80,1(466)</u> 83,0(568)	<u>19,6(133)</u> 20,3(138)	<u>78,7(452)</u> 82,0(558)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>24,1(155)</u> 26,2(181)	<u>85,9(524)</u> 88,8(626)	<u>22,4(147)</u> 24,4(170)	<u>83,4(499)</u> 86,7(605)	<u>20,7(138)</u> 22,8(157)	<u>81,6(481)</u> 84,5(583)	<u>20,4(137)</u> 21,0(143)	<u>79,6(461)</u> 82,8(566)
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (сосна)	<u>23,5(152)</u> 25,6(178)	<u>85,3(518)</u> 88,1(619)	<u>21,9(144)</u> 24,0(167)	<u>82,9(494)</u> 86,0(598)	<u>20,1(136)</u> 22,0(151)	<u>80,9(474)</u> 83,7(575)	<u>19,9(134)</u> 20,4(138)	<u>79,0(455)</u> 82,2(560)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	<u>25,6(163)</u> 27,7(188)	<u>81,6(482)</u> 84,7(585)	<u>23,3(151)</u> 25,4(177)	<u>84,3(508)</u> 87,6(614)	<u>21,8(144)</u> 23,3(160)	<u>82,6(491)</u> 85,3(591)	<u>21,4(142)</u> 21,9(150)	<u>80,6(471)</u> 83,8(576)

\* Над чертой для плит из хлопка; \*\* под чертой для плит из льна

Таблица 6.13 – Результаты определения минимальных и максимальных значений степени повреждения по массе при горении  $\Delta m$ , % и температуры дымовых газов  $T$ , °C образцов на разных связующих с долей добавки  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

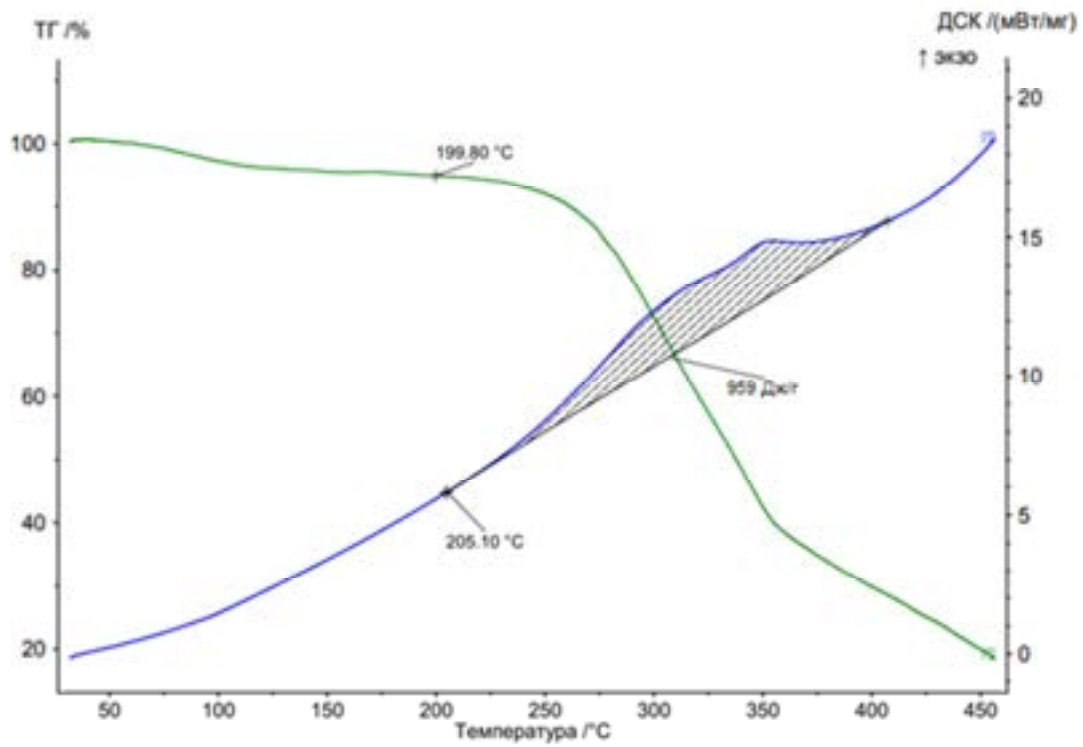
Композиционный материал	Вид связующего							
	КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max	$\Delta m$ (T) min	$\Delta m$ (T) max
без добавки мягких отходов древесины	<u>22,5(147)</u>	<u>83,3(498)</u>	<u>20,3(136)</u>	<u>81,1(476)</u>	<u>18,8(129)</u>	<u>78,9(454)</u>	<u>17,6(120)</u>	<u>77,9(444)</u>
	24,1(168)	86,1(599)	22,2(152)	84,0(578)	20,9(139)	82,0(558)	18,9(131)	79,7(535)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>23,4(152)</u>	<u>84,5(510)</u>	<u>21,9(144)</u>	<u>82,3(488)</u>	<u>20,3(137)</u>	<u>80,2(467)</u>	<u>19,2(130)</u>	<u>78,3(448)</u>
	25,5(177)	87,2(610)	24,1(168)	85,5(593)	22,5(154)	83,0(568)	20,6(138)	81,2(550)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>24,5(157)</u>	<u>85,5(520)</u>	<u>23,2(151)</u>	<u>83,7(503)</u>	<u>21,7(143)</u>	<u>81,5(480)</u>	<u>20,8(138)</u>	<u>79,8(463)</u>
	26,6(183)	88,5(623)	25,4(177)	87,1(609)	23,9(166)	84,6(584)	22,2(153)	83,0(568)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>23,6(153)</u>	<u>84,7(512)</u>	<u>22,6(148)</u>	<u>83,1(496)</u>	<u>20,7(138)</u>	<u>80,6(471)</u>	<u>20,0(134)</u>	<u>79,1(456)</u>
	25,8(179)	87,5(613)	24,7(172)	86,2(600)	23,1(160)	83,5(573)	21,4(147)	82,0(558)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>24,7(158)</u>	<u>86,1(526)</u>	<u>22,8(148)</u>	<u>84,6(511)</u>	<u>22,1(146)</u>	<u>82,0(485)</u>	<u>21,9(144)</u>	<u>80,3(468)</u>
	26,5(182)	89,0(628)	24,9(174)	87,8(616)	24,4(170)	85,0(588)	22,6(155)	83,4(572)

Композиционный материал	Вид связующего							
	КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>23,4(152)</u>	<u>84,6(511)</u>	<u>22,5(147)</u>	<u>83,0(495)</u>	<u>20,5(137)</u>	<u>80,5(470)</u>	<u>21,0(140)</u>	<u>79,5(460)</u>
	26,2(181)	87,6(614)	25,0(175)	86,1(599)	23,0(159)	83,4(572)	21,6(147)	82,6(564)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>25,3(162)</u>	<u>86,7(533)</u>	<u>23,6(152)</u>	<u>84,1(506)</u>	<u>22,4(147)</u>	<u>82,0(485)</u>	<u>22,1(145)</u>	<u>80,3(468)</u>
	27,6(188)	89,5(633)	25,5(177)	87,4(612)	24,5(170)	85,2(590)	22,8(156)	83,5(573)
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (сосна)	<u>24,6(158)</u>	<u>86,1(526)</u>	<u>23,2(151)</u>	<u>83,7(502)</u>	<u>21,9(144)</u>	<u>81,7(482)</u>	<u>21,6(143)</u>	<u>79,7(462)</u>
	26,8(184)	88,9(627)	25,4(177)	86,8(606)	23,8(165)	84,4(583)	22,1(152)	83,0(568)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (сосна)	<u>26,4(167)</u>	<u>82,4(489)</u>	<u>25,1(160)</u>	<u>85,2(517)</u>	<u>23,6(153)</u>	<u>83,4(499)</u>	<u>23,0(149)</u>	<u>81,3(478)</u>
	28,5(192)	85,5(593)	27,1(185)	88,3(621)	25,0(175)	86,0(598)	23,6(164)	84,5(583)

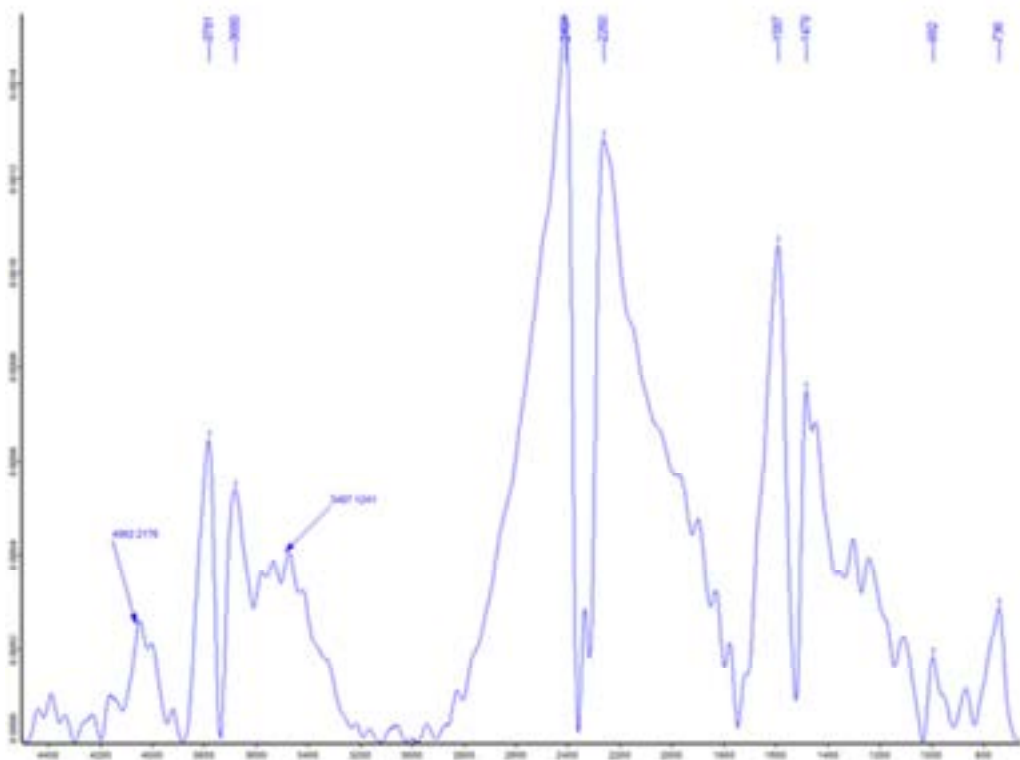
Таблица 6.14 – Результаты определения минимальных и максимальных значений степени повреждения по массе при горении  $\Delta m$ , % и температуры дымовых газов  $T$ , °C образцов на разных связующих с долей добавки  $NH_4F$

Композиционный материал	Вид связующего							
	КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
без добавки мягких отходов древесины	<u>23,0(150)</u>	<u>83,7(502)</u>	<u>20,8(138)</u>	<u>81,5(480)</u>	<u>19,3(131)</u>	<u>79,4(459)</u>	<u>18,1(125)</u>	<u>78,3(448)</u>
	24,6(170)	86,5(603)	22,6(155)	84,4(582)	21,4(145)	82,4(562)	19,3(132)	80,1(539)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>23,9(154)</u>	<u>84,9(514)</u>	<u>22,3(146)</u>	<u>82,7(492)</u>	<u>20,7(138)</u>	<u>80,6(471)</u>	<u>19,7(133)</u>	<u>78,7(452)</u>
	26,0(180)	87,6(613)	24,5(170)	85,9(597)	22,9(157)	83,3(570)	21,1(143)	81,6(554)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	<u>24,9(159)</u>	<u>85,8(523)</u>	<u>23,6(153)</u>	<u>84,1(506)</u>	<u>22,1(145)</u>	<u>81,9(484)</u>	<u>21,2(141)</u>	<u>80,2(467)</u>
	27,0(185)	88,9(627)	25,7(178)	87,5(613)	24,3(168)	85,0(587)	22,6(155)	83,4(572)
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>24,0(155)</u>	<u>85,1(516)</u>	<u>23,1(150)</u>	<u>83,5(500)</u>	<u>21,2(140)</u>	<u>81,1(476)</u>	<u>20,4(137)</u>	<u>79,5(460)</u>
	26,2(181)	87,9(617)	25,2(176)	86,6(604)	23,6(162)	83,9(577)	21,9(150)	82,4(562)
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	<u>25,2(161)</u>	<u>86,5(530)</u>	<u>23,2 (151)</u>	<u>85,0(515)</u>	<u>22,5(147)</u>	<u>82,4(489)</u>	<u>22,3(146)</u>	<u>80,7(472)</u>
	26,9(184)	89,3(631)	25,3(176)	88,2(620)	24,8(172)	85,3(591)	22,9(158)	83,9(577)

Композиционный материал	Вид связующего							
	КФС		ФФС		ЖС		АХФ	
	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max	$\Delta m$ (Т) min	$\Delta m$ (Т) max
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>23,8(154)</u> 26,6(183)	<u>85,0(515)</u> 87,9(617)	<u>22,9(149)</u> 25,3(176)	<u>83,3(498)</u> 86,5(603)	<u>20,9(139)</u> 23,4(162)	<u>80,8(473)</u> 83,7(575)	<u>21,5(142)</u> 22,1(149)	<u>79,9(464)</u> 82,9(567)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	<u>25,7(163)</u> 28,0(190)	<u>87,0(535)</u> 89,8(636)	<u>23,9(154)</u> 25,9(179)	<u>84,5(510)</u> 87,8(616)	<u>22,9(149)</u> 25,0(174)	<u>82,4(489)</u> 85,5(593)	<u>22,6(148)</u> 23,2(160)	<u>80,7(472)</u> 83,9(577)
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (сосна)	<u>25,0(160)</u> 27,3(187)	<u>86,6(531)</u> 89,3(630)	<u>23,6(153)</u> 25,7(178)	<u>84,1(506)</u> 87,2(610)	<u>22,3(146)</u> 24,2(169)	<u>82,0(485)</u> 84,8(586)	<u>22,0(145)</u> 22,4(155)	<u>80,0(465)</u> 83,4(572)
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	<u>26,8(167)</u> 28,9(192)	<u>82,7(489)</u> 85,8(593)	<u>25,5(160)</u> 27,4(185)	<u>85,5(517)</u> 88,7(621)	<u>23,9(153)</u> 25,4(175)	<u>83,8(499)</u> 86,3(598)	<u>23,5(149)</u> 24,2(164)	<u>81,6(478)</u> 84,9(583)



а



б

Рисунок 6.10 – Кривые ИК, ТГ и ДСК композитов из отходов льняного волокна с добавкой тригидрат оксида алюминия

Таблица 6.15 – Полосы поглощения продуктов термоллиза композита из отходов льняного волокна на основе алюмохромфосфатного связующего с добавкой тригидрат оксида алюминия

Положение полосы, см <sup>-1</sup>	Интенсивность поглощения, %	Группы
4062	0,00028	Свободные ОН-группы
3781	0,00062	Свободные ОН-группы
3660	0,00053	Свободные ОН-группы
2402	0,0014	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
2260	0,0013	Асимметричные валентные колебания CO <sub>2</sub>
1587	0,00105	Несопряженные колебания C=C
1479	0,0075	C-ОН
802	0,0002	CO <sub>2</sub> с деформационными колебаниями молекулы
736	0,00034	CO <sub>2</sub> с деформационными колебаниями молекулы

На рисунке 6.11 приведена поверхность отклика – зависимости потери массы при горении от доли добавки алюмохромфосфатного связующего и антипирена Al(OH)<sub>3</sub> для композита без мягких отходов древесины.

При прочих равных условиях плиты с наполнителем из отходов прядения льна имеют большую горючесть, чем с наполнителем из отходов хлопка. Это может объясняться большей долей лигнина в составе льна и отходов его прядения в сравнении с данными показателями для хлопка.

Увеличение массовой доли связующего повышает потерю массы композитов при горении на 0,5...1,5 %, причем в меньшей степени влияет на потерю массы при горении доля добавки более термостойкого фенолоформальдегидного связующего из синтетических.

Добавка в композицию карбоната натрия или тригидрата алюминия значительно уменьшает горючесть теплоизоляционных плит из растительных отходов, повреждение по массе образцов немного меньше при использовании тригидрата алюминия.

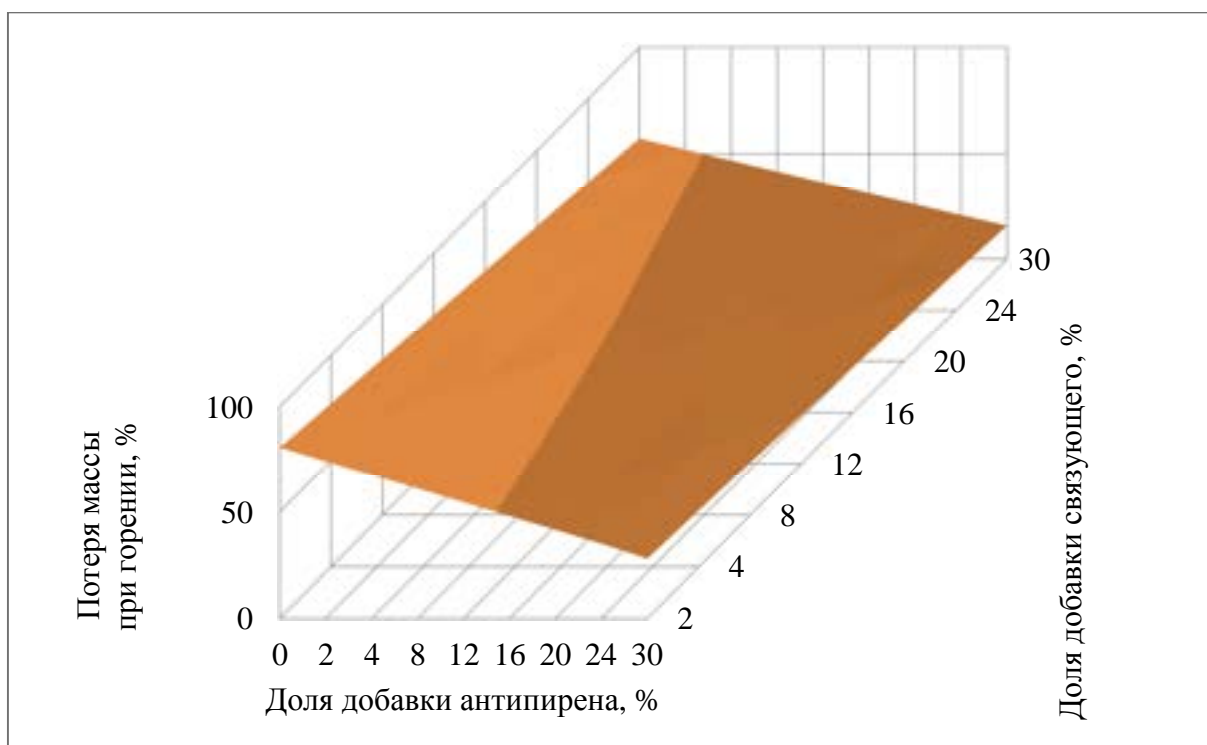


Рисунок 6.11 – Зависимость потери массы при горении от доли добавки алюмохрофосфатного связующего и антипирена  $\text{Al}(\text{OH})_3$  для композита без мягких отходов древесины

При использовании в качестве связующего композитов из отходов льна и хлопка КФС добавка  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  обеспечивает группу горючести материала Г2, а при использовании 30 % фенолоформальдегидного связующего – группу Г1. Следует отметить, что стоимость карбоната натрия меньше, чем тригидрата алюминия.

Добавки замедлителей горения позволяют снизить горючесть композитов. Для изготовления теплоизоляционных композиционных плитных материалов из невозвратных отходов производства хлопкового и льняного волокон рационально использовать связующее с добавкой 30 % замедлителя горения, что позволяет получить материал с продолжительностью самостоятельного горения 0 с со степенью повреждения по массе не более 22,2 %.

Таким образом, для изготовления теплоизоляционных композиционных плитных материалов из невозвратных отходов производства хлопкового и льняного волокон с добавкой мягких отходов древесины рационально ис-



пользовать 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 %.

### **6.5. Физико-механические показатели и коэффициент теплопроводности композиционных плитных материалов из отходов производства растительных волокон, изготовленных на основе синтетических и минеральных связующих с добавками замедлителей горения**

К негативным сторонам применения антипиренов в композиции относится снижение механических показателей материала [219, 234, 232]. Самым технологичным способом повышения огнезащищенности в производстве плитных композитов является введение антипиренов на стадии смешивания компонентов.

Средние значения физико-механических показателей композиционных плитных материалов из отходов производства растительных волокон, изготовленных на основе синтетических и минеральных связующих с добавками замедлителей горения представлены в таблицах 6.16, 6.17.

Добавка 10 %  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  к композитам из отходов прядения льна (хлопка) на фенолформальдегидном связующем (10%) снижает предел прочности  $\sigma_n$  в 1,08 (1,14) раза; увеличивает разбухание по толщине  $P_h$  в 1,03 (1,03) раза; водопоглощение  $W$  в 1,04 (1,05) раза; коэффициент теплопроводности в 1,03 (1,03) раза. Максимальное снижение предела прочности  $\sigma_n$  1,15 (1,3) соответствует для композитов из отходов прядения льна (хлопка) на связующих (30 %) с долей добавки  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  (30 %).

**6.6. Разработка математических моделей физико-механических показателей и горючести теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна с добавкой алюмохромфосфата**

Композиционный материал изготавливался средней плотности 275 кг/м<sup>3</sup>. В качестве матрицы использованы синтетические и неорганические связующие, расход КФС варьировался на трех уровнях – 0, 20 и 40 % от массы наполнителя; использовалась добавка алюмохромфосфатного связующего – 0, 15 и 30 %. Образцы материала сушились при температуре, °С – 80, 120 и 160.

Для оценки области значений показателей композитов было решено использовать метод регрессионного анализа, в частности – В-план второго порядка. Для числа варьируемых факторов (к) квадратичная модель имеет вид

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i,u} b_{iu} X_i X_u . \quad (6.2)$$

Интерпретация регрессионных математических моделей показателей плитного материала позволяет выявить факторную область, обеспечивающую соответствие показателей композита требуемым значениям.

Варьируемые в эксперименте факторы и их уровни представлены в таблицах 6.18, 6.19. Выходные величины:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\sigma_{ii}$  – прочность при статическом изгибе, МПа; h – разбухание по толщине за 24 часа, %;  $\Delta m$  – степень повреждения по массе, %.

Таблица 6.16 – Средние значения физико-механических показателей плит из отходов прядения льна\*

Вид связующего, доля добавки, %	Физико-механические показатели плит при доле добавки $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , %														
	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>			Предел прочности $\sigma_{и}$ , МПа			Разбухание по толщине $P_h$ , %			Водопоглощение $W$ , %			Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
ФФС, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,40</u> (0,43)	0,38	0,35	<u>13,8</u> (13,4)	14,1	14,3	<u>188</u> (180)	190	193	<u>0,061</u> (0,059)	0,062	0,064
ФФС, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,51</u> (0,53)	0,48	0,46	<u>10,5</u> (10,0)	10,8	11,1	<u>158</u> (152)	160	162	<u>0,067</u> (0,065)	0,068	0,070
ФФС, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,58</u> (0,61)	0,56	0,53	<u>8,7</u> (8,3)	9,0	9,4	<u>135</u> (130)	137	139	<u>0,072</u> (0,070)	0,073	0,075
КФС, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,38</u> (0,41)	0,36	0,34	<u>15,8</u> (15,1)	16,3	17,0	<u>210</u> (199)	213	217	<u>0,061</u> (0,059)	0,062	0,064
КФС, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,49</u> (0,51)	0,46	0,44	<u>12,0</u> (11,3)	12,5	13,1	<u>174</u> (163)	181	186	<u>0,070</u> (0,068)	0,071	0,073
КФС, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,57</u> (0,60)	0,55	0,52	<u>9,9</u> (9,3)	10,4	11,1	<u>152</u> (141)	158	166	<u>0,075</u> (0,073)	0,076	0,078
ЖС, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,41</u> (0,44)	0,38	0,36	<u>13,7</u> (13,3)	14,0	14,2	<u>185</u> (178)	188	191	<u>0,062</u> (0,060)	0,063	0,065
ЖС, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,50</u> (0,53)	0,49	0,47	<u>10,3</u> (9,8)	10,6	10,9	<u>156</u> (149)	158	161	<u>0,069</u> (0,067)	0,070	0,072
ЖС, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,59</u> (0,62)	0,57	0,54	<u>8,5</u> (8,0)	8,7	9,0	<u>133</u> (127)	135	137	<u>0,078</u> (0,076)	0,079	0,081

Вид связующего, доля добавки, %	Физико-механические показатели плит при доле добавки $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , %														
	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>			Предел прочности $\sigma_{и}$ , МПа			Разбухание по толщине $P_h$ , %			Водопоглощение $W$ , %			Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
АХФ, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,42</u> (0,44)	0,39	0,37	<u>13,6</u> (13,2)	13,9	14,0	<u>183</u> (176)	185	189	<u>0,062</u> (0,060)	0,063	0,065
АХФ, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,51</u> (0,54)	0,49	0,48	<u>10,1</u> (9,6)	10,4	10,7	<u>153</u> (145)	158	160	<u>0,069</u> (0,067)	0,070	0,072
АХФ, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,60</u> (0,63)	0,57	0,55	<u>8,4</u> (8,0)	8,6	8,9	<u>130</u> (125)	134	137	<u>0,078</u> (0,076)	0,079	0,081

\* Над чертой для плит с добавкой антипирена; \*\* под чертой в скобках для плит без добавки антипирена

Таблица 6.17 – Средние значения физико-механических показателей плит из отходов прядения хлопка\*

Вид связующего, доля добавки, %	Физико-механические показатели плит при доле добавки $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , %														
	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>			Предел прочности $\sigma_{и}$ , МПа			Разбухание по толщине $P_h$ , %			Водопоглощение $W$ , %			Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
ФФС, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,29</u> (0,33)	0,27	0,25	<u>18,4</u> (17,8)	18,8	19,3	<u>209</u> (200)	212	215	<u>0,071</u> (0,069)	0,072	0,074
ФФС, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,41</u> (0,44)	0,38	0,35	<u>16,7</u> (16,1)	17,2	17,6	<u>178</u> (171)	181	184	<u>0,080</u> (0,078)	0,081	0,083

Окончание таблицы 6.17

Вид связующего, доля добавки, %	Физико-механические показатели плит при доле добавки $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , %														
	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>			Предел прочности $\sigma_{и}$ , МПа			Разбухание по толщине $P_{н}$ , %			Водопоглощение $W$ , %			Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
ФФС, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,45</u> (0,49)	0,41	0,38	<u>14,5</u> (13,9)	15,0	15,4	<u>157</u> (150)	160	162	<u>0,085</u> (0,083)	0,086	0,088
КФС, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,26</u> (0,31)	0,23	0,19	<u>21,2</u> (20,7)	21,7	22,1	<u>220</u> (211)	225	228	<u>0,071</u> (0,069)	0,072	0,074
КФС, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,38</u> (0,42)	0,35	0,32	<u>16,5</u> (15,9)	16,9	17,4	<u>189</u> (181)	196	201	<u>0,081</u> (0,079)	0,082	0,084
КФС, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,44</u> (0,47)	0,41	0,39	<u>14,9</u> (14,3)	15,4	16,0	<u>166</u> (158)	171	176	<u>0,087</u> (0,085)	0,088	0,090
ЖС, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,32</u> (0,35)	0,28	0,25	<u>17,8</u> (17,3)	18,6	19,2	<u>203</u> (195)	208	212	<u>0,074</u> (0,072)	0,075	0,077
ЖС, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,42</u> (0,45)	0,39	0,36	<u>16,3</u> (15,8)	16,9	17,5	<u>165</u> (158)	170	172	<u>0,084</u> (0,082)	0,085	0,087
ЖС, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,47</u> (0,50)	0,44	0,41	<u>14,3</u> (13,7)	14,8	15,3	<u>151</u> (144)	156	159	<u>0,091</u> (0,089)	0,092	0,094
АХФ, 10	<u>274</u> (271)	<u>276</u> (273)	<u>278</u> (275)	<u>0,33</u> (0,36)	0,29	0,25	<u>17,8</u> (17,2)	18,4	18,9	<u>195</u> (189)	199	202	<u>0,074</u> (0,072)	0,075	0,077
АХФ, 20	<u>274</u> (272)	<u>278</u> (274)	<u>280</u> (275)	<u>0,42</u> (0,45)	0,40	0,37	<u>16,1</u> (15,6)	16,7	17,3	<u>170</u> (162)	175	178	<u>0,084</u> (0,082)	0,085	0,087
АХФ, 30	<u>275</u> (273)	<u>279</u> (275)	<u>281</u> (276)	<u>0,48</u> (0,51)	0,45	0,42	<u>13,7</u> (13,3)	14,3	14,8	<u>147</u> (141)	151	154	<u>0,091</u> (0,089)	0,092	0,094

\* Над чертой для плит с добавкой антипирена; \*\* под чертой в скобках для плит без добавки антипирена

План и результаты статистической обработки экспериментальных данных представлены в табл. 6.20 – 6.23.

