

На правах рукописи



Эскин Владислав Дмитриевич

**ПОЛУЧЕНИЕ ПЛИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ
ВЕЩЕСТВ ИЗ КОРЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ**

4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» на кафедре «Технологии композиционных материалов и древесиноведения», г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ермолин Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Титунин Андрей Александрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», заведующий кафедрой лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств

Плотников Николай Павлович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», доцент базовой кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Защита состоится «22» июня 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира 82, Ц – 110.

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира 82, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, ученому секретарю диссертационного совета.

E-mail: us_kai@mail.ru

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» и на официальном сайте <http://sibsau.ru:8066/defending/143/>

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



Криворотова Анна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Древесная кора является крупнотоннажным отходом лесопромышленного комплекса, требующим эффективной переработки. Ежегодно лесозаготовительная и деревоперерабатывающая отрасли генерируют свыше 2 млн тонн коры, которая в большинстве случаев сжигается или вывозится в отвалы, что приводит к серьезным экологическим проблемам. Утилизация коры методами сжигания крайне неэффективна по причине высокого содержания в кородревесных отходах минеральных примесей, а также высокой влажности и зольности коры.

Значительный научный и практический интерес в контексте рационального использования природных ресурсов вызывает возможность переработки древесной коры в плитные материалы без использования связующих веществ. Разработка технологии переработки коры в плитные материалы позволит не только сократить нагрузку на окружающую среду, но и создать новые экономические возможности для предприятий минимизируя зависимость от складирования и захоронения отходов окорки.

Мировой опыт использования древесной коры в качестве самостоятельного сырья или наполнителя для плитных материалов указывает на негативное влияние коры на прочностные свойства получаемых материалов. При добавлении коры хвойных пород в древесно-стружечные и волокнистые плиты значительно снижаются показатели прочности при изгибе и увеличиваются водопоглощение и разбухание материала.

В тоже время в литературе отмечается, что при мелкодисперсном измельчении частиц коры до размеров менее 1 мм и добавлении таких частиц в плитные материалы прочностные показатели плит не ухудшаются, а показатели разбухания и водопоглощения снижаются. При изготовлении пьезотермопластиков также отмечается необходимость мелкодисперсного измельчения коры для повышения свойств материалов.

Особую актуальность исследованию придает возможность отказа от применения синтетических связующих веществ (феноло- и карбамидоформальдегидные смолы). Получение плитных материалов на основе коры без добавления связующих открывает путь к экологически чистым технологиям.

Степень разработанности. Значительный вклад в изучение анатомического строения древесной коры хвойных пород внесли Лотова Л. И., Еремин В. М, Браунинг Б. Л. и др. Подробно изученное строение древесной коры позволяет предполагать возможные направления и способы её эффективной переработки. Вклад в изучение древесно-волокнистых материалов внесли Леонович А. А., Солечник Н. Я., Ласкеев П. Х., Ребрин С. П., Бекетов В. Д., Алашкевич Ю. Д. Вклад в изучение путей рациональной переработки и свойств отходов окорки внесли Цывин М. М., Симонов М. Н., Рязанова Т. В., Шарков В. И., Прикот Н. Г., Житков А. В. и др. Разработано большое количество способов переработки древесной коры как хвойных, так и лиственных пород,

однако унифицированных технологий, получивших масштабное распространение до настоящего времени, не существует.

Цель исследования: разработка технологии получения плитных материалов из гидродинамически обработанной древесной коры без применения связующих веществ.

Задачи исследования:

- исследовать механизм структурообразования плитных материалов за счет аутогезионного взаимодействия гидродинамически обработанных частиц коры сосны;
- изучить закономерности влияния параметров гидродинамической обработки коры сосны на свойства плитных материалов без связующих веществ;
- определить влияние режимных параметров процесса горячего прессования гидродинамически обработанной коры сосны на физико-механические свойства плитных материалов;
- разработать технологическую схему производства плит без связующих веществ из коры хвойных пород древесины;
- оценить технико-экономическую эффективность производства плит из коры хвойных.

Научная новизна работы:

- 1) Впервые исследованы закономерности формирования структуры плитных материалов из коры без связующих веществ за счет аутогезионного взаимодействия гидродинамически обработанных частиц коры сосны.
- 2) Впервые разработана схема формирования структуры плитного материала из гидродинамически обработанных частиц коры сосны.
- 3) Впервые установлены закономерности влияния параметров гидродинамической обработки и режимов горячего прессования коры сосны на физико-механические свойства плитных материалов без связующих веществ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в определении закономерностей формирования структуры плит из гидродинамически обработанных частиц коры за счет аутогезионного взаимодействия без применения связующих веществ.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологии переработки отходов окорки хвойных пород древесины путем получения плитных материалов методом горячего прессования без использования связующих веществ. Разработанная технология позволяет изготавливать плитный материал с заранее заданными свойствами за счет возможности варьирования технологических параметров.

Результаты исследований включены в план развития предприятия ООО «БИОЛЕСПРОМ» (Вологодская обл., с. Верховажье) и будут использованы для внедрения в производство на ООО «Демьяновский завод ДВП» (Кировская обл., пос. Демьяново).

Объект исследований: переработка коры хвойных пород древесины.

Предмет исследования: технология производства плитных материалов без использования связующих веществ из отходов окорки хвойных пород древесины, подвергшиеся гидродинамической обработке.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы экспериментальные исследования проводились с применением математической теории планирования и общепринятых методов обработки экспериментальных данных. Статистическая обработка проводилась с использованием программ *STATGRAPHICS Centurion 18* и *Microsoft Excel*.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Механизм формирования структуры плитных материалов без связующих веществ за счет аутогезионного взаимодействия гидродинамически обработанных частиц коры сосны;

2) Результаты экспериментальных исследований по установлению закономерностей влияния продолжительности гидродинамической обработки частиц коры сосны и концентрации массы в процессе обработки на физико-механические показатели плитных материалов без связующих веществ;

3) Результаты определения режимных параметров процесса горячего прессования гидродинамически обработанной коры сосны, обеспечивающие наилучшие физико-механические показатели плитных материалов;

4) Технология получения плитных материалов на основе гидродинамически обработанной древесной коры хвойных пород без применения связующих веществ.

Соответствие паспорту специальности. Представленная работа соответствует паспорту специальности 4.3.4 – «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины» (п. 4 – Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах).

Личный вклад автора заключается в сборе и анализе литературных данных, разработке и теоретическом обосновании механизма структурообразования плитных материалов без связующих веществ из гидродинамически обработанной коры сосны, разработке методики проведения эксперимента, постановке и непосредственном проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, формулировании выводов, написании публикаций и получении патента, представлении результатов исследований на всероссийских и международных конференциях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность работы обеспечена многократным повторением экспериментов, применением методов статистической обработки полученных результатов.

Результаты работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплексы - проблемы и решения» (Красноярск, 2022), Всероссийской научной конференции с международным участием «Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации» (Красноярск, 2023), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск,

2023), Всероссийской научно-практической конференции «Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины» (Красноярск, 2023), Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2023; 2024), Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи - лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2023), Всероссийской научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2023; 2025), Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 2023), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2024).