Таблица 6.18 – Диапазоны варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение фактора		Уровни варьирования			Интервал варьирования, $\Delta_i$
	Натуральное	Кодированное	-1	0	+1	
Доля добавки связующего, %	$P_{св}$	$X_1$	0	20	40	20
Температура сушки, °С	$T_{суш}$	$X_2$	80	120	160	40
Доля добавки алюмохромфосфата (АХФ), %	$D_{АХФ}$	$X_3$	0	15	30	15

Таблица 6.19 – План эксперимента в кодированных и натуральных обозначениях факторов

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$P_{св}, \%$	$T_{суш}, ^\circ\text{C}$	$D_{АХФ}, \%$
1	+	+	+	40	160	30
2	-	+	+	0	160	30
3	+	-	+	40	80	30
4	-	-	+	0	80	30
5	+	+	-	40	160	0
6	-	+	-	0	160	0
7	+	-	-	40	80	0
8	-	-	-	0	80	0
9	+	0	0	40	120	15
10	-	0	0	0	120	15
11	0	+	0	20	160	15
12	0	-	0	20	80	15
13	0	0	+	20	120	30
14	0	0	-	20	120	0

Таблица 6.20 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К										$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	S <sup>2</sup> , Вт/м·К <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,066	0,076	0,068	0,075	0,065	0,074	0,058	0,080	0,084	0,074	0,072	6·10 <sup>-5</sup>
2	-	+	+	0,076	0,072	0,064	0,063	0,071	0,072	0,064	0,072	0,073	0,063	0,069	2·10 <sup>-5</sup>
3	+	-	+	0,069	0,079	0,076	0,078	0,081	0,080	0,069	0,058	0,078	0,082	0,075	6·10 <sup>-5</sup>
4	-	-	+	0,074	0,072	0,065	0,064	0,074	0,075	0,072	0,074	0,075	0,065	0,071	2·10 <sup>-5</sup>
5	+	+	-	0,059	0,072	0,065	0,075	0,058	0,060	0,078	0,077	0,079	0,077	0,070	7·10 <sup>-5</sup>
6	-	+	-	0,062	0,057	0,065	0,055	0,056	0,055	0,068	0,067	0,069	0,066	0,062	3·10 <sup>-5</sup>
7	+	-	-	0,060	0,072	0,059	0,082	0,066	0,065	0,081	0,080	0,079	0,076	0,072	8·10 <sup>-5</sup>
8	-	-	-	0,058	0,065	0,059	0,070	0,059	0,058	0,070	0,071	0,071	0,069	0,065	3·10 <sup>-5</sup>
9	+	0	0	0,067	0,076	0,069	0,080	0,069	0,068	0,081	0,080	0,081	0,079	0,075	4·10 <sup>-5</sup>
10	-	0	0	0,061	0,067	0,060	0,071	0,061	0,060	0,070	0,071	0,069	0,070	0,066	2·10 <sup>-5</sup>
11	0	+	0	0,066	0,072	0,065	0,076	0,066	0,065	0,075	0,076	0,074	0,075	0,071	2·10 <sup>-5</sup>
12	0	-	0	0,069	0,077	0,066	0,079	0,069	0,068	0,078	0,079	0,077	0,078	0,074	3·10 <sup>-5</sup>
13	0	0	+	0,076	0,065	0,081	0,065	0,064	0,067	0,077	0,078	0,080	0,077	0,073	5·10 <sup>-5</sup>
14	0	0	-	0,065	0,070	0,066	0,074	0,066	0,064	0,072	0,075	0,074	0,074	0,070	2·10 <sup>-5</sup>

Таблица 6.21 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Прочность при статическом изгибе, МПа										$\bar{\sigma}_u$ , МПа	S <sup>2</sup> , МПа <sup>2</sup>
1	+	+	+	0,66	0,64	0,63	0,67	0,64	0,61	0,75	0,66	0,61	0,73	0,66	2·10 <sup>-3</sup>
2	-	+	+	0,47	0,45	0,44	0,48	0,45	0,42	0,56	0,47	0,42	0,54	0,47	2·10 <sup>-3</sup>
3	+	-	+	0,58	0,56	0,55	0,59	0,56	0,53	0,67	0,58	0,53	0,65	0,58	2·10 <sup>-3</sup>
4	-	-	+	0,46	0,34	0,32	0,41	0,25	0,32	0,33	0,31	0,32	0,34	0,34	3·10 <sup>-3</sup>
5	+	+	-	0,62	0,50	0,48	0,57	0,41	0,48	0,49	0,47	0,48	0,50	0,50	3·10 <sup>-3</sup>
6	-	+	-	0,38	0,26	0,24	0,33	0,17	0,24	0,25	0,23	0,24	0,26	0,26	3·10 <sup>-3</sup>
7	+	-	-	0,37	0,35	0,34	0,38	0,35	0,32	0,46	0,47	0,32	0,44	0,37	2·10 <sup>-3</sup>
8	-	-	-	0,31	0,19	0,17	0,26	0,10	0,17	0,18	0,16	0,17	0,19	0,19	3·10 <sup>-3</sup>
9	+	0	0	0,44	0,43	0,27	0,28	0,24	0,39	0,33	0,26	0,32	0,34	0,33	5·10 <sup>-3</sup>
10	-	0	0	0,44	0,43	0,45	0,46	0,41	0,44	0,41	0,40	0,34	0,42	0,42	1·10 <sup>-3</sup>
11	0	+	0	0,46	0,34	0,32	0,41	0,25	0,32	0,33	0,31	0,32	0,34	0,34	3·10 <sup>-3</sup>
12	0	-	0	0,53	0,41	0,39	0,48	0,32	0,39	0,40	0,38	0,41	0,39	0,41	3·10 <sup>-3</sup>
13	0	0	+	0,42	0,40	0,39	0,43	0,40	0,37	0,51	0,52	0,37	0,49	0,42	2·10 <sup>-3</sup>
14	0	0	-	0,34	0,32	0,31	0,35	0,32	0,29	0,43	0,44	0,41	0,29	0,34	2·10 <sup>-3</sup>



Таблица 6.22 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Разбухание по толщине за 24 часа, %										$\bar{h}$ , %	S <sup>2</sup> , % <sup>2</sup>
1	+	+	+	6,4	5,3	5,3	8,9	5,3	5,0	5,1	4,2	6,3	4,3	5,6	1,88
2	-	+	+	17,6	15,3	15,3	15,3	15,1	18,9	15,1	14,3	17,2	15,6	16,1	2,09
3	+	-	+	8,7	6,3	6,3	9,9	6,3	6,1	6,1	5,5	8,2	6,7	7,0	2,04
4	-	-	+	20,0	20,3	20,3	16,3	20,9	18,1	20,1	18,6	20,2	19,9	19,5	1,95
5	+	+	-	5,9	4,9	4,1	3,2	4,1	4,1	6,3	7,9	4,4	4,2	4,9	1,96
6	-	+	-	15,8	19,3	20,3	18,9	19,3	18,1	17,1	17,9	16,1	17,9	18,1	2,07
7	+	-	-	10,9	10,9	12,8	13,7	8,1	8,1	9,3	8,9	10,3	9,3	10,2	3,56
8	-	-	-	19,3	20,3	18,9	19,3	18,1	18,1	18,7	21,3	19,8	16,9	19,1	1,57
9	+	0	0	12,4	9,3	10,3	8,9	9,3	9,1	10,1	10,3	10,3	11,9	10,2	1,35
10	-	0	0	16,5	16,8	15,3	18,3	17,1	18,0	19,4	18,8	1,3	18,3	17,7	1,51
11	0	+	0	10,5	9,2	9,4	9,8	9,4	8,0	12,4	10,2	10,1	10,8	10,0	1,34
12	0	-	0	18,2	18,4	18,9	19,4	17,0	16,4	18,2	16,2	16,8	16,5	17,6	1,34
13	0	0	+	11,1	11,2	10,6	11,4	10,0	11,4	14,0	12,2	9,6	10,5	11,2	1,5
14	0	0	-	17,5	17,6	18,0	14,1	17,4	16,0	16,4	15,6	16,2	16,1	16,5	1,34

Таблица 6.23 – План и результаты статистической обработки экспериментальных данных

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Степень повреждения по массе, %										$\Delta\bar{m}$ , %	S <sup>2</sup> , % <sup>2</sup>
1	+	+	+	49,0	49,0	50,2	50,0	52,0	50,1	49,3	48,7	46,3	47,4	49,2	2,47
2	-	+	+	70,2	69,0	70,4	71,0	66,0	67,1	68,1	66,5	68,3	69,4	68,6	2,9
3	+	-	+	62,2	64,0	60,9	61,0	63,0	62,1	62,1	63,5	62,3	63,9	62,5	1,2
4	-	-	+	69,2	68,0	65,9	67,0	69,0	69,1	65,2	66,8	68,9	64,9	67,4	2,8
5	+	+	-	70,9	73,2	74,2	69,8	70,9	68,9	70,0	69,1	71,2	70,8	70,9	2,8
6	-	+	-	78,5	78,9	77,2	75,5	75,9	76,0	75,9	77,2	76,8	75,1	76,7	1,6
7	+	-	-	69,2	69,6	69,5	69,5	67,1	69,0	72,8	70,1	70,8	69,4	69,7	2,07
8	-	-	-	82,2	82,4	82,6	82,5	80,1	82,1	83,4	81,1	82,8	80,8	82,0	1,03
9	+	0	0	69,2	69,6	69,5	69,4	67,1	70,1	73,0	68,1	69,8	67,2	69,3	2,8
10	-	0	0	76,6	77,6	77,2	77,0	77,1	77,3	74,1	75,5	75,0	73,6	76,1	2,08
11	0	+	0	66,6	68,0	68,5	68,1	70,3	70,1	68,6	70,6	69,1	71,1	69,1	1,98
12	0	-	0	76,6	78,2	78,0	78,5	76,6	76,8	77,6	76,6	75,6	75,5	77,0	1,08
13	0	0	+	69,6	71,0	71,5	70,2	67,8	70,8	71,7	72,6	70,8	73,0	70,9	2,2
14	0	0	-	73,6	75,0	75,5	74,2	72,8	74,8	70,2	72,7	73,6	75,6	73,8	2,6

После расчета коэффициентов регрессии математические модели приобретают вид:

- коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,072 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,000X_2^2 - 0,001X_3^2 + 0,001X_1X_2 - 0,001X_1X_3 + 0,00X_2X_3; \quad (6.2)$$

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{и} = 0,354 + 0,076X_1 + 0,034X_2 + 0,081X_3 + 0,021X_1^2 + 0,021X_2^2 + 0,026X_3^2 + 0,001X_1X_2 + 0,001X_1X_3 + 0,001X_2X_3; \quad (6.3)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$h = 14,515 - 5,246X_1 - 1,873X_2 - 0,947X_3 - 0,556X_1^2 - 0,711X_2^2 - 0,661X_3^2 - 0,291X_1X_2 - 0,121X_1X_3 + 0,184X_2X_3; \quad (6.4)$$

- степень повреждения по массе

$$\Delta m = 74,873 - 4,920X_1 - 2,410X_2 - 5,450X_3 - 2,153X_1^2 - 1,803X_2^2 - 2,503X_3^2 - 1,000X_1X_2 - 0,775X_1X_3 - 1,000X_2X_3. \quad (6.5)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии. Дисперсия воспроизводимости

- коэффициент теплопроводности:

$$S_y^2 = (0,00006 + 0,00002 + 0,00006 + 0,00002 + 0,00007 + 0,00003 + 0,00008 + 0,00003 + 0,00004 + 0,00002 + 0,00002 + 0,00003 + 0,00005 + 0,00002) / 14 = 0,00004.$$

- прочность при статическом изгибе:

$$S_y^2 = (0,002 + 0,002 + 0,002 + 0,003 + 0,003 + 0,003 + 0,002 + 0,005 + 0,003 + 0,001 + 0,003 + 0,003 + 0,002 + 0,002) / 14 = 0,0026.$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$S_y^2 = (1,88 + 2,09 + 2,04 + 1,95 + 1,96 + 2,07 + 3,56 + 11,57 + 1,35 + 1,51 + 1,34 + 1,34 + 1,5 + 1,34) / 14 = 1,82.$$

- степень повреждения по массе

$$S_y^2 = (2,47 + 2,9 + 1,2 + 2,8 + 2,8 + 1,6 + 2,07 + 1,03 + 2,8 + 2,08 + 1,98 + 1,08 + 2,2 + 2,6) / 14 = 2,11.$$

После проверки значимости коэффициентов регрессии и по результатам обработки экспериментальных данных были получены математические модели показателей композитов из отходов прядения льняного волокна с добавкой алюмохромфосфатного связующего (в кодированных обозначениях факторов):

- коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,072 + 0,003X_1 - 0,001X_2 + 0,002X_3 - 0,002X_1^2 - 0,001X_3^2 - 0,001X_1X_3. \quad (6.6)$$

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{и} = 0,354 + 0,076X_1 + 0,034X_2 + 0,081X_3 + 0,021X_1^2 + 0,021X_2^2 + 0,026X_3^2 \quad (6.7)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$h = 14,521 - 5,260X_1 - 1,870X_2 - 0,940X_3 - 0,567X_1^2 - 0,717X_2^2 - 0,667X_3^2 - 0,287X_1X_2 - 0,112X_1X_3 + 0,188X_2X_3 \quad (6.8)$$

- степень повреждения по массе

$$\Delta m = 74,124 - 3,720X_1 - 1,210X_2 - 4,250X_3 - 1,403X_1^2 - 1,053X_2^2 - 1,753X_3^2 + 0,500X_1X_2 + 0,725X_1X_3 + 0,500X_2X_3 \quad (6.9)$$

Проверка адекватности математической модели. Значения выходных величин по уравнениям регрессии представлены в таблице 6.24.

Дисперсия адекватности

- коэффициент теплопроводности:

$$S_{ад}^2 = 10 ((0,072 - 0,072)^2 + (0,069 - 0,068)^2 + (0,075 - 0,074)^2 + (0,071 - 0,070)^2 + (0,070 - 0,070)^2 + (0,062 - 0,062)^2 + (0,072 - 0,072)^2 + (0,065 - 0,064)^2 + (0,075 - 0,073)^2 + (0,066 - 0,067)^2 + (0,071 - 0,071)^2 + (0,074 - 0,073)^2 + (0,073 - 0,073)^2 + (0,070 - 0,069)^2) / 7 = 0,000015$$

Таблица 6.24 – Значения выходных величин, средние по эксперименту и рассчитанные по квадратичной модели

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$\hat{\lambda}$ , Вт/м·К	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$\hat{\sigma}_u$ , МПа	$\bar{h}$ , %	$\hat{h}$ , %	$\Delta\bar{m}$ , %	$\Delta\hat{m}$ , %
1	+	+	+	0,072	0,072	0,66	0,64	5,6	5,3	49,2	49,4
2	-	+	+	0,069	0,068	0,47	0,46	16,1	15,7	68,6	68,5
3	+	-	+	0,075	0,074	0,58	0,56	7,0	7,2	62,5	62,8
4	-	-	+	0,071	0,070	0,34	0,36	19,5	19,4	67,4	67,8
5	+	+	-	0,070	0,070	0,50	0,48	4,9	5,2	70,9	70,5
6	-	+	-	0,062	0,062	0,26	0,28	18,1	17,9	76,7	76,4
7	+	-	-	0,072	0,072	0,37	0,38	10,2	10,5	69,7	69,9
8	-	-	-	0,065	0,064	0,19	0,21	19,1	19,4	82,0	81,8
9	+	0	0	0,075	0,073	0,33	0,35	10,2	9,8	69,3	69,1
10	-	0	0	0,066	0,067	0,42	0,40	17,7	18,1	76,1	76,4
11	0	+	0	0,071	0,071	0,34	0,37	10,0	10,6	69,1	69,8
12	0	-	0	0,074	0,073	0,41	0,40	17,6	16,9	77,0	76,3
13	0	0	+	0,073	0,073	0,42	0,44	11,2	11,7	70,9	70,1
14	0	0	-	0,070	0,069	0,34	0,32	16,5	16,1	73,8	73,5

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 0,375 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ao}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

- прочность при статическом изгибе:

$$S_{ад}^2 = 10 ((0,66 - 0,64)^2 + (0,47 - 0,46)^2 + (0,58 - 0,56)^2 + (0,34 - 0,36)^2 + (0,50 - 0,48)^2 + (0,26 - 0,28)^2 + (0,37 - 0,38)^2 + (0,19 - 0,21)^2 + (0,33 - 0,35)^2 + (0,42 - 0,40)^2 + (0,34 - 0,37)^2 + (0,41 - 0,40)^2 + (0,42 - 0,44)^2 + (0,34 - 0,32)^2) / 7 = 0,0074.$$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 2,8 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ao}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

- разбухание по толщине за 24 часа

$$S_{ад}^2 = 10 ((5,6 - 5,3)^2 + (16,1 - 15,7)^2 + (7,0 - 7,2)^2 + (19,5 - 19,4)^2 + (4,9 - 5,2)^2 + (18,1 - 17,9)^2 + (10,2 - 10,5)^2 + (19,1 - 19,4)^2 + (10,2 - 9,8)^2 + (17,7 - 18,1)^2 + (10,0 - 10,6)^2 + (17,6 - 16,9)^2 + (11,2 - 11,7)^2 + (16,5 - 16,1)^2) / 4 = 5,47.$$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 3,00 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{ao}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

- степень повреждения по массе

$$S_{ад}^2 = 10 ((61,2 - 61,4)^2 + (68,6 - 68,5)^2 + (62,5 - 62,8)^2 + (67,4 - 67,8)^2 + (70,9 - 70,5)^2 + (76,7 - 76,4)^2 + (69,7 - 69,9)^2 + (82,0 - 81,8)^2 + (69,3 - 69,1)^2 + (76,1 - 76,4)^2 + (69,1 - 69,8)^2 + (77,0 - 76,3)^2 + (70,9 - 70,1)^2 + (73,8 - 73,5)^2) / 4 = 6,17.$$

Расчетное значение критерия Фишера  $F_p$  меньше табличного  $F_T$ :

$F_p = 2,9 < F_T = 3,23$  – дисперсии  $S_{\alpha\alpha}^2$  и  $S_y^2$  однородны, математическая модель адекватна, т.е. позволяет вычислить значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Модели показателей в натуральных обозначениях факторов:

- коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,067 + 0,0004 P_{\text{св}} - 0,000007 T_{\text{суш}} + 0,00012 D_{\text{др}} - 0,000005 P_{\text{св}}^2 - 0,0000016 D_{\text{др}}^2 - 0,000002 P_{\text{св}} D_{\text{др}}. \quad (6.10)$$

- прочность при статическом изгибе:

$$\sigma_{\text{и}} = 0,331 + 0,0017 P_{\text{св}} - 0,0023 T_{\text{суш}} + 0,002 D_{\text{др}} + 0,00005 P_{\text{св}}^2 + 0,0001 T_{\text{суш}}^2 + 0,0001 D_{\text{др}}^2. \quad (6.11)$$

- разбухание по толщине за 24 часа

$$h = 18,2 - 0,158 P_{\text{св}} + 0,063 T_{\text{суш}} - 0,004 D_{\text{др}} - 0,001 P_{\text{св}}^2 - 0,0005 T_{\text{суш}}^2 - 0,003 D_{\text{др}}^2 - 0,0004 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} - 0,0004 P_{\text{св}} D_{\text{др}} + 0,0003 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}. \quad (6.11)$$

- степень повреждения по массе

$$\Delta m = 76,8 - 0,157 P_{\text{св}} + 0,103 T_{\text{суш}} - 0,196 D_{\text{др}} - 0,003 P_{\text{св}}^2 - 0,0007 T_{\text{суш}}^2 - 0,007 D_{\text{др}}^2 + 0,0006 P_{\text{св}} T_{\text{суш}} + 0,0024 P_{\text{св}} D_{\text{др}} + 0,0008 T_{\text{суш}} D_{\text{др}}. \quad (6.11)$$

По полученным моделям построены графические зависимости коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ), прочности при статическом изгибе ( $\sigma_{\text{и}}$ ), разбухания по толщине за 24 часа ( $h$ ), степени повреждения по массе ( $\Delta m$ ) от доли добавки связующего ( $X_1$ ), от температуры сушки ( $X_2$ ), и доли добавки

алюмохромфосфатного связующего к КФС ( $X_3$ ), представленные на рисунках 6.12 – 6.23.

$Y \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

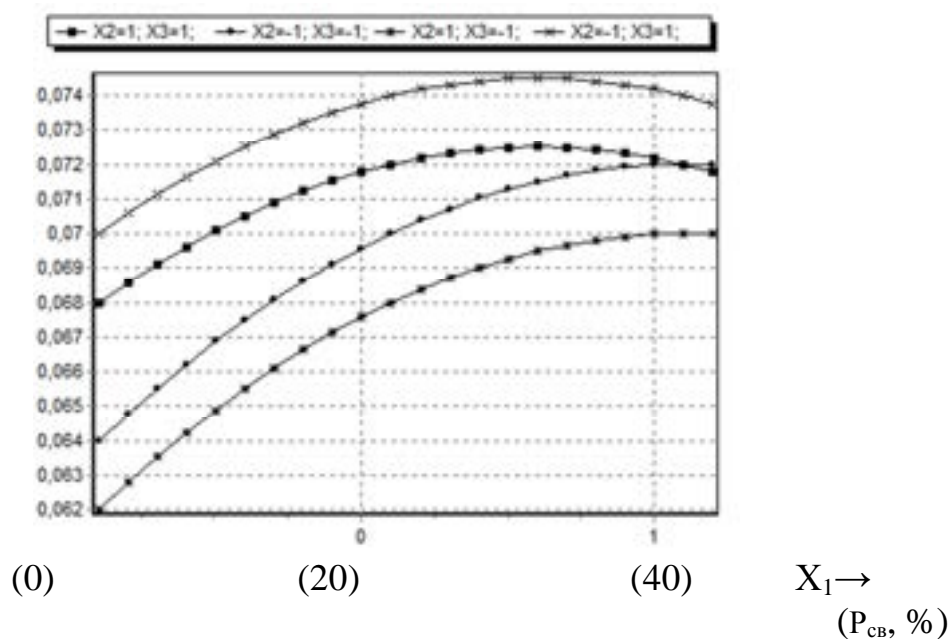


Рисунок 6.12 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки связующего

$Y \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

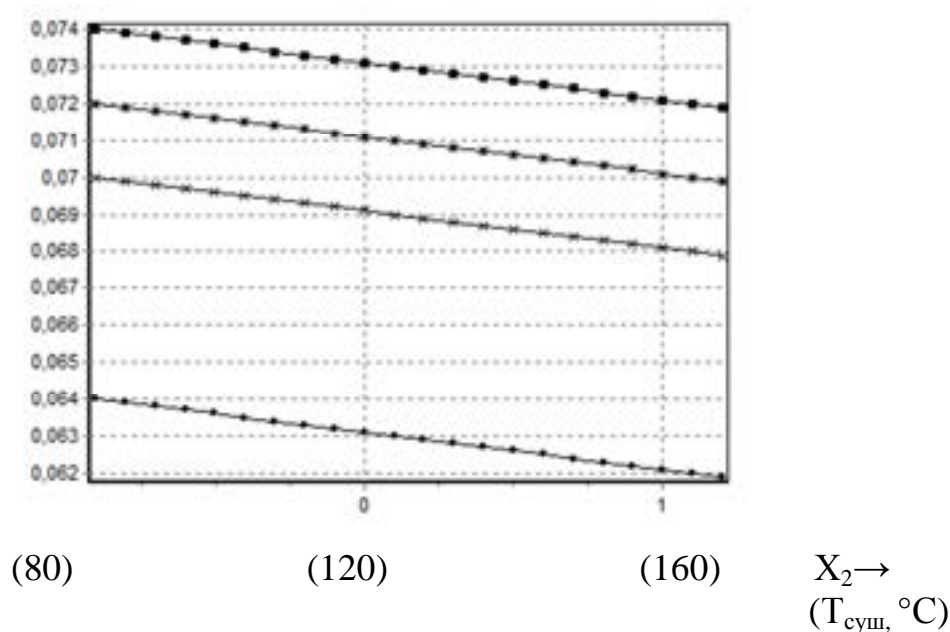


Рисунок 6.13 – График зависимости коэффициента теплопроводности от температуры сушки



$Y \uparrow$   
( $\lambda$ , Вт/м·К)

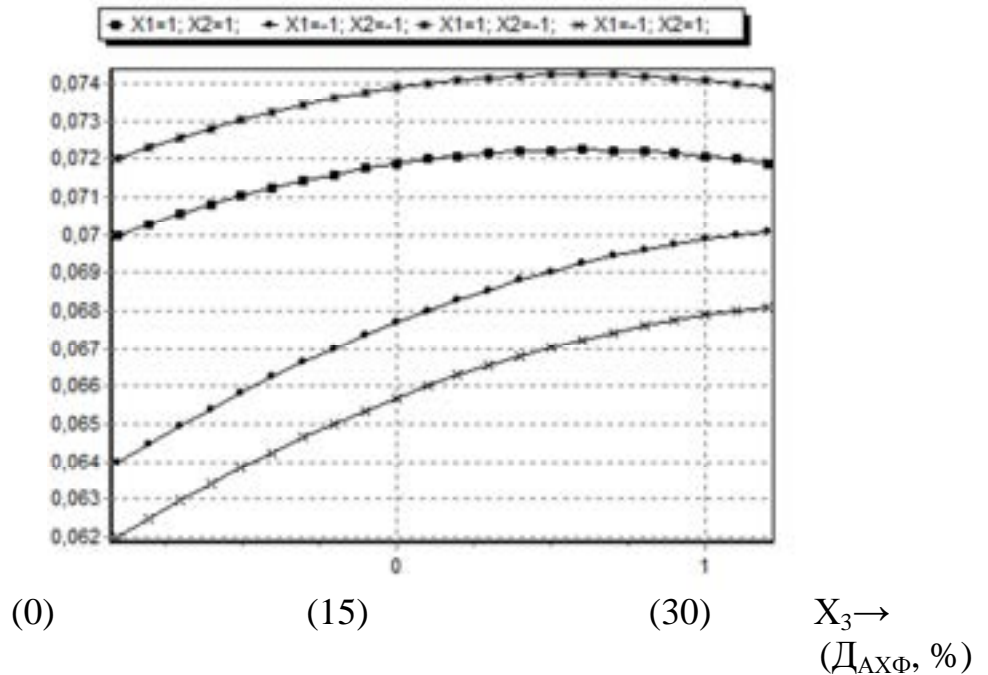


Рисунок 6.14 – График зависимости коэффициента теплопроводности от доли добавки алюмохромфосфата

$Y \uparrow$   
( $\sigma_{из}$ , МПа)

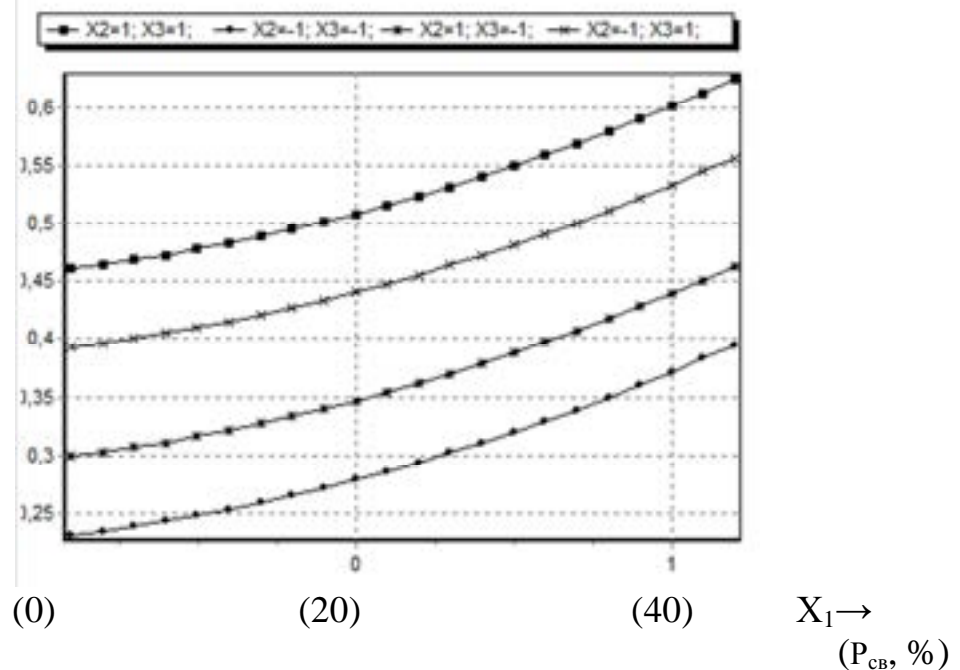


Рисунок 6.15 – График зависимости прочности при статическом изгибе от доли добавки связующего

Y ↑  
( $\sigma_{и}$ , МПа)

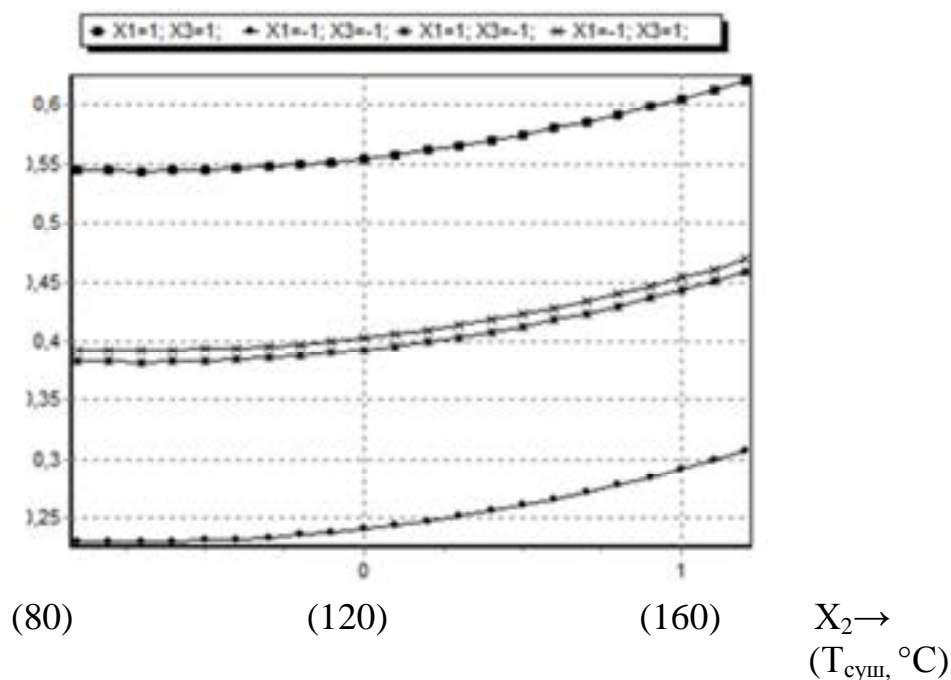


Рисунок 6.16 – График зависимости прочности при статическом изгибе от температуры сушки