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов» проекта «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов» (Номер темы: FEFE-2024-0032).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 статей, в том числе 2 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий ВАК РФ. Получен патент Российской Федерации на изобретение № 2818825 С1.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 29 таблиц и 50 рисунков. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка, включающего 154 ссылки на отечественные и зарубежные работы и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

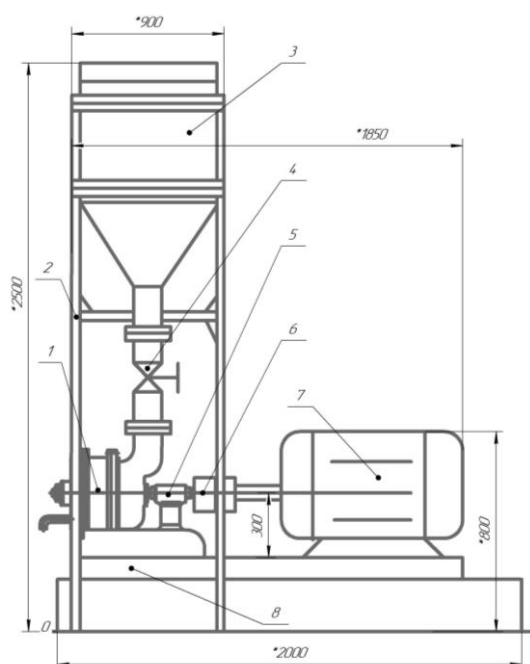
Во введении обоснована актуальность работы по разработке технологии получения плитных материалов без использования связующих веществ из коры сосны обыкновенной, определены цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость исследований.

Глава 1. Состояние вопроса. В первой главе диссертационной работы проведен анализ литературных данных о свойствах отходов окорки древесины и способах получения на их основе плитных материалов. Проанализированы возможные способы подготовки коры для получения плит. Определены предпосылки формирования аутогезионных связей в плитах на основе гидродинамически обработанной коры хвойных пород древесины.

В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют унифицированные крупнотоннажные технологии переработки древесной коры. Изученные способы переработки древесной коры в качестве наполнителя для традиционных плитных материалов указывают на существенное снижение прочностных свойств готовых плит. Однако мелкодисперсное измельчение коры может способствовать повышению прочностных показателей материалов, что также установлено при анализе литературных данных.

Анализ научной и технической литературы отечественных и зарубежных авторов свидетельствует о том, что на формирование плитных материалов из древесной коры хвойных пород без использования связующих в большей степени оказывают влияние фракционный состав частиц коры и способ её подготовки к прессованию. Использование традиционных механических способов измельчения коры не обеспечивает высокие физико-механические характеристики получаемых плитных материалов. Обеспечение таких характеристик возможно благодаря одновременному воздействию на обрабатываемые частицы коры гидродинамических, механических, размалывающих и кавитационных сил. Определено, что обеспечение совокупности воздействия указанных сил, получения однородной структуры и высоких прочностных показателей плит без связующих веществ из коры хвойных возможно благодаря использованию способа подготовки коры в гидродинамическом диспергаторе с эффектом кавитации, предложенного в работе. Такой способ подготовки коры к горячему прессованию позволит получить частицы коры с размерами менее 1 мм и увеличить их удельную поверхность для образования аутогезионных связей в процессе дальнейшего прессования плит без использования связующих веществ.

Глава 2. Методика проведения эксперимента. Во второй главе даны характеристики используемого сырья (кора сосны обыкновенной), приведены описание и технические характеристики основного оборудования, применяемого для проведения экспериментальных исследований, представлена схема лабораторного гидродинамического диспергатора РГГД-1, рассмотрен принцип его работы (рисунок 1), даны методические рекомендации по проведению экспериментальных исследований и статистической обработке полученных результатов.



1 – гидродинамический диспергатор; 2 – станина бака сырья; 3 – бак сырья; 4 – задвижка; 5 – блок опорных подшипников; 6 – муфта; 7 – электродвигатель; 8 – станина установки

Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторного гидродинамического диспергатора

Глава 3. Исследование процесса формирования структуры плит за счет аутогезионного взаимодействия гидродинамически обработанных частиц коры. На формирование структуры плитного материала наибольшее влияние оказывает вид, геометрические размеры и форма частиц, участвующих в структурообразовании плитного материала. Размер, качество и форма частиц во многом определяется способом их получения.

На основании анализа способов подготовки древесного сырья для получения плит было установлено, что наиболее предпочтительным является гидродинамическая обработка частиц коры с эффектом кавитации. Известно, что гидродинамическая обработка древесного сырья позволяет многократно увеличить удельную поверхность активного взаимодействия частиц. Была выдвинута гипотеза, что при обработке измельченной древесной коры сосны в лабораторном гидродинамическом диспергаторе РГГД-1 с эффектом кавитации (см. рисунок 1) будут происходить существенные изменения фракционного состава и увеличение внешней удельной поверхности частиц, что обеспечит аутогезионное взаимодействие между частицами коры в процессе формирования структуры плиты без использования связующих веществ.

Для подтверждения гипотезы были изготовлены образцы плит из пресс-масс, полученных двумя способами: в гидродинамическом диспергаторе и в молотковой мельнице. У пресс-масс была определена степень помола и показатель водоудерживающей способности. Установлено, что при практически равном фракционном составе пресс-масс степень помола и показатель водоудерживающей способности составили соответственно: 79 °ШР и 295 % для гидродинамически обработанной массы коры; 11 °ШР и 118 % для массы коры, измельченной в молотковой мельнице, что свидетельствует об увеличении удельной поверхности частиц коры в результате гидродинамической обработки.

В таблице 1 представлены физико-механические свойства изготовленных образцов плитного материала.

Таблица 1 – Свойства плит без связующих веществ на основе коры, обработанной в гидродинамическом диспергаторе и молотковой мельнице

Показатель	Значение показателей плит на основе корьевой пресс-массы	
	гидродинамически обработанные	после молотковой мельницы
Предел прочности при изгибе, МПа	24	4
Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, МПа	0,69	0,1
Водопоглощение за 24 ч, %	9	28
Разбухание по толщине за 24 ч, %	5,7	20
Остаточная прочность при изгибе после вымачивания в воде в течение 24 ч, %	75	6

Значительные отличия в физико-механических свойствах изготовленных плит, несмотря на близкий по значениям фракционный состав исследуемых корьевых пресс-масс, обусловлены существенными качественными

изменениями поверхности частиц коры, прошедшей гидродинамическую обработку, в результате воздействующих на них гидродинамических и кавитационных сил и эффектов. При механическом измельчении в молотковой мельнице реализуется только ударное и рубящее воздействие, в результате которого происходит значительное изменение фракционного состава коревой массы, однако поверхность обработанных частиц остается развита слабо.

Схема условного механизма структурообразования плитного материала из гидродинамически обработанной коры сосны представлена на рисунке 2. Известно, что мелкодисперсные частицы древесного сырья способны вступать во взаимодействие с более крупными частицами, образуя связи в структуре плитных материалов. Проведенные исследования позволили установить, что гидродинамическая обработка изменяет фракционный состав коры с образованием большого количества мелких частиц. Фракция частиц с размером менее 20 мкм занимает – 26,67 %, фракция от 20 до 100 мкм – 20,7 %, фракция 100 мкм – 27,47 %, 300 мкм – 25,16 %.