Y ↑  
( $\sigma_{и}$ , МПа)

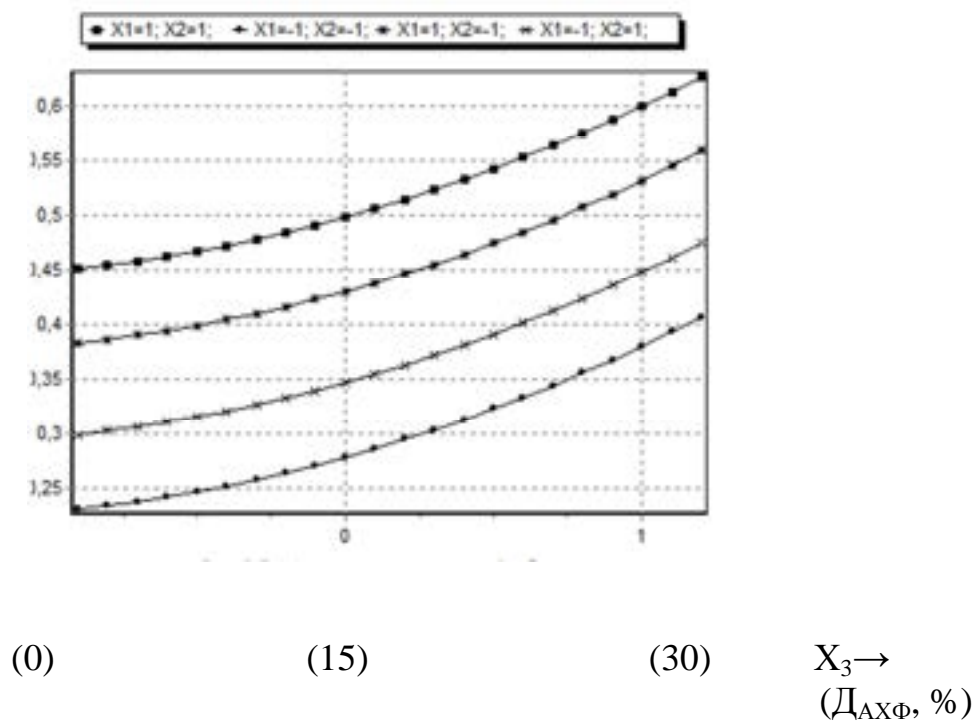


Рисунок 6.17 – График зависимости прочности при статическом изгибе от доли добавки алюмохромфосфата

Y ↑  
(h, %)

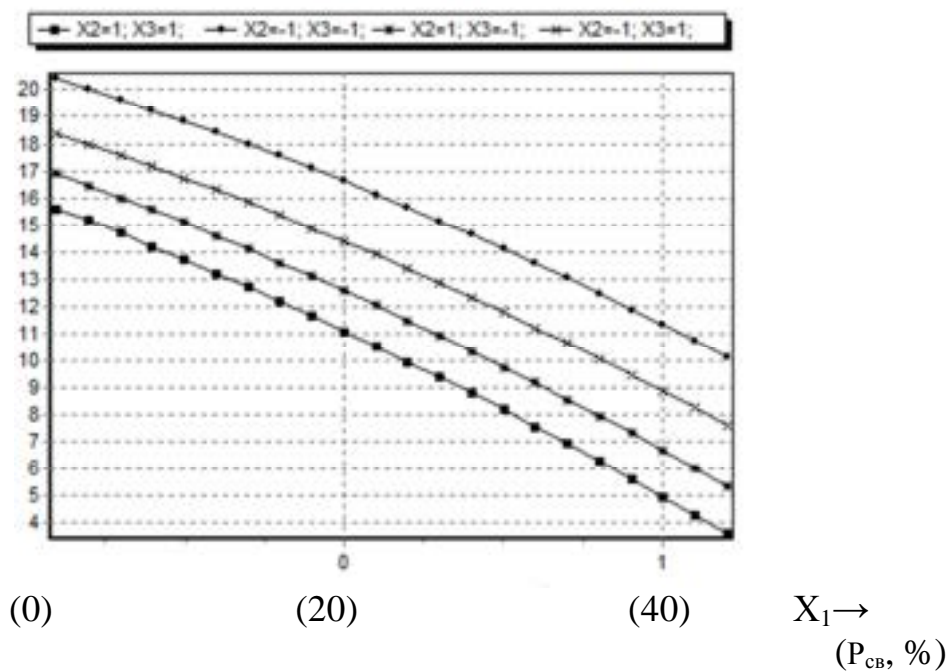


Рисунок 6.18 – График зависимости разбухания по толщине за 24 часа от доли добавки связующего

Y ↑  
(h, %)

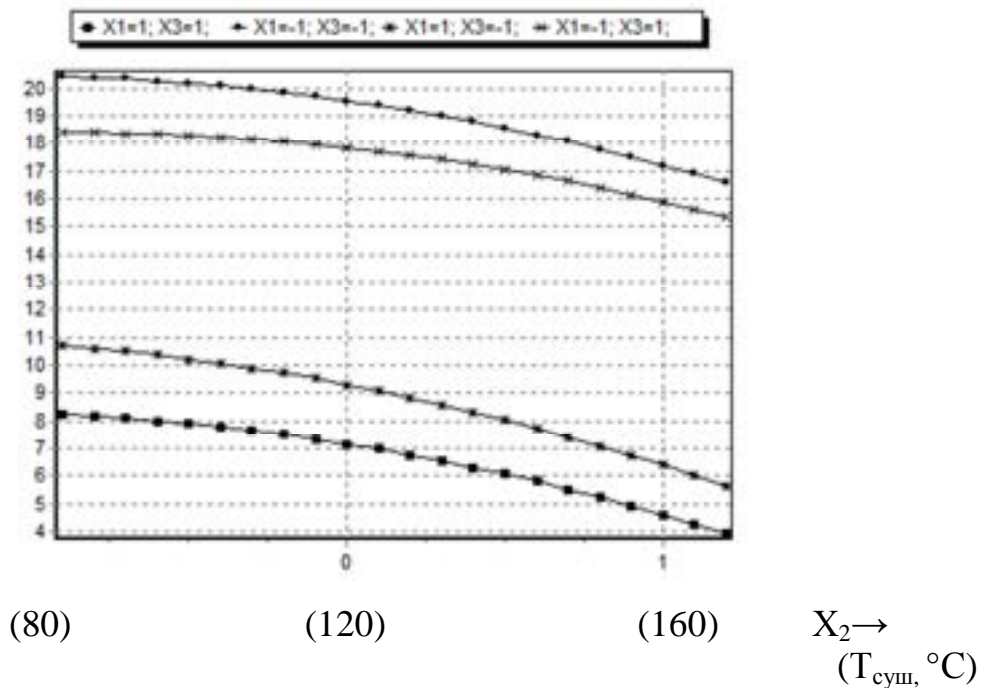


Рисунок 6.19 – График зависимости разбухания по толщине за 24 часа от температуры сушки

$Y \uparrow$   
(h, %)

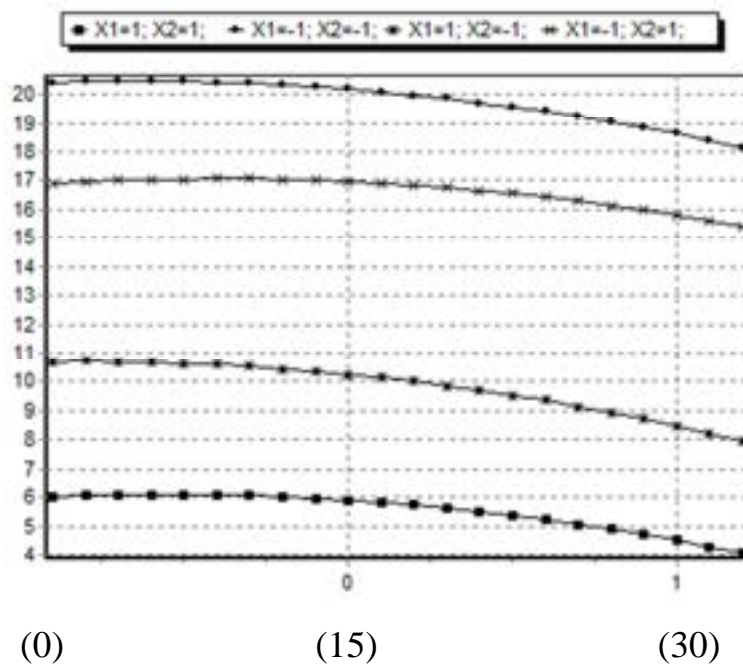


Рисунок 6.20 – График зависимости разбухания по толщине за 24 часа от доли добавки алюмохромфосфата

$Y \uparrow$   
( $\Delta m$ , %)

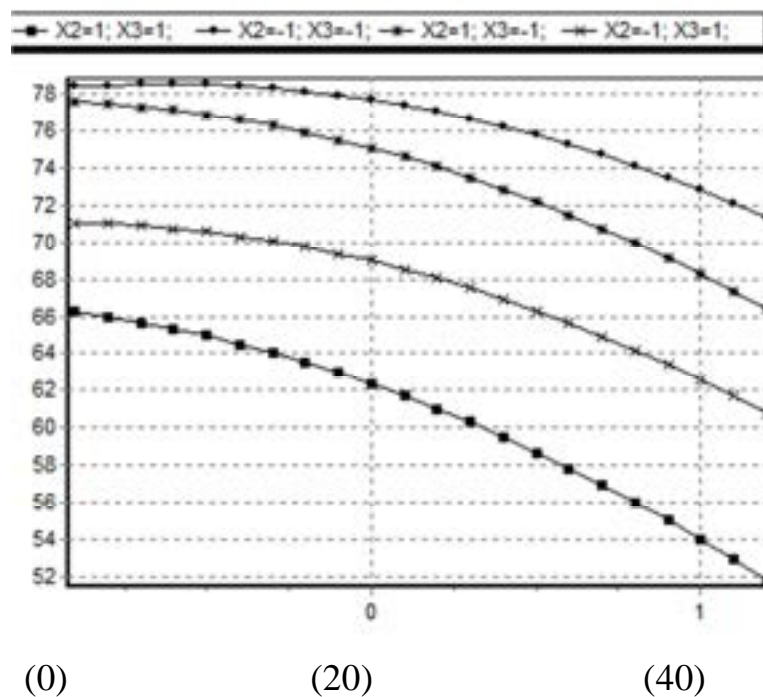


Рисунок 6.21 – График зависимости степени повреждения по массе от доли добавки связующего

Y ↑  
(Δm, %)

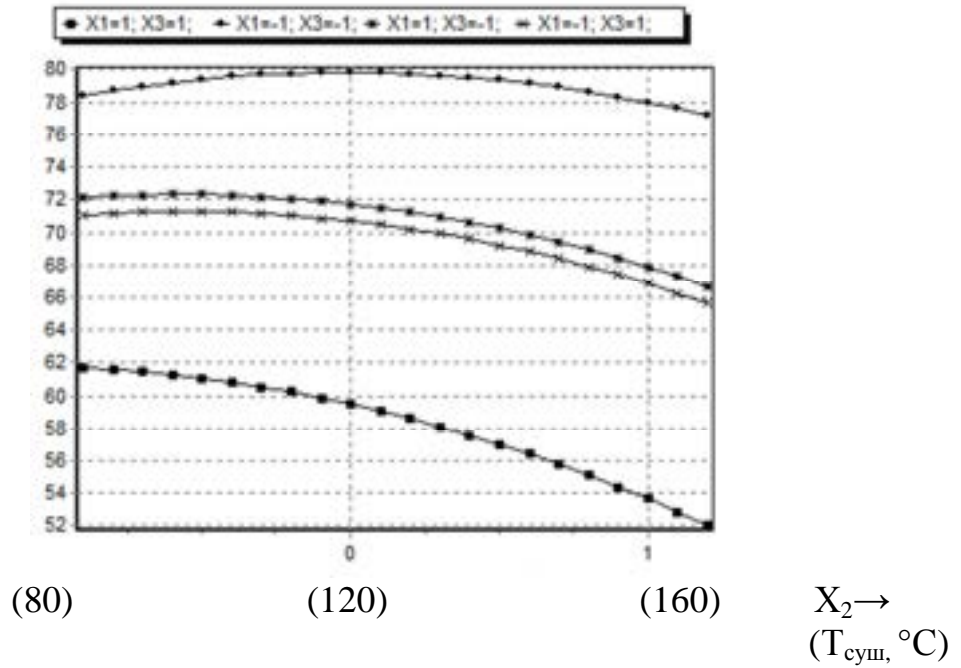


Рисунок 6.22 – График зависимости степени повреждения по массе от температуры сушки

Y ↑  
(Δm, %)

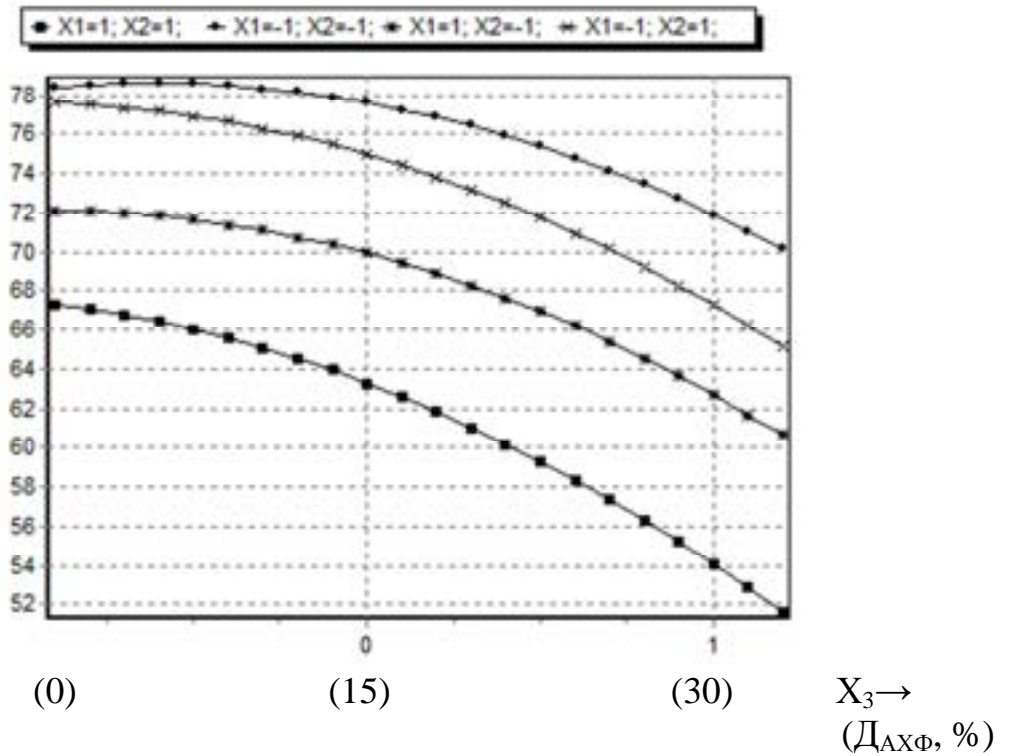


Рисунок 6.23 – График зависимости степени повреждения по массе от доли добавки алюмохромфосфата

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 температуре 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 максимальной доле добавки КФС обеспечивается наибольшая прочность 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. При этом снижается разбухание композитов по толщине. С увеличением доли добавки

АХФ прочностные показатели растут, улучшается и водостойкость материала.

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 %.

Таким образом, данное сочетание технологических факторов можно рекомендовать для производства композитов из отходов прядения льна. Необходимо учитывать не только технологические параметры, но и технико-экономические показатели.

## 6.7. Выводы

1. В ходе исследования экспериментально определены значения степени повреждения по массе, температуры дымовых газов композиционных материалов из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, а также с добавкой мягких отходов древесины, на основе синтетических и неорганических связующих. Композиционные плитные материалы из отходов хлопка, льна, мягких отходов древесины на основе синтетических и неорганических связующих без добавки антипиренов относятся к группе горючести Г3, Г4.

Увеличение доли добавки связующего (ФФС, ЖС и АХФ) снижает потерю массы материала при огневом воздействии. Максимальное снижение степени повреждения по массе при горении соответствует для композиционных материалов из отходов прядения льна (1,46) и хлопка (1,52) раза на алюмохромфосфатном связующем. Минимальное снижение степени повреждения по массе при горении соответствует для композиционных материалов из отходов прядения льна (1,28) и хлопка (1,32) раза с добавкой 50 % от мас-

сы наполнителя коры хвойных пород на карбамидоформальдегидном связующем.

2. Получены впервые результаты термогравиметрического анализа и ИК продуктов горения композитов из отходов льняного волокна на основе синтетических и неорганических связующих без добавки антипирена позволили оценить тепловые эффекты термолиза материалов, что вносит существенный вклад в теоретические представления о процессах горючести и огнезащиты композитов. При использовании алюмохромфосфатного связующего тепловой эффект реакции термолиза снижается до 1303 Дж/г, что в 1,4 раза меньше, чем эффект термолиза отходов льняного волокна. Снижение теплового эффекта присутствует и для других композитов из отходов льняного волокна на синтетических и неорганических связующих.

3. В ходе экспериментальных исследований впервые получены значения степени повреждения по массе, температуры дымовых газов композиционных материалов из невозвратных отходов прядения льна и хлопка, а также с добавкой мягких отходов древесины, на основе синтетических и неорганических связующих как с добавками антипиренов, так и без них.

4. Установлена степень влияния доли добавки карбамидоформальдегидного связующего, температуры сушки, доли добавки алюмохромфосфатного связующего на коэффициент теплопроводности, предел прочности, разбухания по толщине и степени повреждения по массе. При максимальной доле добавки КФС обеспечивается наименьшая потеря массы при горении плит как при минимальной, так и при максимальной температуре сушки.

5. Добавка 10 %  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  к композитам из отходов прядения льна (хлопка) на фенолформальдегидном связующем (10%) снижает предел прочности  $\sigma_n$  в 1,08 (1,14) раза; увеличивает разбухание по толщине  $P_h$  в 1,03 (1,03) раза; водопоглощение  $W$  в 1,04 (1,05) раза; коэффициент теплопроводности в 1,03 (1,03) раза. Максимальное снижение предела прочности  $\sigma_n$  1,15



(1,3) соответствует для композитов из отходов прядения льна (хлопка) на связующих (30 %) с долей добавки  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (30 %).

6. Разработаны регрессионные модели показателей композита с добавкой АХФ. По регрессионным моделям установлено, что добавка 30 % алюмохромофосфатного связующего позволяет получить материал со степенью повреждения по массе не более 50 %; значения показателей отвечают группе горючести материалов ГЗ.

7. Добавка в композицию 30 % замедлителя горения тригидрата алюминия позволяет получить композит с показателями, соответствующими группе горючести Г1.

## **ГЛАВА 7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТОВ ИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ**

### **7.1. Технологическое обоснование производства композитов**

В пресс-композиции по аналогу (древесноволокнистых плит мокрого способа) в качестве сырья используется древесное волокно, производимое методом размола древесной щепы в дефибраторах и рафинерах.

Изготовление пресс-композиции по аналогу включает в себя следующие стадии: размол и фракционирование древесного наполнителя, обработку используемой фракции раствором минерализатора-осадителя, смешивание древесного волокна с фенолоформальдегидной смолой, формирование ковра в отливной машине, сушка при температуре 160...95 °С.

К недостаткам известного способа можно отнести дополнительную операцию изготовления древесного волокна методом размола в дефибраторах и рафинерах.

Разработанный композиционный материал создается следующим образом. Растительные отходы смешиваются с осадителем – раствором сульфата алюминия и связующим, последующее формирование композита, холодную подпрессовку и сушку при температуре 100 – 105 °С. Заявленное техническое решение позволяет создавать композиционный материал по технологии производства древесноволокнистых плит, исключить энергоемкую операцию размола древесной щепы на волокно. В соответствии с указанной выше технологией были изготовлены образцы материала, подвергнутые испытаниям по ГОСТ 4598–2018 Плиты древесно-волокнистые мокрого способа произ-

водства. Технические условия [46]; ГОСТ 10633–2018 Плиты древесно-стружечные и древесно-волокнистые. Общие правила подготовки и проведения физико-механических испытаний [41].

Технологическая схема производства композитов представлена на рисунке 7.1. Изготовление волокнообразных древесных частиц.



Рисунок 7.1 – Схема технологического процесса изготовления композитов

В таблице 7.1 приведены рекомендуемые технологические режимы сушки композитов.

Таблица 7.1 Параметры сушки композитов

Параметры	Содержание лиственных пород, %	
	До 30	Более 30
Давление насыщенного пара в змеевиках и воздухонагревателях сушилки, МПа	0,9...1,2	1,0...1,2
Температура циркулирующего воздуха в сушилке, °С:		
двухзонной		
I зона	155...140	160...150
II зона	130...120	140...120
трехзонной		
I зона	155...145	160...150
II зона	135...125	140...130
III зона	110...100	120...110
четырёхзонной		
I зона	155...145	160...150
II зона	140...130	145...135
III зона	125...115	130...120
IV зона	105...95	110...100
Влажность воздуха, % в зоне загрузки плит отработанного на выходе из сушилки		30...40 40...50 10...12

Композиты дополнительной термообработке и кондиционированию не подвергаются.

Вариант использования технологического оборудования для получения композитов представлен в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Используемое технологическое оборудование

Технологические процессы	Оборудование
Доизмельчение древесной стружки	Зубчато-ситовая мельница
Осмоление растительных частиц	Массный бассейн, ящик непрерывной проклейки
Формирование волокнистого ковра	Отливная плоскосеточная машина
Отжим, сушка и закалка плит	Многоэтажные роликовые сушилки
Окончательная сушка и увлажнение плит перед их обрезкой	Форматно-обрезная установка
Готовые листы выдерживаются для закрепления их формы не менее суток	Штабель плит готовой продукции

## 7.2. Экономическое обоснование производства композитов

Аналогом для разработки композиционного материала являются древесноволокнистые плиты (ДВП) мокрого способа производства. Наиболее энерго- и трудозатратными в процессе изготовления ДВП мокрого способа являются операции размола древесного сырья на волокно. В среднем на 1 т плит затрачивается 550 ...650 кВт-ч электроэнергии, 4...4,5 т пара и около 110 кг условного топлива. Высокая энергоемкость объясняется большими затратами электроэнергии, идущими на помол древесины. Использование пылевидных отходов хлопка и льна в качестве лигноцеллюлозного наполнителя композиционных плит позволяет существенно снизить затраты на производство материала.

В таблице 7.3 на основании [120] представлены удельные показатели образования видов отходов хлопко- и льнопрядильных производств.

Таблица 7.3 – Удельные показатели образования видов отходов

Вид отходов	Технологический процесс или вид производства, в котором образуется отход	Удельные показатели образования отходов
<b>Хлопчатобумажная промышленность</b>		
Пух подвальный (циклонный) и с фильтров	Прядильное производство	6,46 кг/т
Подметь чистая		5,36 кг/т
Подметь грязная		1,44 кг/т
<b>Льняная промышленность</b>		
Вытряска (отход, состоящий из коротких непрядомых лубяных волокон, костры, пуха и пыли)	Прядильное производство	10%

Из таблицы 7.3 видно, что при производстве пряжи и ткани образуются значительное количество отходов, которые могут быть использованы при производстве строительных композиционных материалов.

Для определения эффективности использования безвозвратных отходов текстильных предприятий были выполнены расчеты расхода сырья на единицу продукции (таблица 7.4). В качестве базовой была принята производственная программа на 8000 тыс. м<sup>2</sup> готовой продукции.

Таблица 7.4 – Расход сырья по разрабатываемому материалу

Вид сырья	Потребность, м <sup>3</sup>		Стоимость	
	на единицу	на программу	единицы, руб.	сумма, тыс. руб.
Отходы хлопковые, льняные	6,9	15404,25	80	1232,34

Для сравнения сопоставимых затрат в качестве базового предприятия принято производство ДВП на ООО «Сухонский ЦБК», г. Сокол Вологодской области. Расход древесного сырья для плит-аналогов представлен в таблице

7.5. Толщина плиты-аналога и разрабатываемой плиты 25 мм, плотность 240...260 кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 7.5 – Расход древесного сырья по аналогу (ДВП)

Вид сырья	Потребность, м <sup>3</sup>		Стоимость	
	на единицу	на программу	единицы, руб.	сумма, тыс. руб.
Щепа технологическая береза	6,9	15404,25	810	12477,24
Щепа технологическая ель	6,9	43131,9	1080	46582,45
Щепа технологическая сосна	6,9	3080,85	1080	3327,32
Итого		61617		62387,01

Предприятие по выпуску композиционных плит на основе неиспользуемых отходов прядильных, ткацких производств планируется организовать в г. Костроме. Потребность в материальных ресурсах для производства строительных композиционных плит при разных видах сырья представлена в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Вид и нормы расхода материалов

Вид материала	Плита на основе отходов прядильного производства	Аналог (плита ДВП теплоизоляционная)
- щепа из древесины хвойных пород, м <sup>3</sup>	-	6,9
- щепа из древесины лиственных пород, м <sup>3</sup>	-	6,9
- отходы хлопковые, м <sup>3</sup>	6,9	-
- смола СФЖ, кг	7,5	7,5
- техническая вода, м <sup>3</sup>	15,7	15,7
- сточные воды, м <sup>3</sup>	24,3	24,3

Стоимость сырья и материалов, используемых для производства 1000 м<sup>2</sup> строительных композиционных плит с различными видами наполнителей представлены в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Затраты на сырье и материалы

Показатели	Плита на основе отходов прядильного производства	Аналог (плита ДВП теплоизоляционная)
- древесное /лигноцеллюлозное/ сырье, руб.	1560	7798
- химические материалы и упаковка, руб.	487	487
Итого	2047	8285

Снижение расходов только на сырье и материалы:

$$\text{на } 1000 \text{ м}^2 - \frac{8285 - 2047}{8285} \cdot 100 = 75,3\% .$$

При выпуске 8 млн м<sup>2</sup> в год экономия составит (8285-2047)·8000 = 49,9 млн. руб.

Из таблицы 7.7 видно, что применение безвозвратных отходов текстильных предприятий для производства композиционных плитных материалов позволяет снизить расходы в среднем на 75 %. В годовом исчислении вовлечение в производство композитов неиспользуемых отходов прядильного позволит сэкономить около 49,9 млн. руб.

### **7.3. Обоснование экономической эффективности организации производства на российских предприятиях**

Производство композиционных материалов из растительных отходов будет эффективным для регионов, имеющих ресурсный потенциал неиспользуемых прядильных отходов и древесных отходов. К таким округам в РФ относятся: Центральный, Северо-Западный и Сибирский федеральные округа. Из 25 предприятий по выпуску ДВП на территории РФ только 6 имеют линии для выпуска мягких ДВП.

Потенциальный ресурс переработки льняного волокна в России оценивается на уровне 300 тыс. т. в год, хлопкового волокна 200 тыс. т.,



древесины – 236 млн. м<sup>3</sup>. По оценкам некоторых исследователей [98] в Российской Федерации ежегодно образуется порядка 35,5 млн. м<sup>3</sup> древесных отходов, из которых используется только 25–30 %. В таблице 7.8. представлен потенциальный ресурс растительных отходов.

Таблица 7.8 – Потенциальный ресурс

	Количество ресурсов,	Количество отходов т/год
Льняное волокно	300 тыс.т/год	30000
Хлопковое волокно	200 тыс.т/год	3084
Древесные отходы, всего	35,5 млн. м <sup>3</sup> /год	
25 % для композита		8271
50 % для композита		16542

Таким образом, для производства композита ежегодно может быть использовано от 41355 до 49626 т растительных отходов.

С учетом имеющихся ресурсов для производства композита теплоизоляционного плитного (КТП) принимается годовой выпуск плит толщиной 25 мм в объеме 8 млн м<sup>2</sup>. Для деревянного двухэтажного дома 6×8 м общая площадь утепления стен составляет 140 м<sup>2</sup>. С учетом требований по теплозащите для условий ЦФО потребуется применение трехслойных плит. В этом случае 8 млн м<sup>2</sup> плит хватит для утепления стен более 19 тыс. двухэтажных домов общей площадью 1 827 млн м<sup>2</sup>, что соответствует 57 % всех ежегодно возводимых деревянных домов в Российской Федерации.

#### 7.4. Выводы

1. Для производства композитов из растительных отходов возможно использование оборудования, которое установлено на российских предприятиях по выпуску ДВП.

2. Для производства композита ежегодно может быть использовано от 41355 до 49626 т растительных отходов. Это позволит выпускать 8 млн м<sup>2</sup> плит толщиной 25 мм, что эквивалентно утеплению стен более 19 тыс. двухэтажных домов общей площадью 1 827 млн м<sup>2</sup>, что соответствует 57 % всех ежегодно возводимых деревянных домов в Российской Федерации.