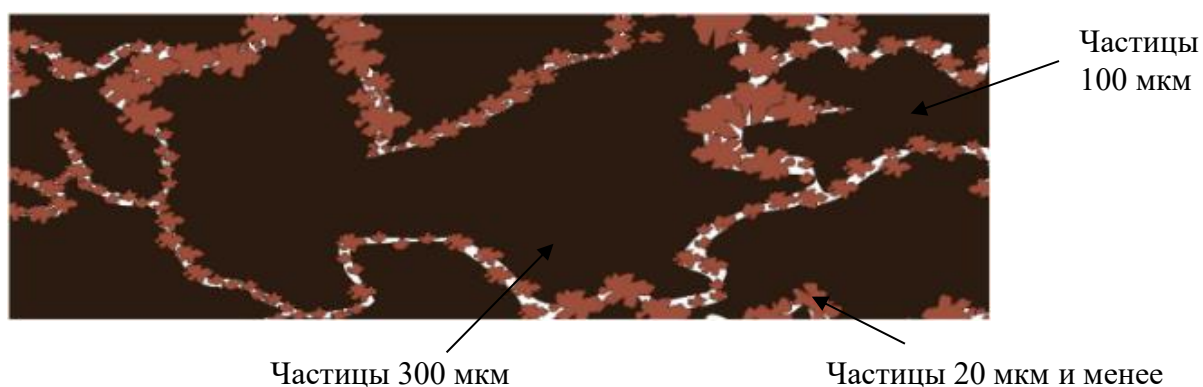


Рисунок 2 – Схема условного механизма структурообразования плиты из гидродинамически обработанных частиц коры

Влияние мелкодисперсной фракции на процессы формирования аутогезионных связей в плитном материале из коры и на прочностные свойства готовых плит было оценено экспериментально. Так, удаление мелкодисперсных частиц коры из пресс-массы путем многократного промывания водой приводит к снижению показателя предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти с 0,76 МПа до 0,17 МПа, снижению показателя предела прочности при изгибе с 24,3 МПа до 11,1 МПа, увеличению показателя разбухания плит по толщине за 24 ч с 5,2 % до 23,2 %. Установленное снижение показателя водоудерживающей способности пресс-массы при многократном промывании водой с 295 % до 180 % подтверждает, что удаленные из состава пресс-массы частицы обладают развитой внешней удельной поверхностью, участвуют в процессе образования структуры плитного материала и оказывают влияние на его прочностные свойства.

Основываясь на проведенных исследованиях можно предположить, что структура плитного материала на основе гидродинамически обработанной коры формируется по следующему принципу: крупные частицы (100-300 мкм),

выступающие в качестве основного армирующего элемента в структуре плиты, и частицы с размерами от 20 до 100 мкм, выполняющие роль наполнителя, заполняющего пространства между крупными частицами, под воздействием давления и температуры в процессе горячего прессования переориентируются в горизонтальное положение параллельно плитам пресса, формируя основной каркас плитного материала. Частицы мелочи (менее 20 мкм), которые, как было упомянуто ранее, обладают развитой внешней удельной поверхностью, выступают в качестве связующего компонента плиты, заполняя пространства и обеспечивая аутогезионное взаимодействие между всеми видами частиц, придавая прочность и водостойкость плитному материалу.

Глава 4. Влияние режимных параметров процесса гидродинамической обработки коры на свойства плит. В четвертой главе приведены результаты исследований по определению влияния параметров гидродинамической обработки на физико-механические свойства плит из коры сосны без связующих веществ.

В качестве параметров гидродинамической обработки при определении их влияния на физико-механические свойства плит выбраны: концентрация пресс-массы, K , %, и продолжительность обработки, $\tau_{обр}$, мин. Частота вращения ротора гидродинамического диспергатора в проводимых экспериментах составляла 2950 об/мин.

Совместное влияние параметров гидродинамической обработки на физико-механические свойства плит без связующих определялось по показателям предела прочности при изгибе, $\sigma_{изг}$, МПа, прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, $\sigma_{раст\perp}$, МПа, и по показателю разбухания плит по толщине за 24 ч, V , %.

Факторы и уровни их варьирования при реализации двухфакторных экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы и уровни варьирования параметров гидродинамической обработки

Наименование фактора	Обозначение	Шаг варьирования	Уровни		
			нижний (-1)	основной (0)	верхний (1)
Продолжительность обработки, $\tau_{обр}$, мин	X1	2	6	8	10
Концентрация пресс-массы, K , %	X2	2	4	6	8

Оценка влияния исследуемых факторов проводилась по стандартизированной диаграмме Парето, графической интерпретации уравнения регрессии и графикам эффектов факторов и их взаимодействий.

В результате математической обработки экспериментальных данных были получены следующие уравнения регрессии, выражающие зависимости:

- предела прочности при изгибе

$$\sigma_{изг} = 0,125 \cdot \tau_{обр} \cdot K - 1,271 \cdot \tau_{обр}^2 + 20,040 \cdot \tau_{обр} - 0,721 \cdot K^2 + 7,657 \cdot K - 79,571;$$

- предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти

$$\sigma_{расм\perp} = 0,646 \cdot \tau_{обр} - 0,002 \cdot \tau_{обр} \cdot K - 0,035 \cdot \tau_{обр}^2 + 0,036 \cdot K^2 - 0,414 \cdot K - 0,890;$$

- разбухания плит по толщине за 24 ч

$$V = 0,025 \cdot \tau_{обр} \cdot K - 0,6 \cdot \tau_{обр}^2 + 8,15 \cdot \tau_{обр} - 0,4125 \cdot K^2 + 4,625 \cdot K - 35,567.$$

Коэффициенты детерминации составили соответственно (R^2): 96,449; 98,948; 99,111.

Как следует из приведенных графических зависимостей основное влияние на прочность при изгибе и растяжении перпендикулярно к пласти (рисунок 3а-3б) оказывает продолжительность гидродинамической обработки корьевой пресс-массы. Концентрация массы на прочностные свойства плит оказывает значительно меньшее влияние, при этом существенно влияет на показатель разбухания плит по толщине (рисунок 3в). Все зависимости носят экстремальный характер.

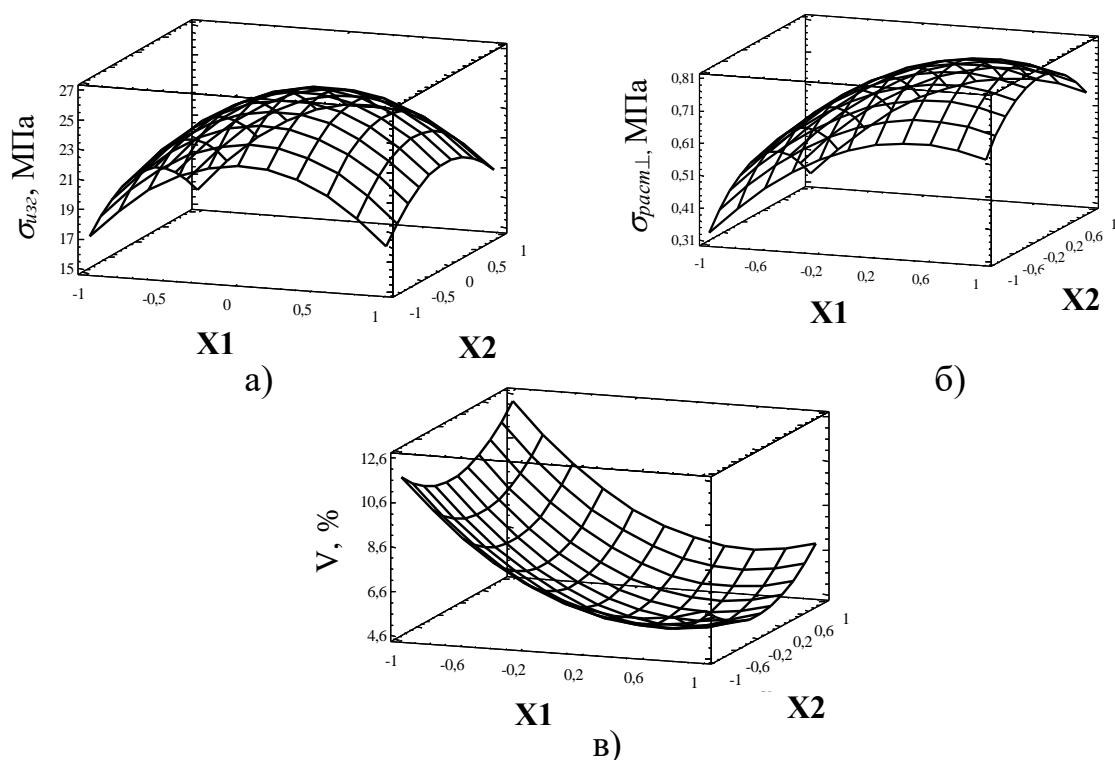


Рисунок 3 - Графические интерпретации уравнений регрессии при исследовании предела прочности при изгибе (а), при растяжении перпендикулярно к пласти (б), разбухания по толщине за 24 ч (в)

Определение оптимального режима гидродинамической обработки проводилось с использованием универсального математического программного продукта *MathCAD*. В качестве целевой функции принят показатель предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, $\sigma_{расм\perp}$. Выставлены следующие ограничения $V \leq 5\%$; $\sigma_{изг} \geq 25$ МПа; $6 \text{ мин} \leq \tau_{обр} \leq 10 \text{ мин}$; $4\% \leq K \leq 8\%$. В результате решения поставленной задачи оптимизации были определены оптимальные натуральные значения варьируемых факторов для

процесса гидродинамической обработки коревой массы: продолжительность обработки $\tau_{обр} = 8$ мин; концентрация пресс-массы $K = 6$ %.

Показатели физико-механических свойств коревых плит без связующих веществ, полученных при оптимальных условиях технологического процесса гидродинамической обработки, имели следующие значения: предел прочности при изгибе $\sigma_{изг} = 25,1$ МПа; предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти $\sigma_{раст\perp} = 0,78$ МПа; разбухание по толщине за 24 ч $V = 5$ %.

Глава 5. Влияние технологических параметров горячего прессования на физико-механические свойства плит без связующих. В пятой главе приведены результаты исследований по определению влияния температуры и удельной продолжительности прессования, влажности пресс-массы коры на физико-механические свойства плит.

При проведении эксперимента использовалась кора сосны, обработанная в гидродинамическом диспергаторе при параметрах, установленных в главе 4: продолжительность обработки – 8 мин, концентрация массы коры – 6 %.

Результаты реализации однофакторных экспериментов по определению влияния температуры и удельной продолжительности прессования, влажности пресс-массы коры на свойства плит (рисунок 4) позволили установить уровни варьирования данных параметров для проведения многофакторного эксперимента (таблица 3).

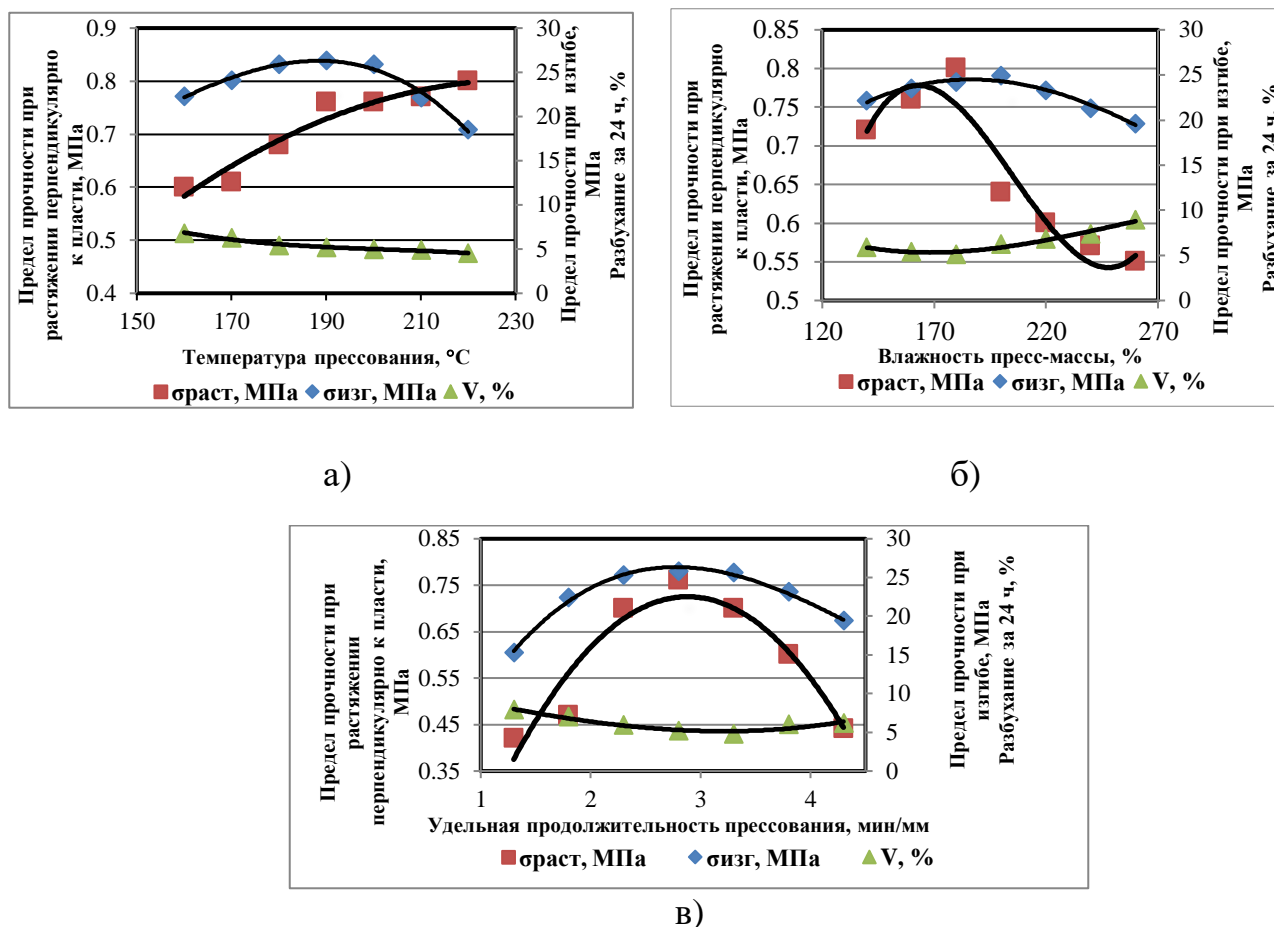


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, прочности при изгибе и разбухания за 24 ч от температуры прессования (а), влажности коревой пресс-массы (б), удельной продолжительности прессования (в)

Таблица 3 – Факторы и уровни варьирования

Наименование фактора	Обозначение	Шаг варьирования	Уровни		
			нижний (-1)	основной (0)	верхний (1)
Температура прессования, T , °С	X1	30	160	190	220
Влажность пресс-массы, W , %	X2	30	150	180	210
Удельная продолжительность прессования, τ , мин/мм	X3	0,8	2,0	2,8	3,6

Из представленных на рисунке 4 графических зависимостей прочности при изгибе, $\sigma_{изг}$, прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, $\sigma_{раст\perp}$, разбухания по толщине за 24 ч от температуры прессования плит без связующих, T , °С, видно, что увеличение температуры прессования (см. рисунок 4а) на всем принятом диапазоне варьирования от 160 до 220 °С приводит к улучшению показателя прочности при растяжении перпендикулярно к пласти и показателя разбухания плит по толщине. Прочность плит при растяжении перпендикулярно к пласти возрастает в диапазоне от 0,6 до 0,81 МПа, разбухание по толщине монотонно снижается от 7 до 4,5 %. При этом увеличение температуры прессования на величину более 200 °С приводит к снижению прочности плит при изгибе, что объясняется процессами термодеструкции и окисления поверхностных слоев корьевой плиты с образованием микротрещин.