3. Вовлечение в производство композитов из растительных отходов позволит ежегодно экономить до 50 млн. рублей только за счет снижения расходов сырья и материалов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Решение проблемы эффективного использования образующихся растительных отходов возможно путем создания теплоизоляционных композитов с заданным комплексом эксплуатационных свойств. Комплекс выполненных исследований и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

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 регрессион-

ные 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 использовании жидкого стекла и алюмохромфосфатного связующего с добавкой замедлителя горения  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  (30 %).

9. При внедрении полученных результатов и производстве композита теплоизоляционного плитного ресурсом хватит для получения 8 млн  $m^2$  готовой продукции, что позволит только за счет экономии сырья и материалов получить экономический эффект в размере 50 млн. руб. в год.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Азаров В.И. Химия древесины и синтетических полимеров / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. СПб., 1999. – 628 с.
2. Азаров В.И. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / В.И. Азаров, А.В. Оболенская, З.П. Ельницкая, А.А. Леонович. М., 1991. – 320 с.
3. Азаров В.И. Технология связующих и полимерных материалов / В.И. Азаров, В.Е. Цветков. М., 1985. – 216 с.
4. Алоян Р.М. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения / Р.М. Алоян, С.В. Федосов, Л.А. Опарина. Иваново: ПресСто, 2016. – 276 с.
5. Ананьев А.И. Фактическая и прогнозируемая долговечность пенополистирольных плит в наружных ограждающих конструкциях зданий / А.И. Ананьев, О.И. Лобов, В.П. Можяев, П.А. Вязовченко // Промышленное и гражданское строительство. – 2003. – №4. – С. 54–56.
6. Андреева Е. Д. Применение метода инфракрасной спектроскопии для исследования антипирированной древесины / Е. Д. Андреева, М. Ю. Принцева, И. Д. Чешко // Пожарная безопасность. – 2013. – № 4. – С. 69–73.
7. Аносова Е. Б. Термическая устойчивость и пожаровзрывоопасность продуктов и полупродуктов синтеза лекарственных препаратов / Е. Б. Аносова, А. Я. Васин, С. М. Ляшенко, Л. К. Маринина, Г. Г. Гаджиев // Пожарная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 163–169.
8. Антакова В.Н. Технологические параметры получения плитных материалов с заданными свойствами их древесных и одревесневших остатков без добавления связующих / В.Н. Антакова, М.Е. Мельникова [и др.] // Межвузовский сборник «Технология древесных плит и пластиков», Свердловск, 1982 г. 132 с.

9. Анцупов Е.В. Антипирены для пористых материалов / Е.В. Анцупов, С.М. Родивилов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – №10. – С.25–32.
10. Асеева Р. М. Влияние естественного старения на физико-химические и пожароопасные свойства древесины / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 206–217.
11. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 262 с.
12. Байклз Н. Целлюлоза и ее производные / Байклз Н., Сегал Л. Том 2. Пер. с англ. под ред. З. А. Роговина. – М.: Мир, 1974. – 512 с.
13. Баталин Б.С. Долговечность и термическая устойчивость пенополистирола / Б.С. Баталин, М.П. Красновских // Строительные материалы. – 2014. – № 8. – С. 64–67.
14. Берзиньш Г.В. Использование древесных отходов деревообрабатывающей промышленности / Г.В. Берзиньш. Рига, 1981. – 59 с.
15. Бирюков В.И. Теоретические основы и пути совершенствования процесса формирования древесноволокнистых плит и других листовых материалов целлюлозно-бумажного производства: дис.... док. тех. наук.: 05.00.00 / Бирюков Виктор Иванович – Ленингр.: Лесотехн. акад. им. С. М. Кирова, 1972. – 345 с.
16. Бленд Д.Р. Теория линейной вязкоупругости / Д.Р. Бленд. М.: Мир, 1965. – 199 с.
17. Бобров Ю. Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции / Ю. Л. Бобров. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 268 с.
18. Боголицын К.Г. Целлюлозная матрица арктических бурых водорослей: выделение, структура / К.Г. Боголицын, П.А. Каплицин, А.С. Дружинина, Д.В. Овчинников, Е.В. Шульгина, А.Э. Паршина // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №12. – С. 14–19.

19. Боровиков А. М. Справочник по древесине : справочник / А. М. Боровиков, Б. Н. Уголев. – М. : Лесная пром-сть, 1989. – 296 с.
20. Браунс Ф.Э. Химия лигнина / Ф.Э. Браунс. – М., 1964. – 864 с.
21. Брдлик П.М., Морозов А.В., Семенов Ю.П. Теплотехника и теплоснабжение предприятий лесной и деревообрабатывающей промышленности / П.М. Брдлик, А.В. Морозов, Ю.П. Семенов. – М., 1988. – 450 с.
22. Будаева В. В. Новые сырьевые источники целлюлозы для технической химии / В. В. Будаева, Р. Ю. Митрофанов, В. Н. Золотухин, Г. В. Сакович // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №7. – С. 205–212.
23. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Д.В. Ван Кревелен Пер. с англ. М.: Химия, 1976. – 416 с.
24. Ватин Н. И. Энергоэффективность ограждающих конструкций при капитальном ремонте / Н. И. Ватин, А. С. Горшков, Д. В. Немова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2013. – № 3(8). – С. 1–11
25. Вахнина Т. Н. Повышение огнестойкости древесных композитов / Т. Н. Вахнина, Л. А. Тихомиров // Сб. ст. Полимерные материалы пониженной горючести. ВоГТУ. Вологда. – 2011. – С. 96–98.
26. Вахнина Т.Н. Анализ статистической устойчивости процесса производства древесностружечных плит / Т.Н. Вахнина, А.В. Носкова // Актуальные проблемы лесного комплекса: сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 18. – Брянск: БГИТА. – 2007. – С. 84–85.
27. Волынский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость показателей физико-механических свойств древесины / В.Н. Волынский. Архангельск, АГТУ, 2006. – 196 с.
28. Волынский В.Н. Технология древесных плит и композиционных материалов / В.Н. Волынский. – СПб.: «Лань», 2010. – 336 с.



29. Выдрина Т.С. Тепловое старение изделий на основе древесных композиционных материалов / Т.С. Выдрина, А.В. Артёмов, В.Г. Дедюхин, В.Г. Бурындин // Химия растительного сырья. – 2007. – №2. – С. 101–106.
30. Гагарин В. Г. Определение зоны наибольшего увлажнения в стенах с фасадными теплоизоляционными композиционными системами с наружными штукатурными слоями / В. Г. Гагарин, К. П. Зубарев, В. В. Козлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета (Вестник ТГАСУ). – 2016. – № 1(54). – С. 125–132.
31. Гагарин В. Г. Моделирование эмиссии волокон из минераловатного утеплителя навесной фасадной системы с вентилируемой прослойкой / В. Г. Гагарин, С. В. Гувернюк, К. И. Лушин // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 9. – С. 27–29.
32. Генъш К.В. Окисленная целлюлоза. Получение. Применение в медицине / К.В. Генъш, Н.Г. Базарнова // Химия растительного сырья. – 2013. – №4. – С. 13–20.
33. Гисматулина Ю.А. Получение целлюлозы азотнокислым способом напрямую из соломы льна-межеумка / Ю.А. Гисматулина // Ползуновский вестник. – 2014. – № 3 – С. 160–163.
34. Гисматулина Ю.А. Сравнение целлюлоз, выделенных из мискантуса, с хлопковой целлюлозой методом ИК-Фурье спектроскопии / Ю.А. Гисматулина, В.В. Будаева // Ползуновский вестник. – 2014. – №3. – С. 177–181.
35. Гладий Ю.П. Строение макромолекулы целлюлозы. Квантово-химический расчет / Ю.П. Гладий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 5. – С. 25–28.
36. Гоготов А.Ф. Применение гидролизного лигнина как полимерной основы для химического обезвреживания полихлоралифатических соединений / А.Ф. Гоготов, В.П. Киселев, В.К. Станкевич, Е.Ю. Панасенкова, А.А. Чайка // Химия растительного сырья. – 2014. – №2. – С. 225–234.

37. Головков С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. М.: Лесная промышленность, 1987. – 224 с.
38. Голязимова, О. В. Механическая активация ферментативного гидролиза лигноцеллюлозы / О. В. Голязимова, А. А. Политов, О. И. Ломовский // Химия растительного сырья. – 2009. – №2. – С. 59–63.
39. Горелик, П. И. Современные теплоизоляционные материалы и особенности их применения / П. И. Горелик, Ю. С. Золотова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №3 (18). – С. 93–103.
40. Горетый В.В. Оценка влияния наноструктуры модифицированной древесины на прочность при статическом изгибе / В.В. Горетый, С.Ю. Нагда // Материалы 45-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Белгород: БелГУ. – 2006. – С. 95–96.
41. Горлов, Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий / Ю.П. Горлов. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.
42. ГОСТ 10633–2018. Плиты древесно-стружечные и древесноволокнистые. Общие правила подготовки и проведения физико-механических испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 16 с.
43. ГОСТ Р 53233–2016. Волокно хлопковое. Методы определения влажности. – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 4 с.
44. ГОСТ 32399–2013. Плиты древесно-стружечные влагостойкие. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 15 с.
45. ГОСТ 33121-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения стойкости клеевых соединений к температурно-влажностным воздействиям. – М.: Изд-во стандартов, 2015. – 21 с.
46. ГОСТ 4598–2018. Плиты древесно-волокнистые мокрого способа производства. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2018. – 12 с.
47. ГОСТ 595–79. Целлюлоза хлопковая. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 14 с.

48. ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 23 с.
49. ГОСТ Р 53292–2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 18 с.
50. ГОСТ Р 56561–2015/ISO/TR 11827:2012 Материалы текстильные. Определение состава. Идентификация волокон. – М.: Изд-во стандартов, 2015. – 58 с.
51. ГОСТ 16381–77. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 7 с.
52. ГОСТ 30244–94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 17 с.
53. Граник Ю.Г. Теплоэффективные ограждающие конструкции жилых и гражданских зданий / Ю.Г. Граник // Строительные материалы. – 1999. – № 2. – С. 4–6.
54. Грошев А.Е. Исследование различных видов наружных ограждающих конструкций в монолитном домостроении / А.Е. Грошев, М.П. Данкер, А.В. Боброшов, П.С. Замолоцких // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – №1. – С. 62–65.
55. Грунин Ю.Б. Характер изменения надмолекулярной структуры целлюлозы в процессе ее увлажнения / Ю.Б. Грунин, Л.Ю. Грунин, Н.Н. Шевелева, Д.С. Масас, С.В. Федосов, В.Г. Котлов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2017. – № 2 (368). С. 233–237.
56. Грунин Ю.Б. Изучение методом ЯМР-<sup>1</sup>H-релаксации характера надмолекулярных перестроек хлопковой целлюлозы в результате ее биохимической деградации / Ю.Б. Грунин, Т.Ю. Грунина, М.С. Иванова, С.В. Фе-

досов, В.Г. Котлов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 5 (383). С. 124–130.

57. Гусев Б. В. Изменение линейных размеров минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий / Б. В. Гусев, В. А. Езерский, П. В. Монастырев // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 8. – С. 32–34.

58. Гусев Б. В. Потеря массы минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий / Б. В. Гусев, В. А. Езерский, П. В. Монастырев // Кровельные и изоляционные материалы. – 2005. – № 2. – С. 48–49.

59. Дармов И.В. Исследование природных изолятов микромицетов *fusarium spp.* – продуцентов лигнолитических ферментов / И.В. Дармов, Е.И. Горшунова, Т.С. Тарасова // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2017. – Вып. 159. – №1. С. 72–84.

60. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, Ленингр. Отделение, 1974. – 264 с.

61. Жуков А. Д. Перенос тепла в высокопористых материалах / А. Д. Жуков, Т. В. Смирнова, А. В. Чугунков // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2012. – Вып. 3(23). – 8 с.

62. Запруднов В. И. Трехслойные конструкции с древесно-цементными теплоизоляционными слоями: монография / В. И. Запруднов. – М.: МГУЛ, 2006. – 322 с.

63. Золкин А.Ф. Об изменении водородных связей в процессе образования древесноволокнистых плит / А.Ф. Золкин, А.М. Кутневич, А.А. Леонович // В кн.: Исследования в области химии и технологии производства бумаги и картона. М., 1976. – 152 с.

64. Ибрагимов А.М. Опыт использования пылевидных лигноцеллюлозных отходов текстильных предприятий в качестве наполнителя для строительных композиционных материалов / А.М. Ибрагимов, Т.Н. Вахнина, И.В. Сусоева

// 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. – С. 483–488.

65. Иванов С.Н. Технология бумаги / С.Н. Иванов. М.: Лесн. пром-сть, 1970. – 696 с.

66. Иоелович М.Я. Изучение кристаллической структуры целлюлозы в растительных материалах / М.Я. Иоелович, А.Д. Тупурейне, Г.П. Веверис // Химия древесины. – 1989. – №5. – С.3–6.

67. Иоелович М.Я. Модели надмолекулярной структуры и свойства целлюлозы / М.Я. Иоелович // Высокомолекулярные соединения. – 2016. – Сер. А. – 58 (6). – С. 604–624.

68. Использование и обезвреживание отходов производства и потребления по видам экономической деятельности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/oxrana/tab1/oxr\\_otxod2.xls](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tab1/oxr_otxod2.xls).

69. Каримкулов К.М. Исследование целлюлозы хлопкового линта с применением таможенной химической экспертизы / К.М. Каримкулов, М.А. Аскаров // Пластические массы. – 2013. – №3. – С.35–37.

70. Кармадонов А.Н., Егоренко Ю.А. Возможности использования древесных отходов в промышленности и сельском хозяйстве / А.Н. Кармадонов, Ю.А. Егоренко // Ползуновский вестник. – 2004. – № 2. – С. 230–233.

71. Касаткин В.Б. Долговременные испытания армодеревянных балок в условиях Крайнего Севера / В.Б. Касаткин, В.Ф. Бондин // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1972. – № 11. – С. 12–14.

72. Катраков И.Б. Получение пресс-масс и плитных материалов на основе кавитированного растительного сырья / И.Б. Катраков, В.И. Маркин, Н.Г. Базарнова // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 3 (83). – С. 204–208.

73. Киселев И. Я. Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры / И. Я. Киселев // Строительные материалы. – 2003. – №7. – С. 17–19.
74. Киселева О. А. Влияние климатических воздействий на прочность строительных изделий из модифицированной древесины / О. А. Киселева, Е. Е. Плотникова, В. П. Ярцев // Материалы V Международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика». Пенза, 2006. – С. 147–150.
75. Коган А. Г. Механическая технология текстильных материалов / А. Г. Коган, С. А. Коган, А. А. Баранова. Витебск: ВГТУ, 1997. – 206 с.
76. Кодолов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов / В.И. Кодолов. М.: Химия, 1976. – 160 с.
77. Кокшаров С. А. Свойства льняного волокна селекционного сорта льна-долгунца «А-93» с опытных участков в тверской и костромской областях / С. А. Кокшаров, С.В. Алеева, Т. А. Кудряшова, А. Ю. Кудряшов // Химия растительного сырья. – 2008. – № 3. – С. 51-54.
78. Комаров В.И. Исследование межволоконных взаимодействий волокон в структуре бумаги / В.И. Комаров, Е.В. Дьякова, М.Н. Дмитриева // ИВУЗ. «Лесной журнал». – 2011. – № 1. – С. 109–116.
79. Копылов В. В. Полимерные материалы с пониженной горючестью / В. В. Копылов. М.: Химия, 1986. – 224 с.
80. Копылова А.И. Экспериментальное сравнение характеристик паропроницаемости основных строительных материалов / А.И. Копылова, Н.И. Ватин, И.И. Пестряков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №10 (25). – С. 98–108.
81. Корниенко, С.В. Температурный режим трехслойной стеновой панели / С.В. Корниенко // Жилищное строительство. – 2001. – №9. – С. 20–21.

82. Косточко А.В. Получение и исследование свойств целлюлозы из травянистых растений / А.В. Косточко, О.Т. Шипина, З.Т. Валишина, М.Р. Гареева, А.А. Александров // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 267–275.
83. Костылева С.В. Перспективные направления развития лесопромышленного комплекса в сфере переработки древесных отходов в Иркутской области / С.В. Костылева // Сб. научн. ст. XII Междунар. евразийского симпози.: Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6828/1/do-17\\_02.pdf](http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/6828/1/do-17_02.pdf).
84. Кочева Л.С. Структурная организация и свойства лигнина и целлюлозы травянистых растений семейства злаковых : дис. ... док. хим. наук 05.21.03 / Л.С. Кочева. – Сыктывкар : ГОУВПО "Архангельский государственный технический университет", 2008. – 381 с.
85. Кулагин Е.П. Утилизация попутных продуктов и отходов химической переработки древесины: монография. Н.Новгород: ННГАСУ, 2000. – 300 с.
86. Куприянов, В. Н. Проектирование ограждающих конструкций с учетом диффузии и конденсации парообразной влаги / В. Н. Куприянов, И. Ш. Сафин // Известия КазГАСУ. – 2011. – № 1(15). – С. 93–103.
87. Лакомкин В.Ю. Тепломассообменное оборудование предприятий (Сушильные установки) / В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин, Е.Н. Громова // ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2016. – 142 с.
88. Лапшин Д.Н. Модифицирование огнетушащих порошковых составов на основе фосфата и сульфата аммония в условиях интенсивных механических воздействий: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.01 / Д.Н. Лапшин. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2014. – 196 с.
89. Ласкеев П.Х. Производство древесной массы / П.Х. Ласкеев. М., 1967. – 582 с.

90. Левданский В.А. Экологически безопасный способ получения из древесины ели целлюлозного продукта с высоким содержанием альфа-целлюлозы / В.А. Левданский, А.В. Левданский, Б.Н. Кузнецов // Химия растительного сырья. – 2014. – №2. – С. 35–40.
91. Леонович А.А. Теория и практика изготовления огнезащищенных древесных плит / А.А. Леонович. Л., 1978. – 176 с.
92. Ломакин С.М. Замедлители горения для полимеров / С.М. Ломакин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета.– 2012. – Т. 15. – №7. – С. 71–86.
93. Лосев И.П., Тростянская Е.Б. Химия синтетических полимеров / И.П. Лосев, Е.Б. Тростянская.– 3-е изд. – М. : Химия, 1971. – 617 с.
94. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
95. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с
96. Лыков А.В. Теплообмен / А.В. Лыков. М., 1978. – 480 с.
97. Ляликов А. С. Методы расчета коэффициента теплопроводности сыпучих зернистых материалов / А. С. Ляликов // Известия Томского политехнического института. – 1960. – Т. 109. – С. 40–52.
98. Мамонтов С.А. Естественное старение древесных композитов в условиях умеренного климата / С.А. Мамонтов // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований. Материалы VI Международной научно-практической конференции. North Charlepton, USA. – 2015. – Т. I. – С. 96–98.
99. Маркин В.И. Основные направления микроволнового излучения при переработке растительного сырья (обзор) / В.И. Маркин, М.Ю. Чепрасова, Н.Г. Базарнова // Химия растительного сырья. – 2014. – №4. – С. 21–42.
100. Мартынов К.Я. Исследование ускоренного старения древесностружечных плит методом математического планирования эксперимента / К.Я. Мар-



тынов, В.М. Хрулев // Известия вузов. Строительство. Новосибирск. – 1984. – №12. – С. 78–81.

101. Машляковский Л.Н. Органические покрытия пониженной горючести / Л.Н. Машляковский, А. Д. Лыков, В. Ю. Репкин. Л.: Химия, 1989.– 184 с.

102. Медведев С.О. Перспективы развития гидролизного производства в лесопромышленных центрах Сибири / С.О. Медведев, Ю.А. Безруких, А.П. Мохирев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 2–1. – С. 400–403.

103. Мелони Т. Современное производство древесностружечных и древесноволокнистых плит: пер. с англ. / Т. Мелони. М., 1982. – 416 с.

104. Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины / Л.В. Мельникова. М., 2004. – 234 с.

105. Мельникова Л.В. Прочность цементно-стружечных плит из частиц шпона / Л.В. Мельникова, Назериан Мортеза. // Лесной вестник. – 2005. – № 6. – С. 54–58.

106. Михайлов Г.М., Серов Н.А. Пути улучшения использования вторичного древесного сырья / Г.М. Михайлов, Н.А. Серов. М., 1988. – 223 с.

107. Мохирев А.П. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования / А.П. Мохирев, Ю.А. Безруких, С.О. Медведев // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – Ч. 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011>.

108. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. Л., 1990. – 415 с.

109. Никитин В.М. Химия древесины и целлюлозы / В.М. Никитин, А.В. Оболенская, В.П. Щеголев. М.: Лесная промышленность, 1978. – 368 с.

110. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы / Н.И. Никитин. М.; Л.: изд-во АН СССР, 1962. – 711 с.

111. Никонович Г.В. Современные представления о структурной организации целлюлозы / Г.В. Никонович // В кн. Методы исследования целлюлозы. Рига, 1981. – С. 7–19.
112. Новиченок Л. Н. Теплофизические свойства полимеров / Л. Н. Новиченок, З.П. Шульман. Минск, 1971. – 120 с.
113. Обливин А.Н. Моделирование длительной прочности композиционных материалов на древесных наполнителях / А.Н. Обливин, И.В. Сапожников, М.В. Лопатников // Лесной вестник. – 2015.– №1. – С. 6–12.
114. Образование отходов производства и потребления по видам экономической деятельности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/oxrana/tab1/oxr\\_otxod1.xls](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tab1/oxr_otxod1.xls).
115. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве: Материалы симпозиума / Пер. с англ. В. А. Грабовского [и др.] ; Под общ. ред. А. И. Бродоцкого. М. : Гослесбумиздат, 1962. – 500 с.
116. Отлев И.А. Справочник по древесностружечным плитам / И.А. Отлев, Ц.Б. Штейнберг. М.: Лесная промышленность, 1983. – 240 с.
117. Оудиан Дж. Основы химии полимеров / Дж. Оудиан. М., 1974. – 614 с.
118. Петри В.Н. Лигноуглеводные древесные пластики / В.Н. Петри // Материалы Всесоюзного научно-технического совещания «Пластификация и модификация древесины». Рига, 1970. –360 с.
119. Пиргач В.С. Термическая обработка древесноволокнистых плит / В.С. Пиргач, Т. А. Корочкина. Обзорн. информ. Серии «Плиты и фанера». М., 1984. – 44 с.
120. Письмо Госкомэкологии РФ от 28.01.1997 N 03-11/29-251 «О Справочных материалах по удельным показателям образования важнейших видов отходов производства и потребления». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704418>.
121. Покровская Е.Н. Влияние старения на структуру и свойства полимерного композита древесины / Е.Н. Покровская // Материалы международной

научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса». Кострома: КГТУ, 2012. – С. 29–31.

122. Получение древесноволокнистых плит сухим способом производства, изготовленных с использованием древесноволокнистых отходов от форматно-обрезных станков / Морозов И. М. [ и др.] // Химия растительного сырья. – 2015. – № 4. – С. 119–124.

123. Пономарев А.Н. Термическое разложение древесины / А.Н. Пономарев // В кн.: Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. М.-Л., 1962. – С.586–611.

124. Портнов Ф. А. Термодинамические параметры поверхностного модифицирования древесины / Ф. А. Портнов, Е. Н. Покровская // Сб. ст. Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса сборник научных трудов III Международной научно-технической конференции. Кострома: КГТУ, 2015. – С. 29–32.

125. Постановление Правительства Нижегородской области № 431 от 2 октября 2008 года «Об утверждении концепции областной целевой программы "Развитие системы обращения с отходами производства и потребления в Нижегородской области на 2009 - 2014 годы (часть 1)». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/8527519/>.

126. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 445 от 18 июля 2014 г. «Об утверждении федерального классификационного каталога отходов». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_175358/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_175358/).

127. Принцева М. Ю. Термический анализ и инфракрасная спектроскопия газообразных продуктов термической деструкции в экспертном исследовании антипирированной древесины / М. Ю. Принцева, И. Д. Чешко // Пожарная безопасность. – 2014. – № 3. – С. 96–101.

128. Распоряжение Правительства РФ № 868-р от 10.05.2016 «Об утверждении Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.
129. Распоряжением от 25 января 2018 г. № 84-р «Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/Cons\\_doc\\_LAW\\_289114/](http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_289114/)
130. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер. М., 1979. – 384 с.
131. Роговин З.А. Химия целлюлозы / З.А. Роговин. М.: Химия, 1972. – 520 с.
132. Романченко А.С. Изучение сульфатов целлюлозы методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / А.С. Романченко, А.В. Левданский, В.А. Левданский, Б.Н. Кузнецов // Химия растительного сырья. – 2014. – №1. – С. 65–72.
133. Рощина С.И. Длительная прочность и деформативность треугольных арок с клееным армированным верхним поясом / С.И. Рощина // Материалы областной конференции. Владимир: ВГУ, 1999. – С. 35–37.
134. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
135. Румянцев Б. М. Р 86 Эксперимент и моделирование при создании новых изоляционных и отделочных материалов: монография / Б.М. Румянцев, А.Д. Жуков. – Москва, 2013. – 156 с.
136. Селяев В.П. Численное моделирование механического разрушения трехкомпонентного древеснонаполненного композита / В.П. Селяев, И.И. Меркулов, А.И. Меркулов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1997. – № 9. – С. 62–67.

137. Семенов Ю.П. Расчет процессов термообработки в деревообрабатывающем производстве / Ю.П. Семенов, А.Б. Левин [и др.]. М., 2005. – 100 с.
138. Смирнова, Т. В. Повышение эксплуатационной стойкости минераловатных изделий двойной плотности. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2016. – 45 с.
139. Смолин А.С. Межволоконные связи и макроструктура бумаги и картона. Автореф. дис. ... док. техн. наук. – СПб., 1999. – 360 с.
140. Смолин А.С. О развитии технологии бумаги и картона / А.С. Смолин // ИВУЗ. «Лесной журнал». – 2013. – № 2. – С.163–172.
141. Смолин А.С. Вторичные волокнистые материалы из отходов производства и потребления картонно-бумажной продукции / А.С. Смолин, А.В. Кулешов, М.В. Ванчаков // Росс. хим. журн. – 2011. – Т.LV. – № 1. – С. 50–56.
142. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М. : Госстрой России, 2003. – 27 с.
143. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. – М. : Госстрой России, 2003. – 26 с.
144. Солечник Н.Я. Производство древесноволокнистых плит / Н.Я. Солечник. М., 1963. – 338 с.
145. Структура и физико-химические свойства целлюлоз и нанокомпозитов на их основе / Л.А. Алешина, Е.Н. Власова, Л.Ю. Грунин [и др.]. Петрозаводск, 2014. – 240 с.
146. Сулейманов А.М. Принципы разработки методов ускоренных испытаний на долговечность полимерных строительных материалов / А.М. Сулейманов // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 602–603.
147. Сусоева И. В. Физико-механические показатели теплоизоляционных материалов из отходов растительного сырья / И. В. Сусоева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 5 (713). – С. 71–79.
148. Сусоева И. В. Исследование интенсивности образования пылевидных отходов текстильных предприятий, используемых для производства строи-

- тельных лигноцеллюлозных композиционных материалов / И. В. Сусоева, Т. Н. Вахнина, А. М. Ибрагимов // Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 2 (362). – С. 219–222.
149. Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт, обезвреживание). Справочник / В.Г. Систер, А.Н. Мирный, Л.С. Скворцов и др. // М., АКХим. К. Д. Панфилова, 2001. – 319 с.
150. 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.
151. Техническая гидродинамика древесины / В. И. Пятякин, Ю. Г. Тишин, С. М. Базаров. М., 1990 – 303 с.
152. Титунин А.А. Исследование эксплуатационных показателей древесных композиционных материалов с использованием вторичного древесного сырья / А.А. Титунин, Т.Н. Вахнина // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. – 2011. – №7 – С. 641–645.
153. Титунин А.А. Влияние циклических температурно-влажностных воздействий на свойства композитов из растительного сырья / А.А. Титунин, И.В. Сусоева, Т.Н. Вахнина // Сб. научн. ст. VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения: Строение, свойства и качество древесины. – 2018. С. 196–200.
154. Титунин А.А. Применение математической теории теплопроводности для проектирования ограждающих конструкций из клееного бруса / А.А. Титунин, А.М. Ибрагимов // Строительные материалы. – 2010. – №1. – С. 64–65.
155. Турковский С.Б. Опыт применения клееных деревянных конструкций в Московской области / С.Б. Турковский.– Вып. 2. – М: Стройиздат. 1987. – 54 с.