Увеличение влажности корьевой пресс-массы (см. рисунок 4б) приводит к увеличению показателя прочности при изгибе и уменьшению показателя разбухания плит по толщине за 24 ч в диапазоне варьирования влажности пресс-массы от 140 до 200 %, дальнейшее увеличение влажности приводит к ухудшению данных показателей. Влияние влажности пресс-массы на показатель прочности при растяжении перпендикулярно к пласти имеет более сложный характер зависимости: при увеличении влажности пресс-массы от 140 до 180 % наблюдается увеличение прочности, при влажности более 200 % прочность при растяжении перпендикулярно к пласти имеет явно выраженную тенденцию к снижению. Такой характер изменения прочностных свойств материала можно объяснить отсутствием возможности отвода излишней влаги из центра плиты в процессе прессования ввиду высокой плотности укладки частиц коры и их повышенной водоудерживающей способности, обусловленной воздействием на них гидродинамических сил в процессе обработки в диспергаторе.

В диапазоне варьирования удельной продолжительности прессования (см. рисунок 4в) от 1,3 до 2,8 мин/мм показатели прочности при изгибе и растяжении перпендикулярно к пласти демонстрируют увеличение с последующим существенным снижением значений показателей прочности. Аналогичный, но обратно направленный и менее выраженный характер зависимости наблюдается для показателя разбухания по толщине плиты в зависимости от удельной продолжительности прессования.

В результате математической обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии, выражающие зависимости от режима прессования следующих показателей:

- предела прочности при изгибе

$$\sigma_{изг} = -225,973 + 2,011 \cdot T + 0,3174 \cdot W + 18,415 \cdot \tau - 0,005 \cdot T^2 - 0,001 \cdot W^2 - 3,723 \cdot \tau^2 - 0,0001 \cdot T \cdot W + 0,009 \cdot \tau \cdot T + 0,015 \cdot \tau \cdot W;$$

- предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти

$$\sigma_{раст\perp} = -3,708 + 0,007 \cdot T + 0,035 \cdot W + 0,223 \cdot \tau + 0,000001 \cdot T^2 - 0,00009 \cdot W^2 - 0,045 \cdot \tau^2 - 0,00002 \cdot T \cdot W - 0,0005 \cdot \tau \cdot T + 0,0009 \cdot \tau \cdot W;$$

- разбухания по толщине за 24 ч

$$V = 40,979 + 0,095 \cdot T - 0,307 \cdot W - 8,461 \cdot \tau - 0,0003 \cdot T^2 + 0,0008 \cdot W^2 + 0,816 \cdot \tau^2 - 0,00008 \cdot T \cdot W + 0,010 \cdot \tau \cdot T + 0,007 \cdot \tau \cdot W.$$

Коэффициенты детерминации составили соответственно (R^2): 99,840; 97,557; 95,201. Согласно представленным на рисунках 5-7 графическим интерпретациям уравнений регрессии наибольшее влияние на прочность плит при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно к пласти и разбухание по толщине за 24 ч оказывает температура прессования. Наименьшее влияние оказывает влажность корьевой пресс-массы. Зависимости прочностных свойств плит от температуры и удельной продолжительности прессования носят экстремальный характер. Увеличение температуры или удельной продолжительности прессования до достижения определенного предела приводит к увеличению прочности плиты, дальнейшее увеличение рассматриваемых параметров в обоих случаях приводит к деструкции материала в процессе прессования в связи с чрезмерно быстрым удалением влаги, которая необходима для размягчения компонентов коры, участвующих в структурообразовании материала: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы.

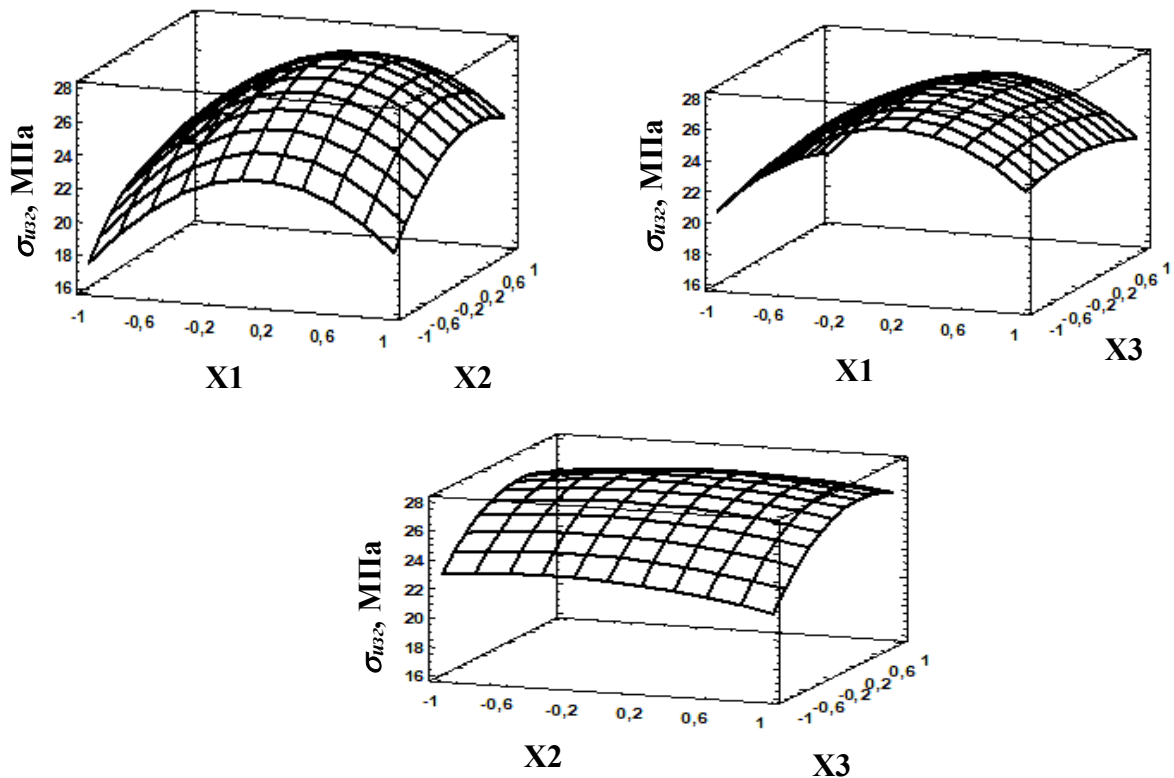


Рисунок 5 – Графическая интерпретация уравнения регрессии при исследовании предела прочности при изгибе от режима прессования