156. Турковский С.Б. Результаты натурных обследований деревянных конструкций / С.Б. Турковский, Ю.А. Варфоломеев // Промышленное строительство. – 1984. – №6. – С. 19–20.
157. Турковский С.Б. Зависимость состояния клееных деревянных конструкций от влажности окружающего воздуха / С.Б. Турковский, А.Д. Ломакин, А.А. Погорельцев // Промышленное и гражданское строительство. Труды института. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – 2012. – №3. – С. 30–32.
158. Уайз Л. Химия древесины / Л. Уайз, Э. Джан. Москва-Ленинград, Гослесбумиздат, 1959. – 608 с.
159. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н. Уголев. М.: МГУЛ, 2001. – 340 с.
160. Успехи химии целлюлозы и крахмала. Сб. под ред. Дж. Хонимена. М., 1962. – 382 с.
161. Уткина В. Н. Прогнозирование долговечности строительных материалов и конструкций методом деградационных функций / В. Н. Уткина, В.П. Селяев // Материалы научно-практической конференции «Долговечность строительных материалов и конструкций». Саранск, 1995. – С. 74–75.
162. Федосов С. В. Методика экспериментального исследования массопроводных и теплопроводных характеристик волокнистых и древесноволокнистых материалов / С. В. Федосов, В. Г. Котолов, Р. М. Алоян, М. В. Бычков, М. А. Иванова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 5. – С. 105–108.
163. Федосов С.В. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Ч. 1. Общая физико-математическая постановка задачи / С.В. Федосов, В.Г. Котолов, Р.М. Алоян, Ф.Н. Ясинский, М.В. Бочков // Строительные материалы. 2014. – № 7. – С. 86–91.
164. Федосов С.В. Теоретические основы тепломассопереноса в перспективных технологиях производства материалов текстильной и строительной

отраслей промышленности / Федосов С.В., Акулова М.В., Кокшаров С.А. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6. – С. 170–174.

165. Фенгел Д. Древесина / Д. Фенгел, Г. Веген. Москва, Лесная промышленность, 1988. – 512 с.

166. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123–ФЗ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_78699/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/)

167. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 № 261-ФЗ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/)

168. Фляте Д.М. Свойства бумаги / Д.М. Фляте. М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 680 с.

169. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений / А.С. Фрейдин. М.: Химия, 1981. – 272 с.

170. Фрейдин А.С. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины / А.С. Фрейдин, К.Т. Вуба. М.: Лесная промышленность, 1980. – 223 с.

171. Фридлянд Г. И. Справочник по химической обработке льняных тканей / Г. И. Фридлянд. М., 1973. – 406с.

172. Фролов М.В. Структурная механика бумаги / М.В. Фролов. М.: Лесная промышленность, 1982. – 272 с.

173. Холькин Ю.И. Хроматография в химии древесины / Ю.И. Холькин. М.: Лесная промышленность, 1969. – 287 с.

174. Хрулев В. М. Долговечность клееной древесины / В. М. Хрулев. М.: Лесная промышленность, 1971. – 160 с.

175. Хрулев В.М. Новые концепции в теории и технологии композиционных древесно-полимерных материалов / В.М. Хрулев, Н.А. Машкин // Изве-



ствия высших учебных заведений. Строительство. Новосибирск. – 1999. – № 7. – С. 61–64.

176. Хрулев В.М. Долговечность клеевых соединений древесины, пропитанной синтетическими олигомерами / В.М. Хрулев // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1969. – № 2. – С. 61–68.

177. Хрулев В.М. Цементностружечные плиты в строительстве / В.М. Хрулев, М.Г. Мальцев, Р.Ш. Хасанов. Уфа: УГНТУ, 2001. – 96 с.

178. Хрулев В.М. Современные представления о структурообразовании древесных композиционных материалов / В.М. Хрулев, Н.А. Машкин, Н.Г. Мальцев // Материалы Международной конференции «Композиционные строительные материалы. Теория и практика» Ч. 2. Пенза: Приволжский дом знаний, 2000. – С. 138–140.

179. Чистова Н. Г. Некоторые вопросы совершенствования использования дополнительного древесного сырья на лесоперерабатывающих предприятиях Ангаро-Енисейского региона / Н. Г. Чистова // Фундаментальные исследования. – 2004. – № 3. – С. 122–124.

180. Шварцман Г. М. Производство древесностружечных плит / Г. М. Шварцман, Д. А. Щедро. 4-е изд., переработанное и дополненное. М.: Лесная промышленность, 1987. – 320 с.

181. Шегельман И.Р. Место биоэнергетики в топливно-энергетическом балансе лесопромышленного региона / И.Р. Шегельман, П.О. Щукин, М.А. Морозов // Наука и бизнес: пути развития. – 2011. – № 6. – С. 151–154.

182. Шестак Я. Теория термического анализа / Я. Шестак. М.: Мир, 1987. – 456 с.

183. Шумный В.К. Поиск возобновляемых источников целлюлозы для многоцелевого использования / В.К. Шумный [и др.] // Вестник ВОГиС. – 2010. – Том 14. – С. 569–578.

184. Эдвабник В. Г. К теории обобщенной проводимости смесей / В. Г. Эдвабник // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–2.

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19855>.

185. Электронный ресурс. – Режим доступа: [http://www.lesprom.com/ru/news/Минприроды\\_РФ\\_к\\_2030\\_г\\_треть\\_отходов\\_лесопромышленного\\_производства\\_будет\\_перерабатываться\\_в\\_биотопливо\\_78093/](http://www.lesprom.com/ru/news/Минприроды_РФ_к_2030_г_треть_отходов_лесопромышленного_производства_будет_перерабатываться_в_биотопливо_78093/)

186. Ярцев В. П. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации / В. П. Ярцев, О. А. Киселева. Тамбов: ТГТУ, 2009. – 124 с.

187. Ярцев В. П. Влияние силовых и атмосферных воздействий на теплофизические характеристики минераловатных плит / В. П. Ярцев, А. М. Дорофеев // Кровельные и изоляционные материалы. – 2010. – № 4. – С. 14–15.

188. Ярцев В. П. Эксплуатационные свойства и долговечность теплоизоляционных материалов / В. П. Ярцев, А. А. Мамонтов, С. А. Мамонтов // Кровельные и изоляционные материалы. – 2013. – № 1. – С. 8–11.

189. Ясин Ю.Д. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций / Ю.Д. Ясин, В.Ю. Ясин, А.В. Ли // Строительные материалы. – 2002. – № 5. – С. 33–35.

190. Abbey D.E. Chronic respiratory symptoms associated with estimated long-term ambient concentrations of fine particulates less than 2.5 microns in aerodynamic diameter (PM<sub>2.5</sub>) and other air pollutants / D.E. Abbey, B.E. Ostro, F. Petersen, R.J. Burchette // Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology. – 1995. №5(2). P. 137–145.

191. Abubakar M. Comparative study of thermal insulation boards from leaf and bark fibres of camel's foot / M.Abubakar, [et al.] // Nigerian Journal of Technology. – 2018. – Vol. 37. – No. 1. – Pp. 108–114.

192. Aktacir M. A. A case study for influence of building thermal insulation on cooling load and air-conditioning system in the hot and humid regions / M. A. Ak-

- tacir, O. Buyukalaca, T. Yilmaz // *Applied Energy*. – 2010. – Vol. 87. – Pp. 599–607.
193. Al-Rabghi O. M. A survey of energy efficient strategies for effective air conditioning / O. M. Al-Rabghi, M. M. Akyurt // *Energy Convers. Manage.* – 2004. – Vol. 45. – Pp. 1643–1654.
194. Alternatives to flame retarded EPS in buildings. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.saferinsulation.org/wp-content/uploads/2013/07/COWI-nonFR-EPS>.
195. Arnon Bentur. Fibre reinforced cementitious composites / Arnon Bentur, Sidney Mindess. Taylor&Francis. 2007. 625 p.
196. Athanasios - Valavanidis. Municipal Solid Waste and Environmental Pollution. Trends of Municipal Waste Management in European Countries and in Greece. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/273888008\\_Municipal\\_Solid\\_Waste\\_and\\_Environmental\\_Pollution\\_Trends\\_of\\_Municipal\\_Waste\\_Management\\_in\\_European\\_Countries\\_and\\_in\\_Greece](https://www.researchgate.net/publication/273888008_Municipal_Solid_Waste_and_Environmental_Pollution_Trends_of_Municipal_Waste_Management_in_European_Countries_and_in_Greece)
197. Azra K. Development and performance evaluation of natural thermal insulation materials composed of renewable resources / K. Azra // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – P. 2518–2523.
198. Baiardo M. Flax fibre–polyester composites / M. Baiardo, E. Zini, M. Scandola // *Composites: Part A*. – 2004. – Vol. 35. – Pp. 703–710.
199. Baley C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase / C. Baley // *Composites Part A*. – 2002 – Vol. 33(7). – P. 939–948.
200. Bari M.N. Potential agricultural lignocellulosic waste materials for bioconversion / M.N. Bari, F. S. Shashi, M.H. Habib // *Proceedings of 3rd International Conference on Advances in Civil Engineering* – 2016. – P. 630–634.

201. Binici H. Engineering properties of insulation material made with cotton waste and fly ash / H. Binici, O. Aksogan // *Journal of material cycles and waste management*. – 2015. – Vol. 17. – № 1. – P. 157–162.
202. Bos H.L. In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres / H.L. Bos, A.M. Donald // *Journal Mater Sci*. – 1999. – Vol. 34(13). – P. 3029–34.
203. Bourbigot S. Flameretardancy of polylactide: an overview / S. Bourbigot, G. Fontaine // *PolymerChemistry*. – 2010. – Vol. 1. – P. 1413–1422.
204. Brink D. L. Making alcohol from cotton gin waste and cotton stalks / D. L. Brink // *Proceedings of the symposium on: cotton gin trash utilization alternatives*, 1981. – Pp. 20–27.
205. Cantero G. Effects of fiber treatment on wettability and mechanical behaviour of flax/polypropylene composites / G. Cantero, A. Arbelaiz, R. Llano-Ponte, I. Mondragon // *Compos. Sci. Technol*. – 2003. – Vol. 63. – Pp. 1247–1254.
206. Carlos A. G. State-of-the-art of waste wood supply chain in Germany and selected European countries / A.G. Carlos, H. Guido. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/320005202>
207. Chen Y. Natural fibers for automotive nonwoven composites / Y. Chen, O. Chiparus, L. Sun // *Journal of Industrial Textiles*. – 2005. – Vol. 35. – P. 47–62.
208. Dennis D.T. Constitution of cellulose microfibrils / D.T. Dennis, R.D. Preston // *Nature*. – 1961. – Vol. 191. – P. 667–668.
209. Dereca Watkins. Jeelan Extraction and characterization of lignin from different biomass resources / Dereca Watkins, Nuruddin Md., Mahesh Hosur, Alfred Tcherbi-Narteh, Shaik Jeelan // *Journal Mater Res Technol*. – 2015. – No. 4. – P. 26–32.
210. DIN EN 321 Wood-based panels – Determination of moisture resistance under cyclic test conditions. [Электронный ресурс] – режим доступа: [https://global.ihs.com/doc\\_detail.cfm?document\\_name=DIN%20EN%20321](https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=DIN%20EN%20321)
211. Dolmetsch H. Fractionation of esterified cellulose / H. Dolmetsch // – 1961. – Vol. 176. P. 138–139.

212. Dubrovski P.D. Woven Fabric Engineering / P.D.Dubrovski // Published by Sciyo Janeza Trdine, Croatia, 2010. – P. 414.
213. Dulermo T. Bioconversion of agricultural lignocellulosic residues into branched-chain fatty acids using *Streptomyces lividans* / T. Dulermo, F. Coze, M. Virolle // OCL. – 2016. – Vol. 23. – No. 2. P. 1–8.
214. Elinwa A.U. Ash from timber waste as cement replacement material / A.U. Elinwa, Y.A. Mahmood // Cement and Concrete Composites. – 2002. – No. 24(2). Pp. 219–222.
215. Emanoel H. P. Influence of stacking sequence on the mechanical and dynamic mechanical properties of cotton/glass fiber reinforced polyester / H. P. Emanoel // Composites Materials Research. – 2016. – No. 19 (3). – P. 542–547.
216. Erakhrumen A.A. Selected physico-mechanical properties of cement-bonded particleboard made from pine (*Pinus caribaea* M.) sawdust-coir (*Cocos nucifera* L.) mixture / A.A. Erakhrumen, S.E. Areghan, M.B. Ogunleye, S.L. Larinde, O.O. Odeyale // Scientific Research and Essay. – 2008. – No. 3(5). – Pp. 197–203.
217. European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. 2013. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://glassresearch.ru/uploads/items/NDT/GLS\\_Adopted\\_03\\_2012.pdf](http://glassresearch.ru/uploads/items/NDT/GLS_Adopted_03_2012.pdf).
218. Faruk O. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010 / O. Faruk, A.K. Bledzki, H.-P. Fink // Progress in Polymer Science. – 2012. – Vol. 37. – P. 1552–1596.
219. Focke W.W. The influence of stearic acid coating on the properties of magnesium hydroxide, hydromagnesite, and hydrotalcite powders / W.W. Focke, D. Molefe, F. Labuschagne // Journal of Materials Science. – 2009. – Vol. 44. – P. 6100–6109.
220. Glowacki R. The use of coconut husk in high pressure laminate production / R. Glowacki, M. C. Barbu, J. Van Wijck // Journal of Tropical Forest Science. – 2012. – V. 24. – No. 1. – P. 27–36.

221. Halvarsson S. Manufacture of non-resin wheat straw fibreboards / S. Halvarsson, H. Edlund, M. Norgren // *Industrial Crops and Products*. – 2009. – V. 29. – No. 2. – P. 437–445.
222. Halvarsson S. Properties of medium-density fibreboard (MDF) based on wheat straw and melamine modified urea formaldehyde (UMF) resin / S. Halvarsson, H. Edlund, M. Norgren // *Industrial Crops and Products*. – 2008. – Vol. 28. – No. 1. – P. 37–46.
223. Han G. Development of high-performance UF-bonded reed and wheat straw medium-density fiberboard / G. Han, K. Umemura, M. Zhang // *Journal of Wood Science*. – 2001. – Vol. 47. – No. 5. – P. 350–355.
224. Hapuarachchi T.D. Fire retardancy of natural fibre reinforced sheet moulding compound / T.D. Hapuarachchi, G. Ren, M. Fan // *Applied Composite Materials*. – 2007. – Vol. 14. – P. 251–264.
225. Hashin Z. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials / Z. Hashin, S. Shtrikman // *Journal of applied physics*. – 1962. – Vol. 33. – No. 10. – Pp. 3125–3131.
226. Hauser G. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden / G. Hauser, H. Stiegel // *Energieeinsparverordnung - EnEV vom 16. Nov. 2001 : Bundesgesetzblatt Jahrgang*. – 2001. – Teil I. – Nr.59. – P. 3085–3102.
227. Haykir N.I. Pretreatment of cotton stalk with ionic liquids including 2-hydroxy ethyl ammonium formate to enhance biomass digestibility / N.I. Haykir, E. Bahcegul, N. Bicak, U. Bakir // *Industrial Crops and Products*. – 2012. – No. 41. – P. 430–436.
228. Hearle I. Fine structure of fibers and crystalline polymers; fringed fibril structure. *Journal of Applied Polymer Science*. – 1963. – Vol. 7. – P. 1175–1192.
229. Henock Dandena Dibaba. Permeability barriers for composites ageing mechanisms and surface treatment of polymeric matrix composites under cyclic

- load. *Materials Processing Technology*. 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/113852>
230. Hess K. Ultrastructure of Fortisan / K. Hess, E. Gutter, H. Mahl // *Kolloid-Zeitschrift*. – 1958. – No. 158. – P. 115–119.
231. Hicran Altuğ Eftade O. Gaga Effects of air pollution on lung function and symptoms of asthma, rhinitis and eczema in primary school children / Hicran Altuğ Eftade O. Gaga // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2013. – Vol. 20(9). P. 6455–6467.
232. Hirschler M. Reduction of smoke formation from and flammability of thermoplastic polymers by metal oxides / M. Hirschler // *Polymer*. – 1984. – Vol. 25. – P. 405–411.
233. Holbery J. Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications / J. Holbery, D. Houston // *Journal of Manufacturing*. – 2006. – Vol. 58. – P. 80–86.
234. Hollingbery L. The thermal decomposition of huntite and hydromagnesite – A review / L. Hollingbery, T. Hull // *Thermochimica Acta*. – 2010. – Vol. 509. – P. 1–11.
235. Hsieh Y-L. Single fiber strength variations of developing cotton fibers - strength and structure of G.Hirsutum and G.Barbedness / Y-L Hsieh, X-P Hu, A.Wang // *Textile Research Journal*. – 2000. – Vol. 70. – P. 682–690.
236. Ibrokhim Y. Abdurakhmonov. Phytochrome RNAi enhances major fibre quality and agronomic traits of the cotton *Gossypium hirsutum* L / Ibrokhim Y. Abdurakhmonov, Zabardast T. Buriev // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – P. 1–10.
237. Ibragimov A. The decline of combustibility of heat-insulating composite plates from plant wastes / A. Ibragimov, T. Vakhnina, I. Susoeva, A. Titunin // *MATEC Web of Conferences VI Международная научная конференция "интеграция, партнерство и инновации в строительстве, Наука и образование"*

- (IPICSE-2018). – 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/329648262\\_](https://www.researchgate.net/publication/329648262_)
238. Incineration and human health. State of Knowledge of the Impacts of Waste Incinerators on Human Health», Michelle Allsopp, Pat Costner and Paul Johnston, Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, UK, 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.greenpeace.org/norway/Global/norway/p2/other/report/2001/incineration-and-human-health.pdf>
239. Incropera, F. Fundamentals of heat and mass transfer / F. Incropera, D. DeWitt. 6 edition. New York: Wiley, 2007. – 997 p.
240. Ioelovich M. Cellulose nanostructured natural polymer / M. Ioelovich. LAP, Saarbrücken, 2014. – 77 p.
241. Ioelovich M. Nanocellulose – fabrication, structure, properties and application in the health care and cure / M. Ioelovich // Fabrication and Self-Assembly of Nanobiomaterials: Applications of Nanobiomaterials Ed. A.M. Grumezescu. Elsevier, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/291312496\\_Nanocellulose\\_-\\_Fabrication\\_Structure\\_Properties\\_and\\_Application\\_in\\_the\\_Health\\_Care\\_and\\_Cure](https://www.researchgate.net/publication/291312496_Nanocellulose_-_Fabrication_Structure_Properties_and_Application_in_the_Health_Care_and_Cure)
242. Ioelovich M. Y. Cellulose enzymatic hydrolysis / M. Y. Ioelovich, E. Morag // BioResources. – 2011. – Vol. 6. – № 3. – P. 2818–2835.
243. Jang J.Y. Thermal stability and flammability of coconut fiber reinforced poly (lactic acid) composites / J.Y. Jang, T.K. Jeong, H.J. Oh // Composites Part B:Engineering. – 2012. – Vol. 43. – P. 2434–2438.
244. Jinchun Z. Recent development of flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices / Z. Jinchun // Materials. – 2013. – No. 6. – P. 5171–5198.
245. Jiri Militky. Structure and properties of cotton fiber: a literature review. 2009. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:



<https://ru.scribd.com/doc/30439788/Structure-and-Properties-of-Cotton-Fiber-A-Literature-Review>.

246. Jones E.J. The ultraviolet absorptions spectra of complex hydroxyaromatic compounds and derivatives, with particular reference to lignin / E.J. Jones // TAPPI. – 1949. – Vol. 32. – P. 311–315.
247. Joonas E. Wintertime hygroscopicity and volatility of ambient urban aerosol particles / Joonas E. // Atmospheric chemistry and physics. – 2018. – Vol. 18(7). – P. 4533–4548.
248. Kamel S. Nanotechnology and its applications in lignocellulosic composites, a mini review / S. Kamel // Express Polymer Letters. – 2007. – Vol. 1. – No. 9. – P. 546–575.
249. Kanagaraj K. C. Solid wastes generation in the leather industry and its utilization for cleaner environment / K. C. Kanagaraj, N. K. Velappan, B. Chandra // Journal of Scientific & Industrial Research. – 2006. – V. 65. – No. 7. – P. 541–548.
250. Khanjanzadeh H. Utilization of bio-waste cotton (*Gossypium hirsutum* L.) stalks and underutilized paulownia (*paulownia fortunei*) in wood-based composite particleboard / H. Khanjanzadeh, A. A. Bahmani, A. Rafeghi, T. Tabarsa // African Journal of Biotechnology. – 2012. – Vol. 11(31). – P. 8045–8050.
251. Khuwijitjaru P. Utilization of plant-based agricultural waste by subcritical water treatment / P. Khuwijitjaru // Japan Journal of Food Engineering. – 2016. – Vol. 17. – No. 2. – P. 33–39.
252. Kozłowski R. Flammability and fire resistance of composites reinforced by natural fibers / R. Kozłowski, M. Władysław-Przybylak // Polymers for Advanced Technologies. – 2008. – Vol. 19. – P. 446–453.
253. Kreith F. Principles of heat transfer / F. Kreith, R.M. Manglik, M.S. Bohn. 7 edition. Cengage Learning. 2010. – 784 p.

254. Krischer O. Einfluss der feuchtigkeit, koernung und temperature auf wärmeleitsfähigkeit körnigen körper / O. Krischer // Beichefte zum Gesundheits-Ingenieur. – 1934. – Vol. 33. – P. 1–10.
255. Ku H. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites / H. Ku, H.Wang, N. Pattarachaiyakoop, M. Trada // Composites Part B: Engineering. – 2011. – Vol. 42. – No. 4. – P. 856–873.
256. La Rosa A. D. Bio-based versus traditional polymer composites. A life cycle assessment perspective / A. D. La Rosa, G.Recca, J. Summerscales, A. Latteri, G. Cozzo, G. Cicala // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 74. – Pp.135–144.
257. Lachos-Perez D. Applications of subcritical and supercritical water conditions for extraction, hydrolysis, gasification, and carbonization of biomass; a critical review / D. Lachos-Perez, A.B. Brown, A. Mudhoo // Biofuel Research Journal. – 2017. – Vol. 4. – No. 2. – P. 611–626.
258. Lacrimioara S. Bioethanol production from wood waste / S. Lacrimioara, V. Cerasel, R. Marius // Studia ubb ambientum, Lix. – 2014. – Vol. 1–2. – P. 149–154.
259. Larkin P. J. Infrared and raman spectroscopy: principles and spectral interpretation / P. J. Larkin. Elsevier, 2011. – 230 p.
260. Layth Mohammed. A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications / Layth Mohammed, M.N. M. Ansari, Grace Pua, Mohammad Jawaid // International Journal of Polymer Science. – 2015. – Vol. 2. – P. 1–15.
261. Leisewitz A. Substituting environmentally relevant flame retardants: assessment fundamentals. Results and summary overview / A. Leisewitz, H. Kruse, E. Schramm Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), 2001. – 204 p.
262. Libo Y. Flax fibre and its composites – A review / Y. Libo, C. Nawawi, J. Krishnan // Composites: Part B. – 2014. – Vol. 56. – P. 296–317.

263. Lide D. R. Handbook of Chemistry and Physics / D. R. Lide // 79th Edition. CRC Press. Boca Raton, 1998. – 2760 p.
264. Lomakin S.M. Ecological aspects of flame retardancy / S.M. Lomakin, G.E. Zaikov // V S P International Science Publishers, Zeist Holland, 1999. – 158 p.
265. Manley, R. The molecular morphology of native cellulose / R. Manley // Trend. – 1965. – Vol. 5. – P. 4–7.
266. Manoj K.T. Steel Slag Utilization — Overview in Indian Perspective / K.T. Manoj // International Journal of Advanced Research. – 2016. – Vol. 4(8). – P. 2232–2246.
267. Marilena Kampa Human Health effects of air pollution / Marilena Kampa Human // Environmental Pollution. – 2008. – Vol. 151(2). – P. 362–370.
268. Matko S. Flame retardancy of biodegradable polymers and biocomposites / S. Matko, A. Toldy, S. Keszei // Polymer Degradation and Stability. – 2005. – Vol. 88. – P. 138–145.
269. Mehta G. Effect of fiber surface treatment on the properties of biocomposites from nonwoven industrial hemp fiber mats and unsaturated polyester resin / G. Mehta, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, M. Misra // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 99. – No. 3. – P. 1055–1068.
270. Mngomezulu M.E. Review on flammability of biofibres and biocomposites / M.E. Mngomezulu, M.J. John, V. Jacobs // Carbohydrate Polymers. – 2014. – Vol. 111. – P. 149–182.
271. Mohanty A. K. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview / A. K. Mohanty, M. Misra, L. T. Drzal // Composite Interfaces. – 2001. – Vol. 8. – P. 313–343.
272. Mohini S. Composite materials from natural resources: recent trends and future potentials / S. Mohini, P. Asokan // Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials. – 2011. – Vol.09. – P. 121–157.

273. Monica Garcez. Assessment of mix proportions for developing lightweight cementitious composites with wood wastes / Monica Garcez, Estela Garcez, Aline Machado, Darci Gatto // *Revista Árvore*. – 2017. – No. 41(1). – P. 1–9.
274. Monteiro S. Natural-fiber polymer-matrix composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly / S. Monteiro, F. Lopes, A. Ferreira // *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2009. – Vol. 61. – P. 17–22.
275. Nahed A. Organosolv pulping of cotton linter. II. Effect of dioxane and anthraquinone on cotton linter properties / A. Nahed, Abd el-Ghany // *Cellulose Chemistry and Technology*. – 2012. – Vol. 46 (1–2). P. 137–145.
276. Nagy M. Catalytic hydrogenolysis of ethanol organosolv lignin / M. Nagy, K. David, G.J.P. Britovsek, A.J. Ragauskas // *Holzforschung*. – 2009. – Vol. 63(5). – P. 513–520.
277. Nam T.H. Interfacial, mechanical and thermal properties of coir fiber-reinforced poly(lactic acid) biodegradable composites / T.H. Nam, S. Ogihara, S. Kobayashi // *Advanced Composite Materials*. – 2012a. – Vol. 21. – P. 103–122.
278. Norulizani M.A. Effects of fiber treatment on morphology, tensile and thermogravimetric analysis of oil palm empty fruit bunches fibers / M.A. Norulizani, M.T. Paridah, U.M.K. Anwar, Nor M.Y. Mohd, P. S. H'Ng // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – Vol. 45. – No. 1. – P. 1251–1257.
279. Nusirat A. S. Utilizing wood wastes as rein for cement in wood cement composite bricks / A.S. Nusirat // *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*. – 2015. – Vol. 65(2). – Pp. 31–37.
280. Palumbo M. Characterization of thermal insulation materials developed with crop wastes and natural binders / M. Palumbo, A. Navarro, J. Avellaneda, A. M. Lacasta // *World Barcelona*. – 2014. – P. 1–10.
281. Pawan R. Synthesis of aluminium trihydrate from kaolin through alkali dissolution method / R. Pawan, Pradeep H.N. // *International Journal of Technical Research and Applications*. – 2015. – Vol. 3(4). – Pp. 182–184.

282. Pelaez-Samaniego M.R. Production of sugars from wood waste materials via enzymatic hydrolysis / M.R. Pelaez-Samaniego, K.R. Englund // *Waste Biomass Valor.* – 2017. – Vol. 8. – P. 883–892.
283. Planes E. Influence of fillers on mechanical properties of ATH filled EPDM during ageing by gamma irradiation / E. Planes, L. Chazeau, G. Vigier, J. Fournier, I.S. Royaud // *Polymer Degradation and Stability.* – 2010. – Vol. 95. – P. 1029–1038.
284. Quintana G. Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch / G. Quintana, J. Velásquez, S. Betancourt // *Industrial Crops and Products.* – 2009. – V. 29. – No. 1. – P. 60–66.
285. Rahman M. Chemical treatments of cotton linter cellulose fiber for composite application / M. Rahman // *American chemical science journal.* – 2016. – No. 16 (4). – P. 1–7.
286. Raknes E. Langtidsbestandighet av lim for baerende trekonstruksjoner / E. Raknes // *Norsk Skogindustri.* – 1975. – Vol. 30. – No. 6. – P. 455–469.
287. Ronald E. Wyzga Health effects of acid aerosols / E. Wyzga Ronald // *Water, Air, and Soil Pollution.* – 1995. – Vol. 85(1). – P. 177–188.
288. Saad M.J. Mechanical and physical properties of low density kenaf core particleboards bonded with different resins / M.J. Saad, I. Kamal // *Journal of Science and Technology.* – 2012. – Vol. 4. – P. 17–32.
289. Shinoj S. Oil palm fiber (OPF) and its composites: a review / S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi, M. Kochubabu // *Industrial Crops and Products.* – 2011. – Vol. 33. – No. 1. – P. 7–22.
290. Shitu A. Sub-critical water as a green solvent for production of valuable materials from agricultural waste biomass: A review of recent work / A. Shitu, S. Izhar, T.M. Tahir // *Global J. Environ. Sci. Manage.* – 2015. – Vol. 1(3). – P. 255–264.

291. Singhadej T. Particle boards from papyrus fibers as thermal insulation / T. Singhadej, K. Supreya // *Journal of Applied Sciences*. – 2011. – Vol. 11. – P. 2640–2645.
292. Straube J.F. Moisture in Buildings / J.F. Straube // *ASHRAE Journal*. – 2002. – P. 1–6.
293. Stuarda T. Structural biocomposites from flax—Part I: Effect of bio-technical fibre modification on composite properties / T. Stuarda, Q. Liub, M. Hughesb // *Composites: Part A*. – 2006. – Vol. 37 – P. 393–404.
294. Stylianos Kephelopoulos Health risks from indoor particulate matter (IN-DEX-PM) *Fresenius Environmental Bulletin*. – 2010. – Vol. 19(11). – P. 2458–2471.
295. Susoeva I.V. The performance of composites from vegetable raw materials with changes in temperature and humidity / I.V. Susoeva, T.N. Vakhnina, A.A. Titunin, J.A. Asatkina // *Magazine of Civil Engineering*. – 2017. – No. 3(71). – P. 39–50.
296. Tabarsa T. Mechanical and physical properties of wheat straw boards bonded with a tannin modified phenol–formaldehyde adhesive / T. Tabarsa, S. Jahanshahi, A. Ashori // *Composites Part B: Engineering*. – 2011. – Vol. 42(2). – P. 176–180.
297. Tawakkal I.S.M.A. Effect of kenaf fibre loading and thymol concentration on the mechanical and thermal properties of PLA/kenaf/thymol composites / I.S.M.A. Tawakkal, M.J. Cran, S.W. Bigger // *Industrial Crops and Products*. – 2014. – Vol. 61. – P. 74–83.
298. Thi T. L. Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices / T. L. Thi // *Composites Science and Technology*. – 2006. – Vol. 66. – Issues 7–8. – P. 952–963.
299. Tonnesen B. Chain folding – a possibility to be considered in connection with the cellulose molecule / B. Tonnesen, O. Ellefsen // *Norsk Skogind.* – 1960. Vol. 14 (7). P. 266–269.

300. Václavík, V. Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete / V. Václavík, T. Dvorský, V. Dirner, J. Daxner, M. Šťastný // *Tehnički vjesnik*. – 2012. – Vol. 19(3). – P. 665–672.
301. Van Dam J. E. G. Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk / J. E. G. Van Dam, M. J. A. Van Den Oever, E. R. P. Keijsers // *Industrial Crops and Products*. – 2004. – V. 20. – No. 1. – P. 97–101.
302. Ververis C. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and the suitability for paper production / C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, R. Santas // *Industrial Crops and Products*, – 2004. No.19. – P. 245–254.
303. Wang H.H. An improved fibril angle measurement method for wood fibre / H.H. Wang, J.G. Drummond, S.M. Reath, K. Hunt, P.A. Watson // *Wood Science and Technology*. – 2001. Vol. 34(6). – P. 493–503.
304. Wang Y. Fiber and textile waste utilization / Y. Wang // *Waste Biomass Valoriz.* – 2010. – Vol. 1. P. 135–143.
305. Wang B. Pre-treatment of flax fibers for use in rotationally molded biocomposites / B. Wang, S. Panigrahi, L. Tabil, W. Crerar // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2007. – Vol. 26. – No. 5. – P. 447–463.
306. Wiener O. Die theorie des mischkörpers für die flüssigkeitsströmung / O. Wiener // *Abhandlungen der mathematischen-physischen klasse der Königlichen Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*. – 1912. – Vol. 32. – P. 509–604.
307. Xiao-Ping Hu. Hsieh effects of dehydration on the crystalline structure and strength of developing cotton fibers / Xiao-Ping Hu, You-Lo // *Textile Research Journal*. – 2001. – No. 71(3). – P. 231–239.
308. Yamtraipat N. Assessment of Thailand indoor set-point impact on energy consumption and environment / Yamtraipat N., et al. // *Energy Policy*. – 2006. – Vol. 34. – P. 765–770.

309. Yearbook of Forest products. FAOU N: Rome, 2012. – 250 p.
310. Yengkhom D.S. Conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol: an overview with a focus on pretreatment / D.S. Yengkhom, B.S. Kunja // International Journal of Engineering and Technologies Submitted. – 2018. – Vol. 15. – P. 17–43.
311. Yogesh N.D. Review on the innovative uses of steel slag for waste minimization / N.D. Yogesh // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2018. – Vol. 20 (3). – P. 1373–1382.
312. Yucel K. T. Thermal insulation properties of expanded polystyrene as construction and insulating materials / K. T. Yucel, C. Basyigit, C. Ozel // Journal of Building Physics. – 2008. – Vol. 32. – Pp. 9–31.
313. Zach J. Research and development of thermal-insulating materials based on natural fibres / J. Zach, J. Brožovský, J. Hroudová // Modern building materials, structures and techniques. – 2010. – P. 330–334.
314. Zbyšek P. Application of effective media theory in the determination of thermal conductivity of wet lime-pozzolana renders / P. Zbyšek // Thermophysics. – 2008. – P. 131–139.
315. Zhang X. Investigation of biodegradable nonwoven composites based on cotton, bagasse and other annual plants. 2004. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-07072004-124535/unrestricted/Zhang\\_thesis.pdf](http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-07072004-124535/unrestricted/Zhang_thesis.pdf).
316. Zhou X. Y. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers / X. Y. Zhou, et al. // Energy Build. – 2010. – Vol. 42. – P. 1070–1074.
317. Zuda L. Properties of alkali activated aluminosilicate material after thermal load / L. Zuda, Z. Pavlík, P. Rovnaníková, P. Bayer, R. Černý // International Journal of Thermophysics. – 2006. – Vol. 27. – P. 1250–1263.



ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Заявка на разработку способа утилизации отходов хлопка

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Ректор ФГБОУ ВПО Костромской  
 государственной технологической  
 университет  
 проф.  А. А. Титунин  
 «24» ноября 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Генеральный Директор  
 ООО СП «Кохлома» А. В. Иванов  
 «24» ноября 2015 г.


## ЗАЯВКА

Предприятие ООО СП «Кохлома» просит исследовательскую группу Костромского государственного технологического университета разработать способ утилизации пылевидных отходов переработки хлопка. Состав исследовательской группы: к.т.н., доцент И. В. Сусоева, к.т.н., доцент Т. Н. Вахнина.

Основные технико-экономические результаты оформить в виде отчета.

От ООО СП «Кохлома»

Главный механик

 Д. Г. Верховский

Старший инженер по автоматизации  
 и механизации производственных  
 процессов

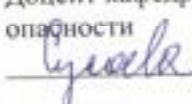
 Д. В. Белов

От Костромского государственного  
 технологического университета

Доцент кафедры Лесозаготовительных  
 и деревоперерабатывающих про-  
 изводств

 Т. Н. Вахнина

Доцент кафедры Техносферной без-  
 опасности

 И. В. Сусоева

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Результаты статистической обработки значений прочности при статическом изгибе тепло-  
изоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и  
хлопкового волокна и мягких отходов древесины**

В таблицах П 2.1 – П 2.8 используются обозначения:

$\bar{\sigma}_u$  – среднее значение прочности при статическом изгибе, МПа;

$S^2$  – дисперсия, МПа<sup>2</sup>.

Таблица П 2.1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,42	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>	0,49	3·10 <sup>-3</sup>	0,53	2·10 <sup>-3</sup>	0,56	2·10 <sup>-3</sup>	0,61	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,35	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,40	3·10 <sup>-3</sup>	0,43	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>	0,50	3·10 <sup>-3</sup>	0,53	3·10 <sup>-3</sup>	0,58	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,30	2·10 <sup>-3</sup>	0,33	2·10 <sup>-3</sup>	0,35	2·10 <sup>-3</sup>	0,38	2·10 <sup>-3</sup>	0,41	2·10 <sup>-3</sup>	0,44	2·10 <sup>-3</sup>	0,47	1·10 <sup>-3</sup>	0,50	1·10 <sup>-3</sup>	0,55	2·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,33	2·10 <sup>-3</sup>	0,35	2·10 <sup>-3</sup>	0,37	2·10 <sup>-3</sup>	0,40	2·10 <sup>-3</sup>	0,43	2·10 <sup>-3</sup>	0,46	2·10 <sup>-3</sup>	0,49	2·10 <sup>-3</sup>	0,54	2·10 <sup>-3</sup>

Окончание таблицы П 2.1

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,29	2·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,36	1·10 <sup>-3</sup>	0,38	1·10 <sup>-3</sup>	0,41	1·10 <sup>-3</sup>	0,44	2·10 <sup>-3</sup>	0,47	2·10 <sup>-3</sup>	0,52	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,35	3·10 <sup>-3</sup>	0,38	3·10 <sup>-3</sup>	0,41	3·10 <sup>-3</sup>	0,44	3·10 <sup>-3</sup>	0,50	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,34	1·10 <sup>-3</sup>	0,36	1·10 <sup>-3</sup>	0,39	1·10 <sup>-3</sup>	0,42	1·10 <sup>-3</sup>	0,45	1·10 <sup>-3</sup>	0,47	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,36	3·10 <sup>-3</sup>	0,38	3·10 <sup>-3</sup>	0,40	3·10 <sup>-3</sup>	0,43	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>	0,49	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,26	1·10 <sup>-3</sup>	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,34	1·10 <sup>-3</sup>	0,36	2·10 <sup>-3</sup>	0,40	2·10 <sup>-3</sup>	0,43	2·10 <sup>-3</sup>	0,45	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица П 2.2 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	0,36	$2 \cdot 10^{-3}$	0,37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,40	$1 \cdot 10^{-3}$	0,42	$2 \cdot 10^{-3}$	0,48	$3 \cdot 10^{-3}$	0,51	$3 \cdot 10^{-3}$	0,55	$3 \cdot 10^{-3}$	0,60	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,32	$3 \cdot 10^{-3}$	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$3 \cdot 10^{-3}$	0,38	$3 \cdot 10^{-3}$	0,39	$3 \cdot 10^{-3}$	0,45	$3 \cdot 10^{-3}$	0,48	$3 \cdot 10^{-3}$	0,52	$3 \cdot 10^{-3}$	0,55	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,30	$2 \cdot 10^{-3}$	0,32	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,36	$1 \cdot 10^{-3}$	0,37	$1 \cdot 10^{-3}$	0,43	$2 \cdot 10^{-3}$	0,45	$2 \cdot 10^{-3}$	0,49	$2 \cdot 10^{-3}$	0,52	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,31	$3 \cdot 10^{-3}$	0,32	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,36	$2 \cdot 10^{-3}$	0,42	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$	0,48	$2 \cdot 10^{-3}$	0,51	$2 \cdot 10^{-3}$

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,29	2·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,34	1·10 <sup>-3</sup>	0,34	1·10 <sup>-3</sup>	0,40	1·10 <sup>-3</sup>	0,42	2·10 <sup>-3</sup>	0,46	2·10 <sup>-3</sup>	0,49	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,27	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,38	3·10 <sup>-3</sup>	0,43	3·10 <sup>-3</sup>	0,47	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,29	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,38	1·10 <sup>-3</sup>	0,39	1·10 <sup>-3</sup>	0,44	1·10 <sup>-3</sup>	0,44	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,35	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,40	3·10 <sup>-3</sup>	0,45	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,26	1·10 <sup>-3</sup>	0,27	1·10 <sup>-3</sup>	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	2·10 <sup>-3</sup>	0,37	2·10 <sup>-3</sup>	0,42	2·10 <sup>-3</sup>	0,42	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица П 2.3 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	0,37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,39	$2 \cdot 10^{-3}$	0,43	$2 \cdot 10^{-3}$	0,47	$1 \cdot 10^{-3}$	0,50	$3 \cdot 10^{-3}$	0,53	$3 \cdot 10^{-3}$	0,57	$2 \cdot 10^{-3}$	0,62	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,32	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$3 \cdot 10^{-3}$	0,37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,41	$3 \cdot 10^{-3}$	0,44	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$3 \cdot 10^{-3}$	0,50	$3 \cdot 10^{-3}$	0,54	$3 \cdot 10^{-3}$	0,60	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,30	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,39	$1 \cdot 10^{-3}$	0,42	$1 \cdot 10^{-3}$	0,45	$2 \cdot 10^{-3}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$	0,51	$2 \cdot 10^{-3}$	0,57	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,31	$3 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$	0,46	$2 \cdot 10^{-3}$	0,50	$2 \cdot 10^{-3}$	0,56	$2 \cdot 10^{-3}$



Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,29	2·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	2·10 <sup>-3</sup>	0,39	1·10 <sup>-3</sup>	0,42	2·10 <sup>-3</sup>	0,44	1·10 <sup>-3</sup>	0,48	3·10 <sup>-3</sup>	0,54	2·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,33	3·10 <sup>-3</sup>	0,36	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,41	3·10 <sup>-3</sup>	0,45	3·10 <sup>-3</sup>	0,52	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	1·10 <sup>-3</sup>	0,40	1·10 <sup>-3</sup>	0,42	1·10 <sup>-3</sup>	0,46	1·10 <sup>-3</sup>	0,49	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,41	3·10 <sup>-3</sup>	0,43	3·10 <sup>-3</sup>	0,47	3·10 <sup>-3</sup>	0,51	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,26	1·10 <sup>-3</sup>	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	2·10 <sup>-3</sup>	0,40	2·10 <sup>-3</sup>	0,44	2·10 <sup>-3</sup>	0,47	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица П 2.4 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	0,37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,39	$3 \cdot 10^{-3}$	0,43	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$1 \cdot 10^{-3}$	0,50	$3 \cdot 10^{-3}$	0,54	$3 \cdot 10^{-3}$	0,58	$2 \cdot 10^{-3}$	0,63	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,32	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$4 \cdot 10^{-3}$	0,37	$1 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$3 \cdot 10^{-3}$	0,51	$3 \cdot 10^{-3}$	0,55	$3 \cdot 10^{-3}$	0,61	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,30	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,39	$1 \cdot 10^{-3}$	0,42	$1 \cdot 10^{-3}$	0,45	$2 \cdot 10^{-3}$	0,48	$2 \cdot 10^{-3}$	0,52	$2 \cdot 10^{-3}$	0,58	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,31	$3 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$	0,51	$2 \cdot 10^{-3}$	0,57	$2 \cdot 10^{-3}$

Окончание таблицы П 2.4

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,29	2·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	1·10 <sup>-3</sup>	0,39	2·10 <sup>-3</sup>	0,42	2·10 <sup>-3</sup>	0,45	1·10 <sup>-3</sup>	0,49	3·10 <sup>-3</sup>	0,55	2·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,33	3·10 <sup>-3</sup>	0,36	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,42	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>	0,53	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	1·10 <sup>-3</sup>	0,40	1·10 <sup>-3</sup>	0,43	1·10 <sup>-3</sup>	0,47	1·10 <sup>-3</sup>	0,50	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,41	3·10 <sup>-3</sup>	0,44	3·10 <sup>-3</sup>	0,48	3·10 <sup>-3</sup>	0,52	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,26	1·10 <sup>-3</sup>	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	2·10 <sup>-3</sup>	0,41	2·10 <sup>-3</sup>	0,45	2·10 <sup>-3</sup>	0,48	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица П 2.5 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,16	$3 \cdot 10^{-3}$	0,21	$3 \cdot 10^{-3}$	0,26	$3 \cdot 10^{-3}$	0,31	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$3 \cdot 10^{-3}$	0,40	$3 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$	0,46	$2 \cdot 10^{-3}$	0,49	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,14	$3 \cdot 10^{-3}$	0,19	$3 \cdot 10^{-3}$	0,24	$3 \cdot 10^{-3}$	0,29	$3 \cdot 10^{-3}$	0,33	$3 \cdot 10^{-3}$	0,38	$3 \cdot 10^{-3}$	0,42	$3 \cdot 10^{-3}$	0,44	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,12	$2 \cdot 10^{-3}$	0,17	$2 \cdot 10^{-3}$	0,22	$2 \cdot 10^{-3}$	0,27	$2 \cdot 10^{-3}$	0,31	$2 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,39	$1 \cdot 10^{-3}$	0,41	$1 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,13	$3 \cdot 10^{-3}$	0,16	$2 \cdot 10^{-3}$	0,21	$2 \cdot 10^{-3}$	0,26	$2 \cdot 10^{-3}$	0,30	$2 \cdot 10^{-3}$	0,34	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,40	$2 \cdot 10^{-3}$	0,43	$2 \cdot 10^{-3}$

Окончание таблицы П 2.5

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,11	$2 \cdot 10^{-3}$	0,14	$1 \cdot 10^{-3}$	0,19	$1 \cdot 10^{-3}$	0,24	$1 \cdot 10^{-3}$	0,28	$1 \cdot 10^{-3}$	0,32	$1 \cdot 10^{-3}$	0,36	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,13	$3 \cdot 10^{-3}$	0,16	$3 \cdot 10^{-3}$	0,21	$3 \cdot 10^{-3}$	0,26	$3 \cdot 10^{-3}$	0,31	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$3 \cdot 10^{-3}$	0,39	$3 \cdot 10^{-3}$	0,41	$3 \cdot 10^{-3}$	0,44	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,10	$1 \cdot 10^{-3}$	0,13	$1 \cdot 10^{-3}$	0,18	$1 \cdot 10^{-3}$	0,23	$1 \cdot 10^{-3}$	0,28	$1 \cdot 10^{-3}$	0,32	$1 \cdot 10^{-3}$	0,36	$1 \cdot 10^{-3}$	0,38	$1 \cdot 10^{-3}$	0,41	$1 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,12	$3 \cdot 10^{-3}$	0,15	$3 \cdot 10^{-3}$	0,20	$3 \cdot 10^{-3}$	0,25	$3 \cdot 10^{-3}$	0,30	$3 \cdot 10^{-3}$	0,34	$3 \cdot 10^{-3}$	0,38	$3 \cdot 10^{-3}$	0,40	$3 \cdot 10^{-3}$	0,43	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,10	$1 \cdot 10^{-3}$	0,13	$1 \cdot 10^{-3}$	0,18	$1 \cdot 10^{-3}$	0,23	$1 \cdot 10^{-3}$	0,28	$1 \cdot 10^{-3}$	0,32	$2 \cdot 10^{-3}$	0,36	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$

Таблица П 2.6 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,16	$3 \cdot 10^{-3}$	0,20	$2 \cdot 10^{-3}$	0,24	$3 \cdot 10^{-3}$	0,28	$1 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,42	$3 \cdot 10^{-3}$	0,45	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,14	$3 \cdot 10^{-3}$	0,18	$3 \cdot 10^{-3}$	0,22	$3 \cdot 10^{-3}$	0,26	$3 \cdot 10^{-3}$	0,31	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$3 \cdot 10^{-3}$	0,40	$3 \cdot 10^{-3}$	0,43	$3 \cdot 10^{-3}$	0,45	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,12	$2 \cdot 10^{-3}$	0,16	$2 \cdot 10^{-3}$	0,20	$2 \cdot 10^{-3}$	0,24	$1 \cdot 10^{-3}$	0,29	$1 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,43	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,13	$3 \cdot 10^{-3}$	0,15	$2 \cdot 10^{-3}$	0,19	$2 \cdot 10^{-3}$	0,23	$2 \cdot 10^{-3}$	0,28	$2 \cdot 10^{-3}$	0,32	$2 \cdot 10^{-3}$	0,37	$2 \cdot 10^{-3}$	0,40	$2 \cdot 10^{-3}$	0,42	$2 \cdot 10^{-3}$

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,11	2·10 <sup>-3</sup>	0,13	1·10 <sup>-3</sup>	0,17	1·10 <sup>-3</sup>	0,21	1·10 <sup>-3</sup>	0,26	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	2·10 <sup>-3</sup>	0,38	2·10 <sup>-3</sup>	0,40	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,13	3·10 <sup>-3</sup>	0,15	3·10 <sup>-3</sup>	0,19	3·10 <sup>-3</sup>	0,23	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,40	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,10	1·10 <sup>-3</sup>	0,12	1·10 <sup>-3</sup>	0,16	1·10 <sup>-3</sup>	0,20	1·10 <sup>-3</sup>	0,25	1·10 <sup>-3</sup>	0,29	1·10 <sup>-3</sup>	0,34	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,12	3·10 <sup>-3</sup>	0,14	3·10 <sup>-3</sup>	0,18	3·10 <sup>-3</sup>	0,22	3·10 <sup>-3</sup>	0,27	3·10 <sup>-3</sup>	0,31	3·10 <sup>-3</sup>	0,36	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,10	1·10 <sup>-3</sup>	0,12	1·10 <sup>-3</sup>	0,16	1·10 <sup>-3</sup>	0,20	1·10 <sup>-3</sup>	0,25	1·10 <sup>-3</sup>	0,29	2·10 <sup>-3</sup>	0,33	2·10 <sup>-3</sup>	0,36	2·10 <sup>-3</sup>	0,34	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица П 2.7 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,16	$3 \cdot 10^{-3}$	0,21	$3 \cdot 10^{-3}$	0,26	$2 \cdot 10^{-3}$	0,31	$2 \cdot 10^{-3}$	0,37	$1 \cdot 10^{-3}$	0,41	$3 \cdot 10^{-3}$	0,45	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$	0,50	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,14	$3 \cdot 10^{-3}$	0,19	$3 \cdot 10^{-3}$	0,24	$3 \cdot 10^{-3}$	0,29	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$3 \cdot 10^{-3}$	0,39	$3 \cdot 10^{-3}$	0,43	$3 \cdot 10^{-3}$	0,45	$3 \cdot 10^{-3}$	0,48	$3 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,12	$2 \cdot 10^{-3}$	0,17	$2 \cdot 10^{-3}$	0,22	$2 \cdot 10^{-3}$	0,27	$1 \cdot 10^{-3}$	0,33	$1 \cdot 10^{-3}$	0,37	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,43	$2 \cdot 10^{-3}$	0,46	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,13	$3 \cdot 10^{-3}$	0,18	$2 \cdot 10^{-3}$	0,21	$2 \cdot 10^{-3}$	0,28	$2 \cdot 10^{-3}$	0,34	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,42	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$



Окончание таблицы П 2.7

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,11	2·10 <sup>-3</sup>	0,16	1·10 <sup>-3</sup>	0,19	1·10 <sup>-3</sup>	0,26	2·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,36	2·10 <sup>-3</sup>	0,40	1·10 <sup>-3</sup>	0,42	3·10 <sup>-3</sup>	0,45	2·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,13	3·10 <sup>-3</sup>	0,14	3·10 <sup>-3</sup>	0,21	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,38	3·10 <sup>-3</sup>	0,42	3·10 <sup>-3</sup>	0,44	3·10 <sup>-3</sup>	0,47	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,10	1·10 <sup>-3</sup>	0,12	1·10 <sup>-3</sup>	0,18	1·10 <sup>-3</sup>	0,25	1·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,39	1·10 <sup>-3</sup>	0,41	1·10 <sup>-3</sup>	0,44	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,12	3·10 <sup>-3</sup>	0,14	3·10 <sup>-3</sup>	0,20	3·10 <sup>-3</sup>	0,27	3·10 <sup>-3</sup>	0,33	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,41	3·10 <sup>-3</sup>	0,43	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,10	1·10 <sup>-3</sup>	0,12	1·10 <sup>-3</sup>	0,18	1·10 <sup>-3</sup>	0,23	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	2·10 <sup>-3</sup>	0,39	2·10 <sup>-3</sup>	0,41	2·10 <sup>-3</sup>	0,44	2·10 <sup>-3</sup>

Таблица П 2.8 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (прочность при статическом изгибе, МПа)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,16	$3 \cdot 10^{-3}$	0,37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,39	$3 \cdot 10^{-3}$	0,43	$3 \cdot 10^{-3}$	0,38	$1 \cdot 10^{-3}$	0,50	$3 \cdot 10^{-3}$	0,45	$3 \cdot 10^{-3}$	0,58	$2 \cdot 10^{-3}$	0,51	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,14	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$4 \cdot 10^{-3}$	0,37	$1 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$3 \cdot 10^{-3}$	0,47	$3 \cdot 10^{-3}$	0,51	$3 \cdot 10^{-3}$	0,55	$3 \cdot 10^{-3}$	0,61	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,12	$2 \cdot 10^{-3}$	0,33	$3 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,39	$1 \cdot 10^{-3}$	0,42	$1 \cdot 10^{-3}$	0,45	$2 \cdot 10^{-3}$	0,48	$2 \cdot 10^{-3}$	0,52	$2 \cdot 10^{-3}$	0,58	$2 \cdot 10^{-3}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,13	$3 \cdot 10^{-3}$	0,33	$2 \cdot 10^{-3}$	0,35	$2 \cdot 10^{-3}$	0,38	$2 \cdot 10^{-3}$	0,41	$2 \cdot 10^{-3}$	0,44	$2 \cdot 10^{-3}$	0,47	$2 \cdot 10^{-3}$	0,51	$2 \cdot 10^{-3}$	0,57	$2 \cdot 10^{-3}$

Окончание таблицы П 2.8

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_u$ , МПа	$S^2$ , МПа <sup>2</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,11	2·10 <sup>-3</sup>	0,31	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	1·10 <sup>-3</sup>	0,39	2·10 <sup>-3</sup>	0,42	2·10 <sup>-3</sup>	0,45	1·10 <sup>-3</sup>	0,49	3·10 <sup>-3</sup>	0,55	2·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,13	3·10 <sup>-3</sup>	0,28	3·10 <sup>-3</sup>	0,30	3·10 <sup>-3</sup>	0,33	3·10 <sup>-3</sup>	0,36	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,42	3·10 <sup>-3</sup>	0,46	3·10 <sup>-3</sup>	0,53	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,10	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,32	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	1·10 <sup>-3</sup>	0,40	1·10 <sup>-3</sup>	0,43	1·10 <sup>-3</sup>	0,47	1·10 <sup>-3</sup>	0,50	1·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,12	3·10 <sup>-3</sup>	0,32	3·10 <sup>-3</sup>	0,34	3·10 <sup>-3</sup>	0,37	3·10 <sup>-3</sup>	0,39	3·10 <sup>-3</sup>	0,41	3·10 <sup>-3</sup>	0,44	3·10 <sup>-3</sup>	0,48	3·10 <sup>-3</sup>	0,52	3·10 <sup>-3</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,10	1·10 <sup>-3</sup>	0,28	1·10 <sup>-3</sup>	0,30	1·10 <sup>-3</sup>	0,33	1·10 <sup>-3</sup>	0,35	1·10 <sup>-3</sup>	0,37	2·10 <sup>-3</sup>	0,41	2·10 <sup>-3</sup>	0,45	2·10 <sup>-3</sup>	0,48	2·10 <sup>-3</sup>

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**Результаты статистической обработки значений разбухания по толщине теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и хлопкового волокна и мягких отходов древесины**

В таблицах П 3.1 – П 3.8 используются обозначения:

$S^2$  – дисперсия, %<sup>2</sup>;

$\bar{h}$ , – среднее значение разбухания по толщине, %.