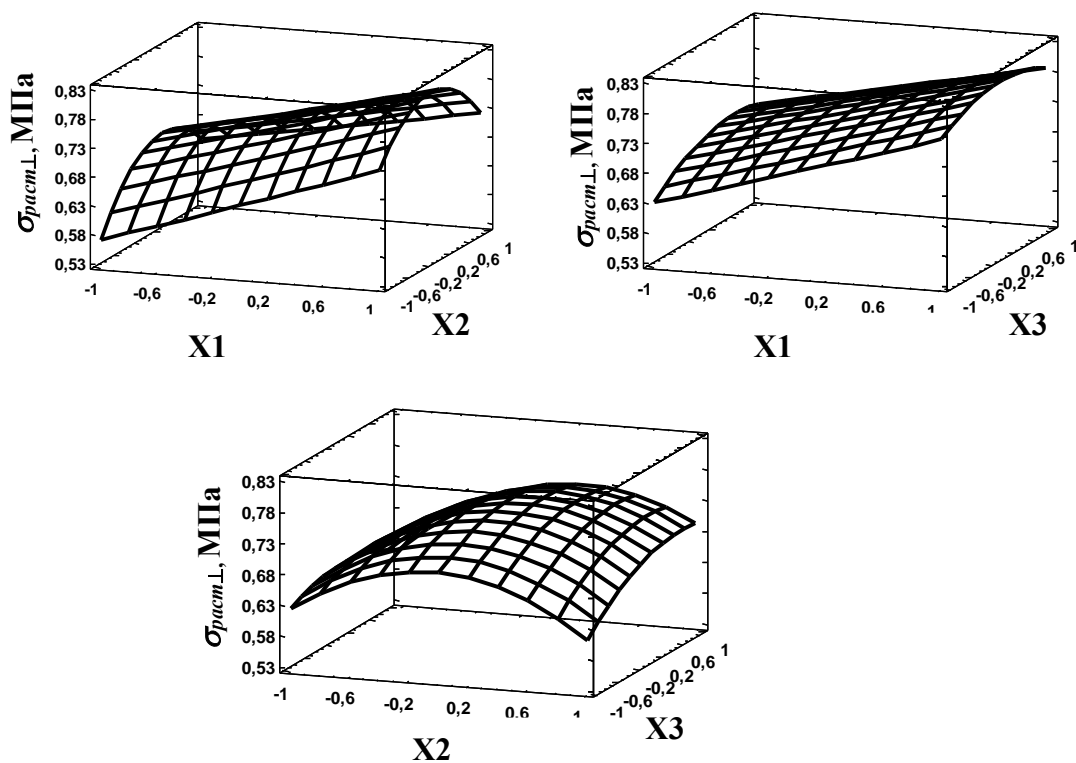


Рисунок 6 – Графическая интерпретация уравнения регрессии при исследовании предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти от режима прессования

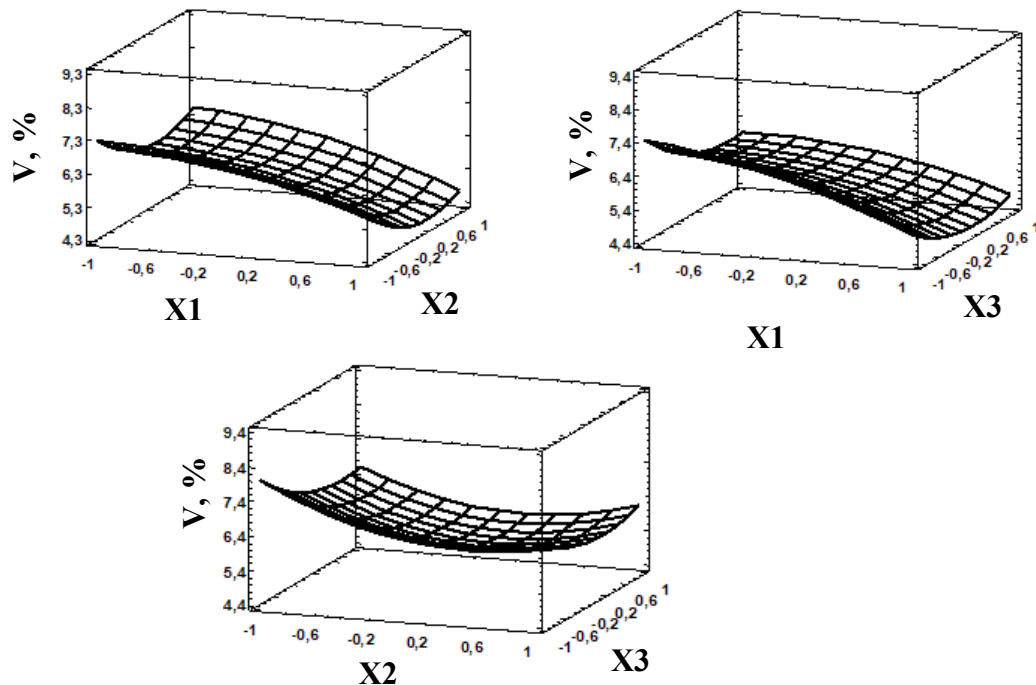


Рисунок 7 – Графическая интерпретация уравнения регрессии при исследовании показателя разбухания плит за 24 ч от режима прессования

При определении оптимального режима горячего прессования (с помощью программного продукта *MathCAD*) в качестве целевой функции принимался показатель прочности при изгибе, $\sigma_{изг.}$. Выставлены следующие ограничения:

$\sigma_{расм\perp} \geq 0,80$ МПа; $V \leq 4,5$ %; 160 °С $\leq T \leq 220$ °С; 150 % $\leq W \leq 210$ %; 2 мин/мм $\leq \tau \leq 3,6$ мин/мм. В результате были определены оптимальные натуральные значения варьируемых факторов для процесса горячего прессования плит из корьевой пресс-массы: температура прессования $T = 195$ °С; влажность пресс-массы $W = 190$ %; удельная продолжительность прессования $\tau = 3,0$ мин/мм.

Выходные параметры в случае использования результатов проведенной оптимизации принимают следующие аналитические значения: предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти $\sigma_{расм\perp} = 0,79$ МПа; предел прочности при изгибе $\sigma_{изг} = 27,3$ МПа; разбухание по толщине за 24 ч $V = 4,5$ %.

Показатели физико-механических свойств корьевых плит без связующих веществ, полученных при оптимальных условиях горячего прессования, имели следующие значения: предел прочности при изгибе $\sigma_{изг} = 26,8$ МПа; предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти $\sigma_{расм\perp} = 0,77$ МПа; разбухание по толщине за 24 ч $V = 4,7$ %.

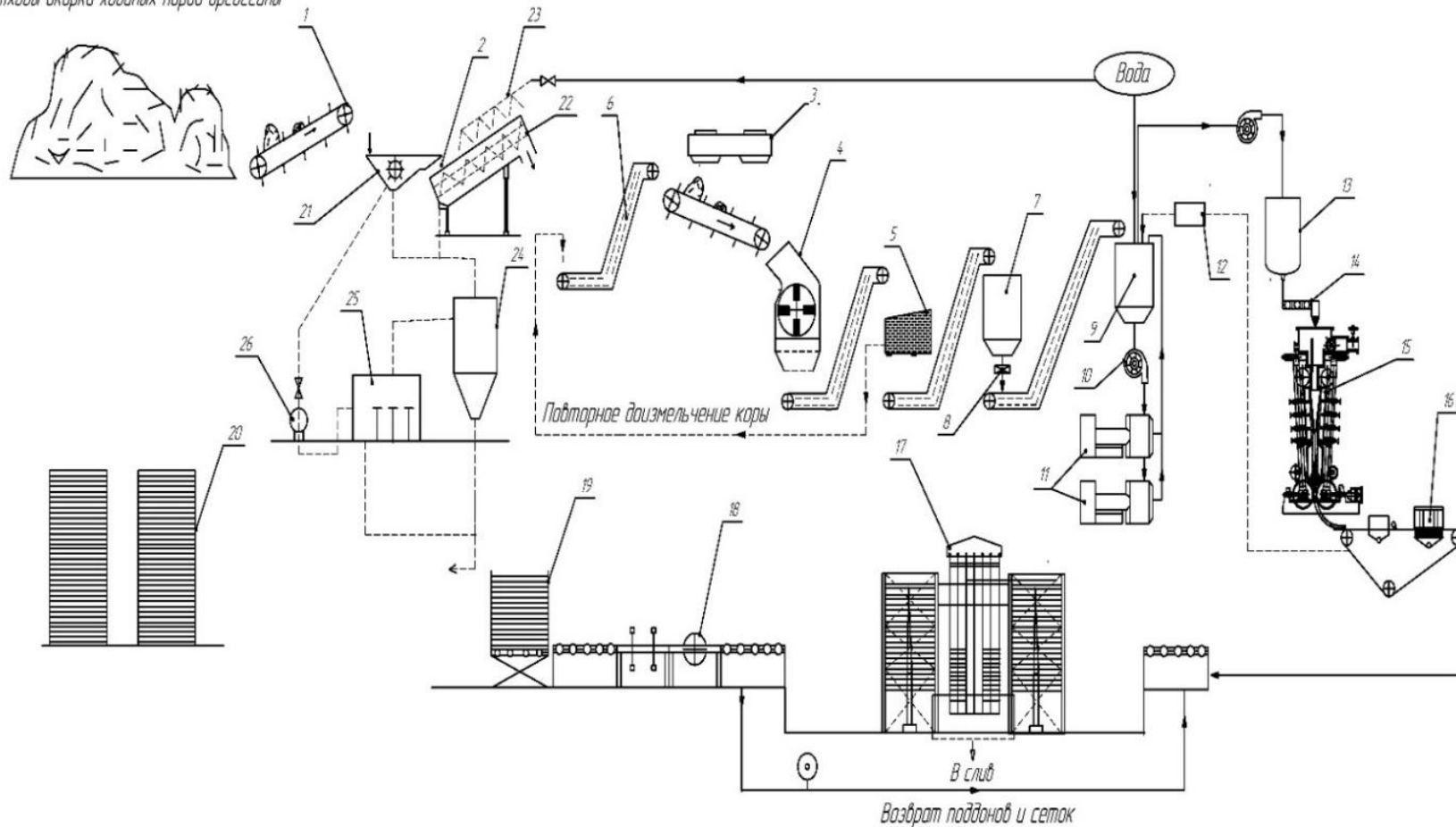
Глава 6. Технология производства плит без связующих из коры хвойных. В шестой главе разработана технологическая схема производства плит без связующих веществ из коры хвойных (рисунок 8) и проведен расчет основных технико-экономических показателей цеха по выпуску плит из коры хвойных: годовая производительность цеха 8184 м³, себестоимость 1 м³ плит $12,44$ тыс. руб.

Отходы коры хвойных пород скребковым конвейером (1) поступают на участок гидромойки коры (2). В ванну (21) непрерывно подаются отходы окорки, откуда с помощью установленного гребенчатого валика погружаются в воду. Ванна сообщается с наклонным лотком (22), над которым установлены спрыски (23) для промывания коры. Лоток оснащен винтовым конвейером для выгрузки коры. Загрязненная вода проходит через бак-отстойник (24), где удаленные с коры загрязнения отделяются от воды. Затем вода поступает в сборник оборотной воды и отстойник загрязнений (25), откуда очищенная вода насосом (26) подается в ванну (21). Промытая кора по ленточному конвейеру (6) через металлоуловитель (3) подается в мельницу молоткового типа (4). Измельчение древесной коры на молотковой мельнице производится до размеров фракции 5 мм/дно. Измельченная кора скребковым конвейером подается на участок механической сортировки (5), где происходит отделение частиц коры нужной фракции. Отсев после сортировки отправляется на повторное доизмельчение в мельницу (4). Просеянная кора поступает в бункер сырой коры (7).

Через дозирующее устройство (8) кора выгружается на ленточный транспортер и поступает в бункер смешивания с водой (9). В технологии предусмотрено использование водопроводной воды и воды из системы рециркуляции. Согласно проведенным исследованиям концентрация коры рекомендуется $6,0$ % по сухому веществу.

Из бункера центробежным насосом (10) пульпа по трубопроводу направляется в гидродинамический диспергатор (11). Полученная корьевая масса перекачивается центробежным насосом в бункер подачи пульпы (13).

Отходы окорки хвойных пород древесины



1 - скребковый конвейер; 2- гидромойка коры; 3 - металлоуловитель; 4 - молотковая мельница; 5 – вибросито; 6 - ленточный транспортер; 7 - бункер измельченной коры; 8 - дозирующее устройство; 9 - смесительный агрегат; 10 - центробежный насос; 11 - гидродинамический диспергатор; 12 - устройство возврата воды из системы рециркуляции; 13 - бункер подачи пульпы; 14 - шнековый дозатор; 15 - двухсеточная вертикальная отливная машина; 16 - холодный пресс; 17 - горячий пресс; 18 - форматно-обрезной станок; 19 - стопа готовых плит; 20 - хранение готовых плит; 21 – ванна гидромойки; 22 – наклонный лоток; 23 – спрыски; 24 – бак отстойник; 25 – сборник оборотной воды и загрязнений; 26 – насос.

Рисунок 8 – Технологическая схема производства плит из коры без связующих веществ

В бункере готовая масса перемешивается для сохранения однородности, так как при продолжительной выдержке без перемешивания корьевая масса расслаивается на воду и корьевые частицы.

Далее шнековым дозатором (14) масса подается в двухсеточную вертикальную отливную машину (15) для обезвоживания и формирования ковра. Преимуществами вертикального формирования ковра является получение симметричной структуры относительно срединной оси формирующей машины, сокращение длины зоны формирования за счет двухстороннего отвода воды, сокращение эксплуатационных затрат, совмещение операции формирования и предварительного прессования. Вода, удаленная из ковра, с помощью устройства возврата воды (12) возвращается в бункер смешивания (9).

Сформированный ковер поперечной пилой разрезается на пакеты и поступает для подпрессовки в холодный тактовый пресс (16) с удельным давлением от 1 до 2 МПа. Далее пакет укладывается на металлические сетку и поддон. На верхнюю пластъ пакета также помещается металлическая сетка и поддон. Затем пакеты подаются в загрузочную этажерку горячего пресса, которая осуществляет их загрузку в пресс (17).