Таблица П 3.1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{h}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	20,9	1,42	19,4	1,45	17,8	1,56	16,3	1,40	13,1	1,68	12,2	1,72	10,0	1,64	9,2	1,78	8,3	1,83
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	22,2	1,54	20,3	1,76	19,2	1,72	18,0	1,48	16,2	1,40	15,0	1,73	13,2	1,42	11,4	1,78	10,3	1,40
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	23,9	1,73	22,0	1,82	20,9	1,60	19,7	1,45	17,9	1,42	16,7	1,81	14,9	1,53	13,1	1,86	12,0	1,54
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	23,0	1,85	21,2	1,85	20,1	1,43	18,8	1,57	17,0	1,76	15,7	1,40	14,1	1,65	12,2	1,42	11,1	1,65
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	24,3	1,76	22,6	1,79	21,4	1,46	20,1	1,63	18,3	1,68	17,0	1,44	15,4	1,71	13,5	1,54	12,4	1,54

Окончание таблицы П 3.1

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	21,8	1,65	20,6	1,54	19,0	1,58	17,5	1,42	15,8	1,86	14,1	1,63	12,6	1,52	11,1	1,41	9,6	1,84
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	23,1	1,48	21,9	1,72	20,3	1,65	18,8	1,56	17,2	1,45	15,8	1,42	13,9	1,64	12,4	1,53	11,3	1,76
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	22,1	1,64	20,0	1,60	18,7	1,63	17,9	1,84	16,1	1,52	14,9	1,58	13,0	1,76	11,3	1,64	10,2	1,65
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	23,5	1,56	21,6	1,63	20,4	1,57	19,3	1,73	17,5	1,60	16,3	1,66	14,5	1,87	12,7	1,75	11,6	1,43

Таблица П 3.2 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
без добавки мягких отходов древесины	20,9	1,42	19,9	1,83	18,6	1,78	17,5	1,64	14,9	1,68	13,6	1,72	11,3	1,40	9,6	1,56	9,3	1,45
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	22,2	1,54	20,8	1,40	20,0	1,78	19,2	1,42	17,7	1,40	16,4	1,73	13,8	1,48	11,8	1,72	10,9	1,76
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	23,9	1,73	22,5	1,54	21,7	1,86	20,9	1,53	19,4	1,42	18,1	1,81	15,5	1,45	13,5	1,60	12,6	1,82
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	23,0	1,85	21,7	1,65	20,9	1,42	20,0	1,65	18,5	1,76	17,2	1,40	14,7	1,57	12,6	1,43	11,7	1,85
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	24,3	1,76	23,1	1,54	22,2	1,54	21,3	1,71	19,8	1,68	18,5	1,44	16,0	1,63	13,9	1,46	13,0	1,79

Окончание таблицы П 3.2

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	21,8	1,65	21,0	1,41	19,8	1,84	18,9	1,63	17,1	1,86	15,6	1,42	13,2	1,52	11,5	1,54	10,2	1,58
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	23,1	1,48	22,3	1,53	21,1	1,76	20,2	1,42	18,5	1,45	17,3	1,56	14,5	1,64	12,8	1,72	11,9	1,65
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	22,1	1,64	20,4	1,64	19,5	1,65	19,3	1,58	17,4	1,52	16,4	1,84	13,6	1,76	11,7	1,60	10,8	1,63
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	23,5	1,56	22,0	1,75	21,2	1,43	20,7	1,66	18,8	1,60	17,8	1,73	15,1	1,87	13,1	1,63	12,2	1,57



Таблица П 3.3 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	20,9	1,42	19,1	1,79	17,5	1,86	15,6	1,43	12,9	1,57	12,0	1,85	9,8	1,58	9,0	1,62	8,0	1,37
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	22,2	1,54	20,1	1,89	18,9	1,64	17,3	1,89	15,8	1,62	14,7	1,42	12,3	1,66	11,2	1,93	9,7	1,18
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	23,9	1,73	21,8	1,63	20,6	1,58	19,1	1,70	17,6	1,39	16,4	1,39	14,1	1,73	13,0	1,84	11,4	1,26
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	23,0	1,85	21,0	1,38	19,9	1,37	18,4	1,31	16,7	1,40	15,5	1,54	13,3	1,80	12,1	1,70	10,6	1,67
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	24,3	1,76	22,4	1,23	21,2	1,74	19,8	1,56	18,1	1,55	16,9	1,63	14,6	1,91	13,4	1,69	11,9	1,81

Окончание таблицы П 3.3

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	21,8	1,65	21,0	1,41	19,8	1,84	18,9	1,63	17,1	1,86	15,6	1,42	13,2	1,52	11,5	1,54	10,2	1,58
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	23,1	1,48	22,3	1,53	21,1	1,76	20,2	1,42	18,5	1,45	17,3	1,56	14,5	1,64	12,8	1,72	11,9	1,65
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	22,1	1,64	20,4	1,64	19,5	1,65	19,3	1,58	17,4	1,52	16,4	1,84	13,6	1,76	11,7	1,60	10,8	1,63
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	23,5	1,56	22,0	1,75	21,2	1,43	20,7	1,66	18,8	1,60	17,8	1,73	15,1	1,87	13,1	1,63	12,2	1,57

Таблица П 3.4 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
без добавки мягких отходов древесины	20,9	1,42	19,1	2,03	17,5	1,53	15,6	1,59	12,9	1,92	12,0	1,68	9,6	1,84	9,0	1,46	8,0	1,45
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	22,2	1,54	20,1	1,67	18,9	1,72	17,3	1,62	15,8	1,86	14,7	1,73	12,3	2,03	11,2	1,31	9,7	1,36
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	23,9	1,73	21,8	1,45	20,6	1,65	19,1	2,01	17,6	1,74	16,4	1,42	14,1	1,97	13,0	1,57	11,4	1,28
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	23,0	1,85	21,0	2,05	19,9	1,34	18,4	1,94	16,7	1,38	15,5	1,58	13,3	1,99	12,1	1,68	10,6	1,53
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	24,3	1,76	22,4	1,34	21,2	2,07	19,8	1,84	18,1	1,44	16,9	1,69	14,6	1,73	13,4	1,73	11,9	1,76

Окончание таблицы П 3.4

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	21,8	1,65	21,0	1,37	19,8	1,93	18,9	1,36	17,1	1,80	15,6	1,46	13,2	1,65	11,5	1,54	10,2	1,64
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	23,1	1,48	22,3	1,54	21,1	1,86	20,2	1,54	18,5	1,59	17,3	1,63	14,5	1,78	12,8	1,72	11,9	1,75
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	22,1	1,64	20,4	1,68	19,5	1,74	19,3	1,65	17,4	1,63	16,4	1,75	13,6	1,82	11,7	1,60	10,8	1,87
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	23,5	1,56	22,0	1,71	21,2	2,01	20,7	1,70	18,8	1,74	17,8	1,88	15,1	1,91	13,1	1,63	12,2	2,01

Таблица П 3.5 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
без добавки мягких отходов древесины	24,8	1,42	22,4	1,45	20,8	1,56	19,3	1,40	18,5	1,68	16,9	1,72	16,1	1,64	15,2	1,78	13,9	1,83
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	27,2	1,54	24,7	1,76	23,1	1,72	21,6	1,48	21,0	1,40	19,4	1,73	18,6	1,42	17,5	1,78	16,3	1,40
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	28,9	1,73	26,4	1,82	24,9	1,60	23,4	1,45	22,7	1,42	21,1	1,81	20,3	1,53	19,2	1,86	18,0	1,54
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	28,0	1,85	25,4	1,85	24,1	1,43	22,5	1,57	21,8	1,76	20,2	1,40	19,4	1,65	18,3	1,42	17,1	1,65
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	29,3	1,76	26,7	1,79	25,4	1,46	23,8	1,63	23,1	1,68	21,5	1,44	20,7	1,71	19,6	1,54	18,4	1,54

Окончание таблицы П 3.5

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	26,8	1,65	24,2	1,54	23,0	1,58	21,3	1,42	20,6	1,86	19,0	1,63	18,2	1,52	17,1	1,41	15,9	1,84
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	28,1	1,48	25,5	1,72	24,3	1,65	22,6	1,56	21,9	1,45	20,3	1,42	19,5	1,64	18,4	1,53	17,3	1,76
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	27,1	1,64	24,4	1,60	23,2	1,63	21,5	1,84	20,9	1,52	19,2	1,58	18,6	1,76	17,3	1,64	16,2	1,65
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	28,5	1,56	25,8	1,63	24,6	1,57	22,9	1,73	22,1	1,60	20,6	1,66	19,9	1,87	18,7	1,75	17,6	1,43

Таблица П 3.6 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
без добавки мягких отходов древесины	24,8	1,42	23,6	1,83	22,5	1,78	21,2	1,64	19,8	1,68	17,6	1,72	15,9	1,40	15,0	1,56	14,3	1,45
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	27,2	1,54	26,0	1,40	24,9	1,78	23,7	1,42	22,3	1,40	20,1	1,73	18,4	1,48	17,5	1,72	16,9	1,76
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	28,9	1,73	27,7	1,54	26,6	1,86	25,4	1,53	24,0	1,42	21,8	1,81	20,1	1,45	19,2	1,60	18,6	1,82
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	28,0	1,85	26,8	1,65	25,7	1,42	24,5	1,65	23,1	1,76	20,9	1,40	19,2	1,57	18,3	1,43	17,7	1,85
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	29,3	1,76	28,1	1,54	27,0	1,54	25,8	1,71	24,4	1,68	22,2	1,44	20,5	1,63	19,6	1,46	19,0	1,79

Окончание таблицы П 3.6

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	26,8	1,65	25,6	1,41	24,8	1,84	23,5	1,63	21,9	1,86	19,8	1,42	18,0	1,52	17,1	1,54	16,5	1,58
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	28,1	1,48	26,9	1,53	26,1	1,76	24,8	1,42	23,2	1,45	21,1	1,56	19,3	1,64	18,4	1,72	17,9	1,65
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	27,1	1,64	25,9	1,64	25,2	1,65	23,9	1,58	22,3	1,52	20,2	1,84	18,2	1,76	17,4	1,60	16,8	1,63
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	28,5	1,56	27,3	1,75	26,6	1,43	25,3	1,66	23,7	1,60	21,6	1,73	19,6	1,87	18,8	1,63	18,2	1,57



Таблица П 3.7 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	24,8	1,42	22,6	1,79	20,5	1,86	18,7	1,43	16,9	1,57	16,4	1,85	15,8	1,58	14,7	1,62	13,7	1,37
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	27,2	1,54	25,0	1,89	22,9	1,64	21,1	1,89	19,3	1,62	18,7	1,42	18,3	1,66	17,2	1,93	16,1	1,18
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	28,9	1,73	26,7	1,63	24,6	1,58	22,8	1,70	21,0	1,39	20,4	1,39	20,1	1,73	19,0	1,84	17,8	1,26
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	28,0	1,85	25,8	1,38	23,9	1,37	21,9	1,31	20,1	1,40	19,5	1,54	19,3	1,80	18,1	1,70	16,9	1,67
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	29,3	1,76	27,1	1,23	25,2	1,74	23,2	1,56	21,4	1,55	20,9	1,63	20,6	1,91	19,4	1,69	18,2	1,81

Окончание таблицы П 3.7

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$ <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	26,8	1,65	24,6	1,41	23,8	1,84	21,4	1,63	18,9	1,86	19,6	1,42	19,2	1,52	17,5	1,54	15,7	1,58
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	28,1	1,48	25,9	1,53	25,1	1,76	22,8	1,42	20,2	1,45	21,3	1,56	20,5	1,64	18,8	1,72	17,0	1,65
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	27,1	1,64	24,9	1,64	23,5	1,65	21,8	1,58	19,2	1,52	20,4	1,84	19,6	1,76	17,7	1,60	16,1	1,63
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	28,5	1,56	26,3	1,75	25,2	1,43	23,2	1,66	20,6	1,60	21,8	1,73	21,1	1,87	19,1	1,63	17,5	1,57

Таблица П 3.8 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (разбухание по толщине за 24 часа, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
без добавки мягких отходов древесины	24,8	1,42	22,6	1,79	20,5	1,86	18,7	1,43	16,9	1,57	16,4	1,85	15,6	1,58	14,4	1,62	13,3	1,37
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	27,2	1,54	25,0	1,89	22,9	1,64	21,1	1,89	19,3	1,62	18,7	1,42	18,1	1,66	16,9	1,93	15,7	1,18
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	28,9	1,73	26,7	1,63	24,6	1,58	22,8	1,70	21,0	1,39	20,4	1,39	19,9	1,73	18,7	1,84	17,4	1,26
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	28,0	1,85	25,8	1,38	23,9	1,37	21,9	1,31	20,1	1,40	19,5	1,54	19,1	1,80	17,8	1,70	16,5	1,67
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	29,3	1,76	27,1	1,23	25,2	1,74	23,2	1,56	21,4	1,55	20,9	1,63	20,4	1,91	19,1	1,69	17,8	1,81

Окончание таблицы П 3.8

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$	$\bar{h}, \%$	$S^2, \%$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	26,8	1,65	24,6	1,41	23,8	1,84	21,4	1,63	18,9	1,86	19,6	1,42	19,0	1,52	17,2	1,54	15,3	1,58
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	28,1	1,48	25,9	1,53	25,1	1,76	22,8	1,42	20,2	1,45	21,3	1,56	20,3	1,64	18,5	1,72	16,6	1,65
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	27,1	1,64	24,9	1,64	23,5	1,65	21,8	1,58	19,2	1,52	20,4	1,84	19,4	1,76	17,4	1,60	15,7	1,63
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	28,5	1,56	26,3	1,75	25,2	1,43	23,2	1,66	20,6	1,60	21,8	1,73	20,9	1,87	18,8	1,63	17,1	1,57

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

Результаты статистической обработки значений водопоглощения теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и хлопкового волокна и мягких отходов древесины

В таблицах П 4.1 – П 4.8 используются обозначения:

$S^2$  – дисперсия, %<sup>2</sup>;

$\bar{w}$  – среднее значение водопоглощения, %.

Таблица П 4.1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{w}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	216	4,67	209	3,65	201	2,86	192	3,75	178	2,64	172	3,46	152	2,34	143	2,63	130	3,78
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	224	4,15	217	3,26	209	2,96	200	3,36	191	2,89	178	3,95	171	2,85	160	3,16	144	4,13
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	228	3,25	222	4,12	214	3,47	204	3,68	195	3,14	182	4,87	175	3,18	163	3,35	148	2,78
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	221	3,72	216	3,84	207	4,26	197	3,56	189	3,48	175	3,86	168	3,26	156	4,42	142	2,81
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	225	4,36	221	4,15	211	2,95	202	4,12	194	4,23	179	3,58	172	3,49	160	4,56	146	3,26

Окончание таблицы П 4.1

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	220	3,16	217	3,76	207	3,48	197	4,45	189	4,38	174	2,89	167	4,15	155	4,15	141	4,12
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	226	3,35	223	4,13	214	4,69	203	2,87	195	4,59	180	3,16	173	4,38	161	3,25	147	3,84
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	217	4,42	215	2,78	206	3,71	195	3,51	187	4,61	174	3,26	165	4,26	154	3,72	140	4,15
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	223	4,56	221	2,81	214	4,00	201	4,37	193	4,31	180	3,47	171	4,52	160	4,36	146	3,76

Таблица П 4.2 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	216	4,67	211	2,64	205	3,78	199	2,34	193	3,65	177	3,46	163	3,75	153	2,63	141	2,86
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	224	4,15	219	2,89	213	4,13	207	2,85	204	3,26	183	3,95	179	3,36	164	3,16	155	2,96
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	228	3,25	224	3,14	218	2,78	211	3,18	208	4,12	187	4,87	183	3,68	167	3,35	159	3,47
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	221	3,72	218	3,48	211	2,81	204	3,26	202	3,84	180	3,86	176	3,56	160	4,42	153	4,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	225	4,36	223	4,23	215	3,26	209	3,49	207	4,15	184	3,58	180	4,12	164	4,56	157	2,95



Окончание таблицы П 4.2

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	220	3,16	219	4,38	211	4,15	204	4,45	202	3,76	179	4,12	175	4,15	159	3,48	152	2,89
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	226	3,35	225	4,59	218	3,25	210	2,87	208	4,13	185	3,84	181	4,38	165	4,69	158	3,16
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	217	4,42	217	4,61	210	3,72	202	3,51	200	2,78	179	4,15	173	4,26	158	3,71	151	3,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	223	4,56	224	4,31	218	4,36	208	4,37	206	2,81	186	3,76	179	4,52	164	4,00	157	3,47

Таблица П 4.3 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	216	4,67	211	2,64	201	3,78	185	2,34	170	3,65	161	3,46	149	3,75	138	2,63	127	2,86
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	224	4,15	219	2,89	209	4,13	193	2,85	178	3,26	169	3,95	157	3,36	146	3,16	135	2,96
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	228	3,25	224	3,14	213	2,78	197	3,18	182	4,12	173	4,87	161	3,68	150	3,35	139	3,47
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	221	3,72	218	3,48	206	2,81	190	3,26	175	3,84	166	3,86	154	3,56	143	4,42	133	4,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	225	4,36	223	4,23	210	3,26	194	3,49	179	4,15	170	3,58	158	4,12	147	4,56	137	2,95

Окончание таблицы П 4.3

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	220	3,16	219	4,38	205	4,15	189	4,45	174	3,76	165	4,12	153	4,15	142	3,48	132	2,89
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	226	3,35	225	4,59	211	3,25	195	2,87	180	4,13	171	3,84	159	4,38	148	4,69	138	3,16
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	217	4,42	216	4,61	203	3,72	186	3,51	171	2,78	162	4,15	150	4,26	139	3,71	131	3,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	223	4,56	221	4,31	209	4,36	192	4,37	177	2,81	168	3,76	156	4,52	145	4,00	137	3,47

Таблица П 4.4 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	216	4,67	211	2,64	202	3,78	183	2,34	169	3,65	158	3,46	145	3,75	136	2,63	125	2,86
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	224	4,15	219	2,89	210	4,13	191	2,85	177	3,26	166	3,95	153	3,36	144	3,16	133	2,96
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	228	3,25	224	3,14	214	2,78	195	3,18	181	4,12	170	4,87	157	3,68	147	3,35	137	3,47
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	221	3,72	218	3,48	207	2,81	188	3,26	174	3,84	163	3,86	150	3,56	140	4,42	130	4,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	225	4,36	223	4,23	211	3,26	192	3,49	178	4,15	167	3,58	154	4,12	144	4,56	134	2,95

Окончание таблицы П 4.4

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	220	3,16	218	4,38	206	4,15	187	4,45	173	3,76	162	4,12	149	4,15	139	3,48	129	2,89
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	226	3,35	224	4,59	212	3,25	193	2,87	179	4,13	168	3,84	155	4,38	145	4,69	135	3,16
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	217	4,42	215	4,61	203	3,72	184	3,51	171	2,78	159	4,15	146	4,26	138	3,71	127	3,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	223	4,56	221	4,31	209	4,36	190	4,37	177	2,81	166	3,76	152	4,52	144	4,00	132	3,47

Таблица П 4.5 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	231	4,67	221	3,65	211	2,86	200	3,75	189	2,64	180	3,46	171	2,34	161	2,63	150	3,78
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	239	4,15	230	3,26	219	2,96	208	3,36	197	2,89	188	3,95	179	2,85	169	3,16	158	4,13
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	243	3,25	234	4,12	224	3,47	212	3,68	201	3,14	192	4,87	183	3,18	173	3,35	162	2,78
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	236	3,72	227	3,84	217	4,26	205	3,56	194	3,48	185	3,86	176	3,26	166	4,42	155	2,81
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	240	4,36	231	4,15	221	2,95	209	4,12	198	4,23	189	3,58	180	3,49	170	4,56	160	3,26

Окончание таблицы П 4.5

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	235	3,16	226	3,76	217	3,48	204	4,45	193	4,38	184	2,89	175	4,15	165	4,15	154	4,12
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	241	3,35	232	4,13	224	4,69	210	2,87	199	4,59	190	3,16	181	4,38	171	3,25	160	3,84
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	232	4,42	223	2,78	216	3,71	201	3,51	190	4,61	184	3,26	172	4,26	164	3,72	151	4,15
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	238	4,56	229	2,81	224	4,00	207	4,37	196	4,31	190	3,47	178	4,52	170	4,36	157	3,76

Таблица П 4.6 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	231	4,67	225	2,64	218	3,78	212	2,34	205	3,65	193	3,46	181	3,75	170	2,63	158	2,86
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	239	4,15	233	2,89	226	4,13	220	2,85	213	3,26	201	3,95	189	3,36	178	3,16	166	2,96
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	243	3,25	237	3,14	230	2,78	224	3,18	217	4,12	205	4,87	193	3,68	182	3,35	170	3,47
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	236	3,72	230	3,48	223	2,81	217	3,26	210	3,84	198	3,86	186	3,56	175	4,42	163	4,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	240	4,36	234	4,23	227	3,26	221	3,49	214	4,15	202	3,58	190	4,12	179	4,56	167	2,95



Окончание таблицы П 4.6

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	235	3,16	229	4,38	222	4,15	216	4,45	209	3,76	197	4,12	185	4,15	174	3,48	162	2,89
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	241	3,35	235	4,59	228	3,25	222	2,87	215	4,13	203	3,84	191	4,38	180	4,69	168	3,16
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	232	4,42	226	4,61	219	3,72	213	3,51	206	2,78	194	4,15	183	4,26	171	3,71	161	3,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	238	4,56	232	4,31	225	4,36	219	4,37	212	2,81	200	3,76	189	4,52	177	4,00	167	3,47

Таблица П 4.7 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	231	4,67	221	2,64	211	3,78	200	2,34	189	3,65	174	3,46	158	3,75	151	2,63	144	2,86
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	239	4,15	229	2,89	219	4,13	207	2,85	197	3,26	183	3,95	166	3,36	159	3,16	152	2,96
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	243	3,25	234	3,14	223	2,78	211	3,18	201	4,12	187	4,87	170	3,68	163	3,35	156	3,47
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	236	3,72	228	3,48	216	2,81	204	3,26	194	3,84	180	3,86	163	3,56	156	4,42	149	4,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	240	4,36	233	4,23	220	3,26	209	3,49	198	4,15	184	3,58	167	4,12	160	4,56	153	2,95

Окончание таблицы П 4.7

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	235	3,16	229	4,38	215	4,15	204	4,45	193	3,76	179	4,12	162	4,15	155	3,48	148	2,89
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	241	3,35	235	4,59	221	3,25	210	2,87	199	4,13	185	3,84	168	4,38	161	4,69	154	3,16
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	232	4,42	227	4,61	212	3,72	202	3,51	190	2,78	179	4,15	159	4,26	152	3,71	145	3,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	238	4,56	234	4,31	218	4,36	208	4,37	196	2,81	186	3,76	165	4,52	158	4,00	151	3,47

Таблица П 4.8 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (водопоглощение, %)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	231	4,67	218	2,64	205	3,78	192	2,34	178	3,65	170	3,46	162	3,75	152	2,63	141	2,86
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	239	4,15	226	2,89	213	4,13	200	2,85	186	3,26	178	3,95	170	3,36	160	3,16	149	2,96
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	243	3,25	230	3,14	218	2,78	204	3,18	190	4,12	182	4,87	174	3,68	164	3,35	153	3,47
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	236	3,72	223	3,48	211	2,81	197	3,26	183	3,84	175	3,86	167	3,56	157	4,42	146	4,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	240	4,36	227	4,23	215	3,26	201	3,49	187	4,15	179	3,58	171	4,12	161	4,56	150	2,95

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>	$\bar{W}$ , %	$S^2$ , % <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	235	3,16	222	4,38	211	4,15	196	4,45	182	3,76	174	4,12	166	4,15	156	3,48	145	2,89
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	241	3,35	228	4,59	218	3,25	202	2,87	188	4,13	180	3,84	172	4,38	162	4,69	151	3,16
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	232	4,42	219	4,61	210	3,72	193	3,51	179	2,78	171	4,15	163	4,26	154	3,71	142	3,26
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	238	4,56	225	4,31	218	4,36	199	4,37	185	2,81	177	3,76	169	4,52	159	4,00	148	3,47

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Результаты статистической обработки значений коэффициента теплопроводности тепло-  
изоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного и  
хлопкового волокна и мягких отходов древесины

В таблицах П 5.1 – П 5.8 используются обозначения:

$S^2$  – дисперсия, Вт/м·К<sup>2</sup>;

$\bar{\lambda}$  – среднее значение коэффициента теплопроводности, Вт/м·К.

Таблица П 5.1 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,058	3·10 <sup>-5</sup>	0,058	3·10 <sup>-5</sup>	0,059	4·10 <sup>-5</sup>	0,059	6·10 <sup>-5</sup>	0,061	8·10 <sup>-5</sup>	0,065	3·10 <sup>-5</sup>	0,065	3·10 <sup>-5</sup>	0,067	5·10 <sup>-5</sup>	0,070	3·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,063	3·10 <sup>-5</sup>	0,064	3·10 <sup>-5</sup>	0,065	5·10 <sup>-5</sup>	0,066	4·10 <sup>-5</sup>	0,067	2·10 <sup>-5</sup>	0,068	5·10 <sup>-5</sup>	0,069	8·10 <sup>-5</sup>	0,070	6·10 <sup>-5</sup>	0,073	3·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,064	8·10 <sup>-5</sup>	0,065	9·10 <sup>-5</sup>	0,066	4·10 <sup>-5</sup>	0,067	4·10 <sup>-5</sup>	0,067	4·10 <sup>-5</sup>	0,069	4·10 <sup>-5</sup>	0,070	4·10 <sup>-5</sup>	0,071	8·10 <sup>-5</sup>	0,074	8·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,064	3·10 <sup>-5</sup>	0,065	3·10 <sup>-5</sup>	0,066	3·10 <sup>-5</sup>	0,067	3·10 <sup>-5</sup>	0,067	3·10 <sup>-5</sup>	0,069	3·10 <sup>-5</sup>	0,070	6·10 <sup>-5</sup>	0,071	5·10 <sup>-5</sup>	0,074	7·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,065	7·10 <sup>-5</sup>	0,066	7·10 <sup>-5</sup>	0,067	3·10 <sup>-5</sup>	0,068	3·10 <sup>-5</sup>	0,068	3·10 <sup>-5</sup>	0,070	3·10 <sup>-5</sup>	0,071	6·10 <sup>-5</sup>	0,072	3·10 <sup>-5</sup>	0,075	5·10 <sup>-5</sup>

Окончание таблицы П 5.1

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,065	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$4 \cdot 10^{-5}$	0,067	$7 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,069	$4 \cdot 10^{-5}$	0,070	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$5 \cdot 10^{-5}$	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,065	$6 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$7 \cdot 10^{-5}$	0,068	$7 \cdot 10^{-5}$	0,068	$3 \cdot 10^{-5}$	0,070	$8 \cdot 10^{-5}$	0,071	$6 \cdot 10^{-5}$	0,072	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,065	$4 \cdot 10^{-5}$	0,066	$4 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$5 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,073	$7 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,064	$5 \cdot 10^{-5}$	0,065	$5 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$4 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$



Таблица П 5.2 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,058	$3 \cdot 10^{-5}$	0,058	$4 \cdot 10^{-5}$	0,059	$3 \cdot 10^{-5}$	0,059	$3 \cdot 10^{-5}$	0,062	$5 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$6 \cdot 10^{-5}$	0,070	$8 \cdot 10^{-5}$	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,065	$5 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,067	$8 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,073	$2 \cdot 10^{-5}$	0,076	$5 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,064	$8 \cdot 10^{-5}$	0,066	$4 \cdot 10^{-5}$	0,067	$9 \cdot 10^{-5}$	0,068	$4 \cdot 10^{-5}$	0,070	$8 \cdot 10^{-5}$	0,070	$8 \cdot 10^{-5}$	0,072	$4 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,077	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$6 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$7 \cdot 10^{-5}$	0,072	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,078	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,065	$7 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$7 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$5 \cdot 10^{-5}$	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,075	$3 \cdot 10^{-5}$	0,078	$3 \cdot 10^{-5}$

Окончание таблицы П 5.2

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$4 \cdot 10^{-5}$	0,067	$6 \cdot 10^{-5}$	0,068	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$3 \cdot 10^{-5}$	0,070	$3 \cdot 10^{-5}$	0,072	$4 \cdot 10^{-5}$	0,074	$7 \cdot 10^{-5}$	0,077	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,065	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$8 \cdot 10^{-5}$	0,068	$6 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$6 \cdot 10^{-5}$	0,073	$7 \cdot 10^{-5}$	0,075	$7 \cdot 10^{-5}$	0,078	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$5 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$5 \cdot 10^{-5}$	0,069	$7 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,073	$4 \cdot 10^{-5}$	0,076	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,064	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$3 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,072	$6 \cdot 10^{-5}$	0,074	$6 \cdot 10^{-5}$	0,077	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица П 5.3 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,058	$3 \cdot 10^{-5}$	0,059	$3 \cdot 10^{-5}$	0,060	$4 \cdot 10^{-5}$	0,060	$5 \cdot 10^{-5}$	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,076	$8 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,065	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$5 \cdot 10^{-5}$	0,067	$6 \cdot 10^{-5}$	0,069	$8 \cdot 10^{-5}$	0,069	$4 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,079	$2 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,064	$8 \cdot 10^{-5}$	0,066	$9 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$8 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,072	$8 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,080	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$6 \cdot 10^{-5}$	0,070	$3 \cdot 10^{-5}$	0,072	$7 \cdot 10^{-5}$	0,075	$3 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,065	$7 \cdot 10^{-5}$	0,067	$7 \cdot 10^{-5}$	0,068	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,073	$5 \cdot 10^{-5}$	0,076	$3 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$

Окончание таблицы П 5.3

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$7 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$2 \cdot 10^{-5}$	0,072	$3 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,080	$5 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,065	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$6 \cdot 10^{-5}$	0,068	$8 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,073	$2 \cdot 10^{-5}$	0,076	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,066	$5 \cdot 10^{-5}$	0,067	$2 \cdot 10^{-5}$	0,069	$2 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,064	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$3 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$2 \cdot 10^{-5}$	0,072	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица П 5.4 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения льняного волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,058	$3 \cdot 10^{-5}$	0,059	$3 \cdot 10^{-5}$	0,060	$4 \cdot 10^{-5}$	0,060	$5 \cdot 10^{-5}$	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,076	$8 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,065	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$5 \cdot 10^{-5}$	0,067	$6 \cdot 10^{-5}$	0,069	$8 \cdot 10^{-5}$	0,069	$4 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,079	$2 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,064	$8 \cdot 10^{-5}$	0,066	$9 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$8 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,072	$8 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,080	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,067	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$6 \cdot 10^{-5}$	0,070	$3 \cdot 10^{-5}$	0,072	$7 \cdot 10^{-5}$	0,075	$3 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,065	$7 \cdot 10^{-5}$	0,067	$7 \cdot 10^{-5}$	0,068	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$3 \cdot 10^{-5}$	0,073	$5 \cdot 10^{-5}$	0,076	$3 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$

Окончание таблицы П 5.4

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,064	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$7 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$2 \cdot 10^{-5}$	0,072	$3 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,080	$5 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,065	$6 \cdot 10^{-5}$	0,067	$6 \cdot 10^{-5}$	0,068	$8 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,073	$2 \cdot 10^{-5}$	0,076	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,063	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$6 \cdot 10^{-5}$	0,066	$5 \cdot 10^{-5}$	0,067	$2 \cdot 10^{-5}$	0,069	$2 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$4 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,064	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$4 \cdot 10^{-5}$	0,067	$4 \cdot 10^{-5}$	0,068	$3 \cdot 10^{-5}$	0,070	$5 \cdot 10^{-5}$	0,070	$2 \cdot 10^{-5}$	0,072	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица П 5.5 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на фенолформальдегидном связующем (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,066	3·10 <sup>-5</sup>	0,066	3·10 <sup>-5</sup>	0,067	4·10 <sup>-5</sup>	0,069	6·10 <sup>-5</sup>	0,070	8·10 <sup>-5</sup>	0,072	3·10 <sup>-5</sup>	0,074	3·10 <sup>-5</sup>	0,077	5·10 <sup>-5</sup>	0,079	3·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,069	3·10 <sup>-5</sup>	0,069	3·10 <sup>-5</sup>	0,070	5·10 <sup>-5</sup>	0,072	4·10 <sup>-5</sup>	0,073	2·10 <sup>-5</sup>	0,074	5·10 <sup>-5</sup>	0,076	8·10 <sup>-5</sup>	0,079	6·10 <sup>-5</sup>	0,081	3·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,074	8·10 <sup>-5</sup>	0,074	9·10 <sup>-5</sup>	0,075	4·10 <sup>-5</sup>	0,076	4·10 <sup>-5</sup>	0,076	4·10 <sup>-5</sup>	0,077	4·10 <sup>-5</sup>	0,078	4·10 <sup>-5</sup>	0,081	8·10 <sup>-5</sup>	0,083	8·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,074	3·10 <sup>-5</sup>	0,074	3·10 <sup>-5</sup>	0,075	3·10 <sup>-5</sup>	0,076	3·10 <sup>-5</sup>	0,076	3·10 <sup>-5</sup>	0,077	3·10 <sup>-5</sup>	0,078	6·10 <sup>-5</sup>	0,081	5·10 <sup>-5</sup>	0,083	7·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,075	7·10 <sup>-5</sup>	0,075	7·10 <sup>-5</sup>	0,076	3·10 <sup>-5</sup>	0,076	3·10 <sup>-5</sup>	0,077	3·10 <sup>-5</sup>	0,078	3·10 <sup>-5</sup>	0,079	6·10 <sup>-5</sup>	0,082	3·10 <sup>-5</sup>	0,084	5·10 <sup>-5</sup>