Процесс горячего прессования проводится по следующим режимным параметрам: температура плит пресса 190 °С, влажность пресс-массы 190 %, удельная продолжительность прессования 3 мин/мм и удельное давление прессования на стадиях отжим/горячее прессование 2/4,4 МПа соответственно. По окончании процесса горячего прессования происходит выгрузка плит на разгрузочную этажерку и отделение плит от поддонов и сеток. Далее плиты направляются на форматную обрезку (18), укладываются в стопы (19) и отправляются на участок хранения готовых плит (20).

Разработанная технология позволяет получать плитные материалы без использования связующих веществ из крупнотоннажного отхода лесопромышленного комплекса – древесной коры. Это возможно благодаря использованию метода гидродинамической обработки коры для подготовки к прессованию. Ключевым достоинством разработанной технологии является возможность внедряемости технологических решений в существующее предприятие, генерирующее отходы окорки древесины, благодаря чему возможно снижение себестоимости продукции за счет использования отходов производства и сокращения затрат на транспортировку сырья.

Заключение

1. Экспериментально установлено, что при обработке коры сосны в гидродинамическом диспергаторе существенно изменяется фракционный состав пресс-массы коры с образованием большого количества мелкодисперсной фракции, вследствие воздействия на них гидродинамических и кавитационных сил и эффектов. Мелкодисперсная фракция с размером менее 20 мкм обеспечивает аутогезионное взаимодействие между частицами коры при формировании структуры плитного материала без связующих.

2. В ходе проведения многофакторного эксперимента изучены закономерности влияния параметров гидродинамической обработки коры сосны

на свойства плитных материалов без связующих веществ. Установленные оптимальные параметры гидродинамической обработки коры хвойных пород: продолжительность обработки – 8 мин; концентрация частиц коры 6 %.

3. Получены оптимальные параметры горячего прессования плит из гидродинамически обработанной коры сосны без связующих: температура прессования – 195 °С; влажность пресс-массы коры – 190 %; удельная продолжительность прессования – 2,9 мин/мм. Свойства плит без связующих из коры при разработанных параметрах горячего прессования составили: прочность при изгибе – 26,8 МПа; прочность при растяжении перпендикулярно к пласти – 0,77 МПа; плотность - 980 кг/м³; разбухание по толщине за 24 ч – 4,7 %.

4. Разработана технологическая схема производства плит без связующих основанная на предварительной подготовке коры к горячему прессованию в гидродинамическом диспергаторе.

5. Оценка технико-экономической эффективности производства плит из гидродинамически обработанной коры хвойных пород без связующих показала, что себестоимость 1 м³ плит из коры хвойных без связующих веществ составляет 12,44 тыс. руб., что существенно меньше стоимости представленных на рынке строительных материалов аналогов. С учетом розничной цены продажи равной 25000 руб./ м³, прибыль предприятия с учетом уплаты налога на прибыль, составляющего 25 %, составит 77086,8 тыс. руб.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

Статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий ВАК:

1. **Эскин, В. Д.** Конструкционные плиты из гидродинамически активированной коры сосны (*Pinus sylvestris*) без связующих веществ / В. Д. Эскин, В. Н. Ермолин, А. И. Криворотова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 5(401). – С. 175-187. – DOI 10.37482/0536-1036-2024-5-175-187.

2. **Эскин, В. Д.** Влияние мелкодисперсной фракции на основные свойства пресс-массы и плитного материала без связующих веществ из коры *Pinus sylvestris* / В. Д. Эскин, А. И. Криворотова, В. Н. Ермолин // Хвойные бореальной зоны. – 2025. – Т. 43, № 1. – С. 78-84. – DOI 10.53374/1993-0135-2025-1-78-84.

Патенты:

3. Патент № 2818825 С1 Российская Федерация, МПК В27N 3/04. Способ изготовления корьевой плиты : № 2024105657,; заявл. 05.03.2024; опубл. 06.05.2024 / **В. Д. Эскин**, А. И. Криворотова; заявитель ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Труды в прочих изданиях:

4. Плитные материалы на основе древесных отходов хвойных пород древесины / **В. Д. Эскин**, А. Ю. Лопатин, А. Е. Тюменцева [и др.] // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : сб. материалов по итогам Всерос.науч.-практ. конф., Красноярск, 21 октября 2022 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 197-200.

5. **Eskin, V. D.** Sheet materials without binders based on waste from the woodworking industry / **V. D. Eskin** // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации: сб. материалов XXII Всерос. науч. конф. с междунар. участием для бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 17 мая 2023 года. – Красноярск, 2023. – № 22. – С. 282-284.

6. Древесная кора как сырье для экологически чистых материалов / **В. Д. Эскин**, А. Ю. Лопатин, А. И. Криворотова [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов IX Междунар. научн.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики. В 3-х

томах, Красноярск, 10–14 апреля 2023 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 760-762.

7. Перспектива переработки древесной коры в композиционные материалы / **В. Д. Эскин**, А. Е. Тюменцева, А. Ю. Лопатин [и др.] // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины : сб. статей Всерос. научн.-практ. конф., Красноярск, 24 марта 2023 года / ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 28-31.

8. Исследование влияния породы древесины на разбухание корьевых плит без связующих / **В. Д. Эскин**, А. Ю. Лопатин, А. Е. Тюменцева [и др.] // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. материалов Всерос. научн.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием), Красноярск, 18–19 апреля 2024 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 251-253.

9. **Эскин, В. Д.** Исследование процесса переработки древесной коры методом механоактивации / **В. Д. Эскин**, А. Ю. Лопатин, А. Е. Тюменцева // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. материалов Всерос. научн.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (с междунар. участием), Красноярск, 20–21 апреля 2023 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 415-417.

10. Исследование характеристик плит без связующих веществ на основе коры / **В. Д. Эскин**, А. Ю. Лопатин, А. Е. Тюменцева [и др.] // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России : материалы XIX Всерос.(национальной) научн.-техн. конф. студентов и аспирантов, Екатеринбург, 03–13 апреля 2023 года. – Екатеринбург: ФГБОУ ВО «УГЛТУ», 2023. – С. 493-495.

11. **Эскин, В. Д.** Перспективные направления комплексной переработки древесных отходов хвойных пород / **В. Д. Эскин**, А. И. Криворотова // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VIII Всерос. научн.-техн. конф., Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО "СПбГЛТУ им. С.М. Кирова", 2023. – С. 716-719.

12. **Эскин, В. Д.** Сравнительный анализ свойств древесно-корьевых композитов / **В. Д. Эскин**, А. Ю. Лопатин, А. Е. Тюменцева // Решетневские чтения : материалы XXVII Междунар. научн.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 08–10 ноября 2023 года. – ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 865-867.

13. **Эскин, В. Д.** Влияние параметров процесса гидродинамической обработки коры на свойства плит без связующих веществ / **В. Д. Эскин**, А. И. Криворотова // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : материалы XXII Междунар. научн.-техн. конф., Вологда, 5 декабря 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2024. – С. 252-255.

14. Влияние продолжительности гидродинамической обработки коры на свойства получаемой пресс-массы / **В. Д. Эскин**, А. И. Криворотова, Р. Р. Литвин [и др.] // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы X Всерос. научн.-техн. конф., Санкт-Петербург, 21–23 мая 2025 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО "СПбГЛТУ им. С.М. Кирова", 2025. – С. 569-571.

Подписано в печать _____
*Формат 60*84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № _____*
Отпечатано в редакционно-издательском центре
СибГУ им. М.Ф. Решетнева
660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82
тел. (391)222-73-28