Окончание таблицы П 5.5

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,075	$7 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,077	$4 \cdot 10^{-5}$	0,078	$6 \cdot 10^{-5}$	0,081	$5 \cdot 10^{-5}$	0,083	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$7 \cdot 10^{-5}$	0,076	$7 \cdot 10^{-5}$	0,077	$3 \cdot 10^{-5}$	0,078	$8 \cdot 10^{-5}$	0,079	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$6 \cdot 10^{-5}$	0,084	$6 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,075	$3 \cdot 10^{-5}$	0,076	$5 \cdot 10^{-5}$	0,077	$6 \cdot 10^{-5}$	0,080	$5 \cdot 10^{-5}$	0,082	$7 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$3 \cdot 10^{-5}$	0,077	$4 \cdot 10^{-5}$	0,078	$4 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$	0,083	$5 \cdot 10^{-5}$



Таблица П 5.6 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на карбамидоформальдегидном связующем (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,066	3·10 <sup>-5</sup>	0,066	4·10 <sup>-5</sup>	0,068	3·10 <sup>-5</sup>	0,072	3·10 <sup>-5</sup>	0,073	5·10 <sup>-5</sup>	0,075	3·10 <sup>-5</sup>	0,077	6·10 <sup>-5</sup>	0,078	8·10 <sup>-5</sup>	0,079	3·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,069	3·10 <sup>-5</sup>	0,070	5·10 <sup>-5</sup>	0,072	3·10 <sup>-5</sup>	0,075	8·10 <sup>-5</sup>	0,076	6·10 <sup>-5</sup>	0,077	3·10 <sup>-5</sup>	0,079	4·10 <sup>-5</sup>	0,080	2·10 <sup>-5</sup>	0,081	5·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,074	8·10 <sup>-5</sup>	0,075	4·10 <sup>-5</sup>	0,076	9·10 <sup>-5</sup>	0,078	4·10 <sup>-5</sup>	0,079	8·10 <sup>-5</sup>	0,079	8·10 <sup>-5</sup>	0,081	4·10 <sup>-5</sup>	0,082	4·10 <sup>-5</sup>	0,083	4·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,074	3·10 <sup>-5</sup>	0,075	3·10 <sup>-5</sup>	0,076	3·10 <sup>-5</sup>	0,078	6·10 <sup>-5</sup>	0,079	5·10 <sup>-5</sup>	0,079	7·10 <sup>-5</sup>	0,081	3·10 <sup>-5</sup>	0,082	3·10 <sup>-5</sup>	0,083	3·10 <sup>-5</sup>
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,075	7·10 <sup>-5</sup>	0,076	3·10 <sup>-5</sup>	0,077	7·10 <sup>-5</sup>	0,079	6·10 <sup>-5</sup>	0,080	3·10 <sup>-5</sup>	0,080	5·10 <sup>-5</sup>	0,082	3·10 <sup>-5</sup>	0,083	3·10 <sup>-5</sup>	0,084	3·10 <sup>-5</sup>

Окончание таблицы П 5.6

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,076	$6 \cdot 10^{-5}$	0,078	$5 \cdot 10^{-5}$	0,079	$3 \cdot 10^{-5}$	0,079	$3 \cdot 10^{-5}$	0,081	$4 \cdot 10^{-5}$	0,082	$7 \cdot 10^{-5}$	0,083	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$8 \cdot 10^{-5}$	0,077	$6 \cdot 10^{-5}$	0,079	$6 \cdot 10^{-5}$	0,080	$6 \cdot 10^{-5}$	0,080	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$7 \cdot 10^{-5}$	0,083	$7 \cdot 10^{-5}$	0,084	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,077	$5 \cdot 10^{-5}$	0,078	$7 \cdot 10^{-5}$	0,078	$3 \cdot 10^{-5}$	0,080	$4 \cdot 10^{-5}$	0,081	$4 \cdot 10^{-5}$	0,082	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,075	$4 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,078	$3 \cdot 10^{-5}$	0,079	$5 \cdot 10^{-5}$	0,079	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$6 \cdot 10^{-5}$	0,083	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица П 5.7 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на жидком стекле (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$4 \cdot 10^{-5}$	0,072	$5 \cdot 10^{-5}$	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,077	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$3 \cdot 10^{-5}$	0,084	$3 \cdot 10^{-5}$	0,089	$8 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$5 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$8 \cdot 10^{-5}$	0,079	$4 \cdot 10^{-5}$	0,084	$3 \cdot 10^{-5}$	0,086	$5 \cdot 10^{-5}$	0,091	$2 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,074	$8 \cdot 10^{-5}$	0,074	$9 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$8 \cdot 10^{-5}$	0,081	$4 \cdot 10^{-5}$	0,081	$4 \cdot 10^{-5}$	0,086	$8 \cdot 10^{-5}$	0,087	$4 \cdot 10^{-5}$	0,091	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,076	$3 \cdot 10^{-5}$	0,079	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$6 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$	0,086	$7 \cdot 10^{-5}$	0,087	$3 \cdot 10^{-5}$	0,091	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,075	$7 \cdot 10^{-5}$	0,075	$7 \cdot 10^{-5}$	0,077	$3 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$	0,082	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$3 \cdot 10^{-5}$	0,087	$5 \cdot 10^{-5}$	0,088	$3 \cdot 10^{-5}$	0,092	$3 \cdot 10^{-5}$

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$7 \cdot 10^{-5}$	0,081	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$2 \cdot 10^{-5}$	0,086	$3 \cdot 10^{-5}$	0,087	$4 \cdot 10^{-5}$	0,091	$5 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,077	$8 \cdot 10^{-5}$	0,080	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$4 \cdot 10^{-5}$	0,082	$4 \cdot 10^{-5}$	0,087	$2 \cdot 10^{-5}$	0,088	$5 \cdot 10^{-5}$	0,092	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,073	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$5 \cdot 10^{-5}$	0,078	$2 \cdot 10^{-5}$	0,080	$2 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$	0,085	$4 \cdot 10^{-5}$	0,086	$4 \cdot 10^{-5}$	0,090	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$3 \cdot 10^{-5}$	0,081	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$2 \cdot 10^{-5}$	0,086	$6 \cdot 10^{-5}$	0,087	$6 \cdot 10^{-5}$	0,091	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица П 5.8 – Результаты статистической обработки экспериментальных данных теплоизоляционных композиционных плит, изготовленных из отходов прядения хлопкового волокна и мягких отходов древесины на алюмохромфосфатном связующем (коэффициент теплопроводности, Вт/м·К)

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
без добавки мягких отходов древесины	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,066	$3 \cdot 10^{-5}$	0,068	$4 \cdot 10^{-5}$	0,072	$5 \cdot 10^{-5}$	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,077	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$3 \cdot 10^{-5}$	0,084	$3 \cdot 10^{-5}$	0,089	$8 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,069	$3 \cdot 10^{-5}$	0,071	$5 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$8 \cdot 10^{-5}$	0,079	$4 \cdot 10^{-5}$	0,084	$3 \cdot 10^{-5}$	0,086	$5 \cdot 10^{-5}$	0,091	$2 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки лиственных пород (береза)	0,074	$8 \cdot 10^{-5}$	0,074	$9 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$8 \cdot 10^{-5}$	0,081	$4 \cdot 10^{-5}$	0,081	$4 \cdot 10^{-5}$	0,086	$8 \cdot 10^{-5}$	0,087	$4 \cdot 10^{-5}$	0,091	$4 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,076	$3 \cdot 10^{-5}$	0,079	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$6 \cdot 10^{-5}$	0,081	$3 \cdot 10^{-5}$	0,086	$7 \cdot 10^{-5}$	0,087	$3 \cdot 10^{-5}$	0,091	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя стружки хвойных пород (сосна)	0,075	$7 \cdot 10^{-5}$	0,075	$7 \cdot 10^{-5}$	0,077	$3 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$	0,082	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$3 \cdot 10^{-5}$	0,087	$5 \cdot 10^{-5}$	0,088	$3 \cdot 10^{-5}$	0,092	$3 \cdot 10^{-5}$

Композиционный материал	Доля добавки связующего, %; температура сушки 100 °С																	
	0		2		4		8		12		16		20		24		30	
	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}$ , Вт/м·К	$S^2$ , Вт/м·К <sup>2</sup>
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,074	$3 \cdot 10^{-5}$	0,074	$6 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$7 \cdot 10^{-5}$	0,081	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$2 \cdot 10^{-5}$	0,086	$3 \cdot 10^{-5}$	0,087	$4 \cdot 10^{-5}$	0,091	$5 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры лиственных пород (береза)	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$6 \cdot 10^{-5}$	0,077	$8 \cdot 10^{-5}$	0,080	$6 \cdot 10^{-5}$	0,082	$4 \cdot 10^{-5}$	0,082	$4 \cdot 10^{-5}$	0,087	$2 \cdot 10^{-5}$	0,088	$5 \cdot 10^{-5}$	0,092	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 20 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,073	$3 \cdot 10^{-5}$	0,073	$6 \cdot 10^{-5}$	0,075	$5 \cdot 10^{-5}$	0,078	$2 \cdot 10^{-5}$	0,080	$2 \cdot 10^{-5}$	0,080	$3 \cdot 10^{-5}$	0,085	$4 \cdot 10^{-5}$	0,086	$4 \cdot 10^{-5}$	0,090	$3 \cdot 10^{-5}$
с добавкой 50 % от массы наполнителя коры хвойных пород (сосна)	0,074	$5 \cdot 10^{-5}$	0,074	$4 \cdot 10^{-5}$	0,076	$4 \cdot 10^{-5}$	0,079	$3 \cdot 10^{-5}$	0,081	$5 \cdot 10^{-5}$	0,081	$2 \cdot 10^{-5}$	0,086	$6 \cdot 10^{-5}$	0,087	$6 \cdot 10^{-5}$	0,091	$3 \cdot 10^{-5}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 6  
Акты внедрения результатов исследований



УТВЕРЖДАЮ

заместитель начальника Академии гражданской  
защиты МЧС России (проректор)  
по учебной работе

Щукарев С.Ю.

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ**  
**в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы**  
**«Оценка термодеструкции лигноцеллюлозных наполнителей**  
**и композиционных материалов на их основе»**

Комиссия в составе:

председателя – заведующего кафедрой пожарной безопасности канд. воен. наук, доц. Ляшенко С.М.

членов комиссии:

доцента кафедры пожарной безопасности канд. техн. наук Аносовой Е.Б.  
ст. преподавателя кафедры пожарной безопасности канд. техн. наук, подполковника Фатыхова Р.Р.

рассмотрев результаты внедрения в учебный процесс НИР «Оценка термодеструкции лигноцеллюлозных наполнителей и композиционных материалов на их основе», выполненной совместно сотрудниками кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств (ЛДП), кафедрой техносферной безопасности (ТБ) КГУ и пожарной безопасности (ПБ) АГЗ МЧС России д.тех. наук, проф. Титуниным А.А., канд. техн. наук, доц. Вахниной Г.Н., канд. техн. наук, доц. Сусоевой И.В., канд. воен. наук, доц. Ляшенко С.М., канд. техн. наук, доц. Аносовой Е.Б. установила:

1. Внедрение результатов НИР в учебный процесс соответствует целям и задачам подготовки специалитета 20.05.01 «Пожарная безопасность», а также требованиям Федерального образовательного стандарта высшего образования по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность», специализация «Надзорная деятельность» и «Пожаротушение»

2. Результаты исследований используются в АГЗ МЧС России в учебном процессе в соответствии с учебными планами для студентов заочной форм обучения I и IV курсов специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность» по следующим дисциплинам:

1. «Пожарная безопасность технологических процессов и производств» – 12 аудиторных занятий, из них с использованием результатов 2 часа на группу.

2. «Пожарная безопасность в строительстве» – 12 аудиторных занятий, из них с использованием результатов 2 часа на группу.

3. «Пожарно-техническая экспертиза» – 12,5 аудиторных занятий, из них с использованием результатов 2 часа на группу.



Кроме того, данные результаты используются при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ, магистерских диссертаций.

3. Внедрение результатов рассматриваемой НИР в учебный процесс позволяет:

- ознакомить обучающихся с информацией о физических и химических процессах, протекающих при нагревании в материале наполнителя (хлопковое волокно, отходы хлопкового волокна и коробочки, стебель, отходы льняного волокна, мягкие отходы древесины);
- повысить качество практического обучения студентов основам пожарной безопасности строительных материалов;
- активизировать творческую деятельность студентов;
- повысить качество выполнения выпускных квалификационных работ, магистерских диссертаций.

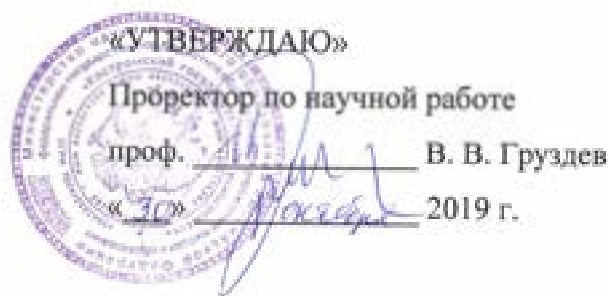
Председатель комиссии:

Ляшенко С.М.

Члены комиссии:

Аносова Е.Б.

Фатыхов Р.Р.



**АКТ**  
**внедрения результатов диссертационной работы**  
**соискателя ученой степени доктора технических наук**  
**Сусоевой Ирины Вячеславовны**

Комиссия в составе:

председателя – директора института дизайна и технологий  
 канд. техн. наук, доцента Шорохова С.А.,

членов комиссии:

докт. техн. наук, профессора Титушина А.А.,  
 канд. техн. наук, доцента Вахниной Т.Н.,  
 канд. техн. наук, доцента Федотова А.А.,

рассмотрев результаты внедрения в учебный процесс НИР, выполненной совместно сотрудниками кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств (ЛДП) и кафедрой техносферной безопасности (ТБ) КГУ под руководством канд. техн. наук, доц. Сусоевой И.В. установила:

1. Внедрение в учебный процесс результатов, полученных в диссертационной работе Сусоевой И.В., соответствует целям и задачам подготовки бакалавров по направлению 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, магистров 35.04.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, а также требованиями государственных образовательных стандартов по направлению подготовки 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств (уровень бакалавриат) и по направлению подготовки 35.04.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств (уровень магистратура).

2. Результаты исследований используются в Костромском государственном университете в учебном процессе в соответствии с учебными планами для студентов очной и заочной форм обучения III, IV курсов бакалавриата 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств по следующим дисциплинам:

1. «Технология деревянного домостроения» – 2 зачетных единицы (72 часа), из них лекций – 2 часа на группу.

2. «Технология композиционных материалов» – 5 зачетных единиц (180 часов), из них лекций – 4 часа; лабораторных работ – 4 часа на группу.

3. Результаты исследований используются в Костромском государственном университете в учебном процессе в соответствии с учебными планами для студентов очной и заочной форм обучения I, II курсов магистратуры по направлению 35.04.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств по следующим дисциплинам:

1. «Актуальные проблемы лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» – 3 зачетных единицы (108 часов), из них лекций – 2 часа; лабораторных работ – 2 часа на группу.

2. «Современные технологии переработки древесного сырья» – 4 зачетных единиц (144 часа), из них лекций – 2 часа; лабораторных работ – 4 часа на группу.

Кроме того, данные результаты используются при выполнении научно-исследовательских, выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций.

4. Внедрение результатов рассматриваемой НИР в учебный процесс позволяет:

- ознакомить студентов с новой полученной информацией о результатах определения химического состава отходов прядения льняных и хлопковых волокон и физико-механических свойств композиционных материалов, изготовленных на их основе; параметров горючести теплоизоляционных композитов из растительных отходов; определения коэффициента теплопроводности плитных материалов из растительных отходов.

- повысить качество практического обучения студентов основам безопасности строительных материалов;

- активизировать творческую деятельность студентов;

- повысить качество выполнения выпускных квалификационных работ и магистерских диссертаций.

Председатель комиссии:



Шорохов С.А.

Члены комиссии:



Титунин А.А.,  
Вахнина Т.Н.,  
Федотов А.А.

УТВЕРЖДАЮ  
 Заместитель начальника ФГБОУ ВО  
 Ивановской пожарно-спасательной  
 академии ГПС МЧС России  
 по научной работе  
 И.Ю. Шарабанова  
 « 11 »                      2019 г.



#### АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы  
 «Влияние замедлителей горения на показатели огнезащищенности  
 композиционных материалов из отходов производства растительных  
 волокон» в образовательный процесс ФГБОУ ВО Ивановской пожарно-  
 спасательной академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе начальника научно-исследовательского отделения учебно-научного комплекса «Государственный надзор», подполковника внутренней службы, канд. хим. наук, доцента Петрова А.В., профессора кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор»), докт. техн. наук, доцента Циркиной О.Г. и заместителя начальника кафедры государственного надзора и экспертизы пожаров (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор»), подполковника внутренней службы, канд. биол. наук, доцента Мочаловой Т.А. рассмотрев результаты внедрения в учебный процесс НИР «Влияние замедлителей горения на показатели огнезащищенности композиционных материалов из отходов производства растительных волокон», выполненной совместно сотрудниками кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств (ЛДП), кафедрой техносферной безопасности (ТБ) КГУ и Научно-исследовательским отделением ИПСА ГПС МЧС России докт. тех. наук, проф. Титунина А.А., канд. техн. наук, доц. Вахниной Т.Н., канд. техн. наук, доц. Сусоевой И.В., канд. хим. наук, доц. Петров А.В. установила:

1. Внедрение результатов НИР в учебный процесс соответствует целям и задачам подготовки бакалавриата 20.03.01 «Техносферная безопасность», а также требованиями государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

2. Результаты исследований используются в ИПСА ГПС МЧС России в учебном процессе в соответствии с учебными планами для обучающихся очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 20.03.01 – Техносферная безопасность (уровень бакалавриата) в дисциплине - «Пожарная безопасность объектов защиты», с использованием результатов в количестве 2 часов на группу.

3. Внедрение результатов рассматриваемой НИР в учебный процесс позволяет:

- ознакомить обучающихся с полученной информацией о физических и химических процессах, протекающих при нагревании в материале наполнителя (хлопковое волокно, отходы хлопкового волокна и коробочки, стебель, отходы льняного волокна, мягкие отходы древесины);
- повысить качество практического обучения основам безопасности строительных материалов;
- активизировать творческую деятельность обучающихся.

Члены комиссии:

начальник научно-исследовательского отделения

УНК «Государственный надзор»

кандидат химических наук, доцент



А.В. Петров

профессор кафедры

пожарной безопасности объектов защиты

(в составе УНК «Государственный надзор»)

доктор технических наук, доцент



О.Г. Циркина

заместитель начальника кафедры

государственного надзора и экспертизы пожаров

(в составе УНК «Государственный надзор»)

кандидат биологических наук, доцент



Т.А. Мочалова



УТВЕРЖДАЮ

Врио заместителя начальника Военной  
академии по учебной и научной работе  
полковник

В.Хантов

« 18 » 11 2015 г.



### АКТ

реализации результатов диссертационной работы  
соискателя ученой степени доктора технических наук  
Сусоевой Ирины Вячеславовны

Комиссия в составе:

председатель комиссии – начальник 3 кафедры (технического обеспечения РХБ защиты) канд. воен. наук, доцент полковник Блохнин И.Д.;

члены комиссии: доцент 3 кафедры (технического обеспечения РХБ защиты) докт. техн. наук, профессор Староверов Б.А.;

доцент 3 кафедры (технического обеспечения РХБ защиты) канд. техн. наук полковник Зайковский С.И.,

рассмотрев результаты внедрения в учебный процесс НИР «Оценка пожароопасных показателей композиционных материалов из растительного сырья», выполненной совместно сотрудниками кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств (ЛДП) и 3 кафедрой (техническое обеспечение радиационной, химической и биологической защиты) Военной академии РХБ защиты (г. Кострома) докт. тех. наук, профессором Титуниным А.А., канд. техн. наук, доцентом Вахниной Т.Н., канд. техн. наук, доцентом Сусоевой И.В., канд. воен. наук, доцентом Барашковым А.Ю. установила:

1 Внедрение результатов НИР в учебный процесс соответствует целям и задачам подготовки курсантов СПО по специальности 20.02.01 – «Рациональное использование природохозяйственных комплексов» по военной специальности «Радиационная, химическая и биологическая защита», а также требованиям государственного образовательного стандарта по направлению подготовки (специальности) 20.02.01. – «Рациональное использование природоохранных комплексов».

2 Результаты исследований используются в Военной академии радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко в учебном процессе в соответствии с учебными планами для курсантов очной формы обучения I курса по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» – 68 аудиторных занятий, из них с использованием результатов 2 часа на группу.

Кроме того, данные результаты используются при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ.

3 Внедрение результатов рассматриваемой НИР в учебный процесс позволяет:

- ознакомить курсантов с полученной новой информацией о показателях горючести наполнителя (отходы прядения хлопковых и льняных волокон, мягкие отходы древесины) и композитов на его основе;
- повысить качество практического обучения курсантов основам безопасности строительных материалов;
- активизировать творческую деятельность курсантов;
- повысить качество выполнения выпускных квалификационных работ.

Председатель комиссии:  
начальник 3 кафедры  
(технического обеспечения РХБ защиты)  
канд. воен. наук, доцент  
полковник



И.Д. Блохин

Члены комиссии:  
доцент 3 кафедры  
(технического обеспечения РХБ защиты)  
докт. техн. наук, профессор



Б.А. Староверов

доцент 3 кафедры  
(технического обеспечения РХБ защиты)  
канд. техн. наук, доцент  
полковник



С.И. Зайковский

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

В. В. Груздев

2019 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель Генерального Директора

ООО «НКЛМ» В. В. Афанасин

«2» сентября 2019 г.



## АКТ

передачи технического предложения  
по организации переработки отходов растительного происхождения  
от «2» сентября 2019 г.

Состав комиссии:

Председатель: Заместитель Генерального Директора ООО «НКЛМ»  
**В. В. Афанасин**

Члены комиссии:

доцент кафедры техносферной безопасности, канд. техн. наук  
**Сусоева И. В.**,  
заведующий кафедрой лесозаготовительных и деревоперерабатывающих  
производств проф., д.т.н. **Титунин А.А.**,  
доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих  
производств, канд. техн. наук **Вахнина Т. Н.**

Комиссия на совместном заседании «2» 09 2019 г. рассмотре-  
ла материалы технического предложения по организации переработки отхо-  
дов растительного происхождения, разработанного в период с 09.03.2014 по  
01.09.2019 г. на кафедре лесозаготовительных и деревоперерабатывающих  
производств Костромского государственного университета под руководством  
доц., к.т.н. Сусоевой Ирины Вячеславовны.

Материалы, представленные комиссии, а именно – результаты опреде-  
ления химического состава отходов прядения льняных волокон и физико-  
механических свойств композиционных материалов, изготовленных на их  
основе, регрессионные модели зависимостей физико-механических свойств  
композиционных материалов от технологических факторов процесса произ-  
водства, технико-экономическое обоснование целесообразности использова-  
ния в производстве композитов теплоизоляционного назначения отходов  
прядения льняных волокон с добавкой мягких древесных отходов на различ-



ных видах связующих; рекомендации по повышению огнезащитности теплоизоляционных композитов из растительных отходов, отражают результаты выполненных научных исследований по проблеме переработки отходов растительного происхождения в Костромской области. Техническое предложение может быть использовано принимающей стороной с целью снижения негативного экологического воздействия на окружающую среду при существующем способе утилизации отходов прядения льняных волокон и мягких древесных отходов. Комиссия отмечает, что данные о химическом и элементном составе отходов прядения льняных волокон, впервые представленные автором, позволяют получить более полное представление о возможных способах утилизации отходов. Комиссия отмечает, что выявленное в исследованиях автора содержание в неиспользуемых отходах значительное количество элементов 2–4 классов опасности: кремния, калия, серы, хлора и др. исключает в перспективе утилизацию их путем захоронения или сжигания.

Ожидаемый экономический и экологический эффекты от внедрения результатов технического предложения могут быть получены из расчета ежегодного объема подлежащих утилизации отходов, включающих элементы 2–4 класса опасности, в количестве 110 м<sup>3</sup>.

Подписи членов комиссии:

 И.В. Сусоева

 А.А. Титунин

 Т.Н. Вахнина

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

проф.  В. В. Груздев

2020 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник цеха №1

Адищевская бумажная фабрика

Новиков А.С.

«06»  2020 г.

## АКТ

передачи результатов научных исследований по технологии получения композиционных материалов из растительного сырья

Настоящим актом подтверждается, что 06.01.2020 г. на совместном заседании комиссии из представителей Адищевской бумажной фабрики и Костромского государственного университета рассмотрены результаты работы «Разработка базовых технологических процессов получения композиционных материалов из растительного сырья», выполненной под руководством Сусоевой И.В. к.т.н., доцента. Комиссия отметила, что новыми научными результатами являются: полученные в ходе экспериментальных исследований данные о влиянии технологических режимах и различных видов растительного сырья на качество волокнистого материала, используемого для производства композита; создание структуры композита с требуемыми свойствами из растительных отходов местного производства обеспечивается в процессе образования ковалентных связей между гидроксилами целлюлозы и метильными группами связующего и водородных связей между гидроксилами целлюлозных микрофибрилл.

## Результаты, представляющие практическое значение для Адищевской бумажной фабрики

Выполнение работы «Разработка базовых технологических процессов получения композиционных материалов из растительного сырья» основывается на использовании научных и прикладных результатов, полученных Сушовой И.В. в докторской диссертации.

1. Переработка растительного сырья представляет практический интерес и является важной проблемой в современном обществе. В результате переработки растительного сырья можно получить значительный ассортимент материалов волокнистого типа. Поиск простых и экономически эффективных альтернативных путей переработки растительного сырья с получением материалов, которые можно использовать как функциональные материалы, является важной задачей.

К капиллярно-дисперсным системам относятся такие биополимеры, как древесина, а также технологически полученные композиты – бумага, древесноволокнистая плита и другие материалы.

Технология производства бумаги практически не отличается от процесса получения древесноволокнистых плит мокрым способом.

Технологии производства плитных материалов из мелкодисперсных растительных частиц позволяют использовать различные виды лигноцеллюлозных отходов для изготовления материалов строительного назначения.

Результаты, представленные в докторской диссертации, показали, что технология получения композиционного материала позволяет исключить энергоемкую операцию размола древесной щепы на волокно. С точки зрения обеспечения структурообразования композиционного материала необходимо комплексно рассматривать следующие технологические факторы: химический и фракционный состав отходов прядения льняных и хлопковых волокон и мягких отходов древесины; способ подготовки смеси; введение добавок – связующего и антипирена; температура сушки.

2. Реализация результатов: приняты для возможного практического использования.

3. Новизна результатов НИР: новые.

4. Научно-технический эффект: совершенствование технологического процесса переработки растительного сырья и повышение эффективности производства композиционных материалов теплоизоляционного назначения.

5. Режимы получения композита теплоизоляционного назначения могут быть использованы на Адищевской бумажной фабрике с учетом установленного оборудования.

От КГУ  
Подписи членов комиссии  
От Адищевская бумажная фабрика

Сусоева И.В.  
Вахнина Т.Н.  
Титунин А.А.



Новиков А.С.





«УТВЕРЖДАЮ»  
 Проректор по научной работе  
 проф.  В. В. Груздев  
 «19» декабря 2019 г.



«УТВЕРЖДАЮ»  
 Главный технолог  
 ООО «Сухонский картоно-бумажно-  
 бумажный комбинат»  
 С. Н. Середина   
 «19» декабря 2019 г.



### АКТ

#### Передачи результатов научных исследований по технологии получения композита теплоизоляционного назначения

Настоящим актом подтверждается, что 19.12.2019 г. на совместном заседании комиссии из представителей ООО «Сухонский картоно-бумажный комбинат» и Костромского государственного университета рассмотрены результаты работы «Разработка структуры и технологических режимов получения композиционных материалов из растительного сырья», выполненной под руководством Сусоевой И.В. к.т.н., доцента. Комиссия отметила, что новыми научными результатами являются: полученные в ходе экспериментальных исследований данные о фракционном, элементном и химическом составе отходов прядения льна и хлопка, расширяющие представление о структуре и свойствах наполнителя и композита на их основе; регрессионные модели, которые адекватно описывают и отражают взаимосвязь физико-механических показателей композиционных материалов различной структуры с основными технологическими параметрами их производства; результаты сравнительных испытаний нового композита и минеральной ваты при длительном воздействии термовлагообработки.

Результаты, представляющие практическое значение для ООО «Сухонский картоно-бумажный комбинат»

Выполнение работы «Разработка структуры и технологических режимов получения композиционных материалов из растительного сырья» основывается на использовании научных и прикладных результатов, полученных Сусоевой И.В. в докторской диссертации.

Результаты, представленные в докторской диссертации, показали, что технология получения композиционного материала позволяет исключить энергоемкую операцию размола древесной щепы на волокно. С точки зрения

2. Реализация результатов: приняты для возможного практического использования.

3. Новизна результатов НИР: новые.

4. Научно-технический эффект: совершенствование технологического процесса переработки растительных отходов и повышение эффективности производства композиционных материалов теплоизоляционного назначения.

5. Режимы получения композита теплоизоляционного назначения могут быть использованы в ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат» с учетом установленного оборудования.

Подписи членов комиссии

От КГУ	От ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат»
<p>Сусоева И.В. Вахнина Т.Н. Титунин А.А.</p> 	 