

на правах рукописи



КУЧЕР Сергей Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ УТИЛИЗАЦИИ
НИЗКОТОВАРНОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА НИЖНИХ
ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ СКЛАДАХ**

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности
05.21.01 – технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Санкт-Петербург
2019 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Научный руководитель – **Хитров Егор Германович**, кандидат технических наук

Официальные оппоненты – **Шадрин Анатолий Александрович**, доктор технических наук, профессор, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра технологии и оборудования лесопромышленного производства (ЛТ-4), профессор

Мануковский Андрей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра промышленного транспорта, строительства и геодезии, профессор

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Братский государственный университет**»

Защита диссертации состоится «16» мая 2019г. в __ 14 __ часов на заседании диссертационного Совета Д.212.220.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» (194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер. 5 – 1, зал заседаний диссертационного Совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета и на сайте spbftu.ru.

Автореферат разослан «_____» марта 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат технических наук



Хитров
Егор Германович

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Интенсивная заготовка пиловочного сырья привела к снижению запасов хвойной древесины в нашей стране. Происходит смена хвойных насаждений мягколиственными, скорость роста которых выше. Сокращается экономически доступная сырьевая база для производства пиломатериалов. В этой связи диверсификация производства приобретает особое значение для лесопромышленных предприятий.

Многие отечественные и зарубежные ученые посвятили свои труды совершенствованию технологических процессов предприятий лесопромышленного комплекса, в том числе – путем внедрения комплексной переработки древесного сырья. Среди исследователей особо следует отметить В.А. Баженова, С.М. Базарова, А.Р. Бирмана, С.П. Бойкова, С.Б. Васильева, Э.Ф. Герца, И.В. Григорьева, А.Н. Ерошкина, В.П. Кожина, И.В. Кречетова, О.А. Куницкую, А.Ю. Мануковского, А.И. Мигачева, М.С. Мовнина, В.И. Онегина, Н.А. Оснача, В.И. Пятякина, А.И. Расева, А.К. Редькина, П.Б. Рябухина, В.В. Сергеевичева, П.С. Серговского, В.И. Соколова, Б.Н. Уголева, Б.С. Чудинова, А.А. Шадрина, В.А. Шамаева, И.Р. Шегельмана, Ю.А. Ширнина, С.Б. Якимовича и др.

Были предложены перспективные способы получения продукции из мягколиственной древесины, модифицированной пропиткой различными импрегнатами и прессованием. При этом в случаях, когда производство продукции из модифицированной древесины нецелесообразно, древесина может использоваться как сырье для производства биотоплива. Для этого ее необходимо предварительно измельчить. Пропитка, прессование и измельчение относятся к важнейшим операциям, присутствующим в цикле переработки низкотоварной древесины на лесопромышленных складах.

Несмотря на теоретические и экспериментальные исследования, выполненные ранее, ряд вопросов проработан не в полной мере. Полагаем, что исследования, направленные на дальнейшее развитие и уточнение научного описания процессов, сопровождающих переработку низкотоварной древесины, актуальны для теории и практики лесопромышленного производства.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени накоплена обширная теоретическая и экспериментальная база по пропитке древесины. Для уточнения описания пропитываемости древесины требуются дальнейшие исследования, которые позволят в явном виде учесть силы, возникающие в капиллярах и порах при проникновении в них пропиточной жидкости. В области прессования теория строится на положениях, следующих из решения дифференциального уравнения реологии тела Бюргерса относительно деформации модели. Дальнейшее уточнение и развитие теории возможно за счет разработки математической модели прессования древесины, строящейся на зависимости напряжения от степени прессования. При этом в модели следует разделять мгновенные и длительные составляющие деформации. В ряде

технологических процессов происходит доизмельчение древесного сырья. В ходе анализа литературных источников обнаружено сравнительно мало сведений об энергоёмкости процесса измельчения цельной древесины.

Цель работы – получить комплекс научно-обоснованных результатов, уточняющих и развивающих представление об основных операциях переработки низкотоварной древесины.

Задачи исследования:

1. Разработать и исследовать уточнённую математическую модель прессования древесины строящуюся на зависимости напряжения от степени прессования при заданной скорости прессования и учитывающую различие мгновенных и длительные составляющих деформации.
2. Разработать и исследовать математическую модель процесса пропитки древесины с учетом сил, возникающих в капиллярах и порах при проникновении в них пропиточной жидкости.
3. Разработать и исследовать математическую модель измельчения древесины, прогнозирующую энергоёмкость операции доизмельчения.
4. Провести верификацию полученных результатов.
5. Разработать рекомендации по использованию полученных результатов в практике организации переработки низкотоварной древесины на нижних складах.

Объект исследования: низкотоварная древесина, перерабатываемая на лесопромышленных складах.

Предмет исследования: процессы пропитки, уплотнения и измельчения низкотоварной древесины.

Методология и методы исследования: на стадии теоретических исследований применялись методы математического моделирования, математического анализа, аналитического и численного решения дифференциальных уравнений; при проведении экспериментов использованы методы планирования эксперимента, статистической обработки опытных данных.

Научная новизна работы. Разработанные и исследованные математические модели процессов пропитки, уплотнения и измельчения низкотоварной древесины, отличающиеся от известных уточнённым учетом взаимосвязей характеристик сырья, параметров внешних силовых воздействий и характеристик продукции, позволяющие обоснованно подбирать параметры операций цикла переработки низкотоварной древесины.

Теоретическая значимость работы:

- предлагаемая математическая модель прессования, строящаяся на аналитическом решении дифференциального уравнения реологической модели тела Бюргерса относительно напряжения, развивает теорию прессования древесных материалов;

- разработанная математическая модель пропитки, базирующаяся на аналитическом решении уравнения движения фронта пропитки с учетом капиллярных сил, уточняет теорию пропитки древесины;
- выявленные взаимосвязи энергоемкости измельчения и пределов прочности древесины при перерезании поперек волокон дополняют научные представления об измельчении древесины.

Практическая значимость работы:

Результаты исследования позволяют на практике обоснованно подбирать параметры операций, включаемых в циклы переработки низкотоварной древесины, а именно:

- определить время прессования и среднюю скорость прессования в зависимости от требуемой плотности заготовок при регулировании напряжений, возникающих в них;
- определить положение фронта пропитки и время обработки заготовок в центробежном поле в зависимости от свойств древесины и импрегната, определяющих капиллярные силовые явления;
- определить оптимальную по критерию энергоёмкости влажность древесины, поступающей на доизмельчение.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Зависимости, полученные на базе решения дифференциального уравнения реологической модели тела Бюргерса, позволяющие рассчитать напряжение, возникающее при прессовании древесины с учетом реологических параметров материала, скорости прессования и относительной деформации заготовки.
2. Уравнения для расчета положения фронта пропитки, полученные в результате решения дифференциального уравнения движения фронта пропитки с разложением комплексной функции Ламберта в степенной ряд и экспериментальные значения коэффициента проницаемости древесины березы, осины и ольхи при пропитке.
3. Результаты экспериментов по доизмельчению низкотоварной древесины, устанавливающие коэффициент пропорциональности в уравнении работы измельчения, зависящий от предела прочности при перерезании поперек волокон.

Достоверность выводов и результатов исследований обеспечена применением лицензионного программного обеспечения на всех стадиях выполнения работы, удовлетворительной сходимостью полученных теоретических результатов с экспериментом и, в известных случаях, сведениями независимых источников.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались и обсуждались на VI Международном симпозиуме имени Б.Н. Уголева, посвященном 50-летию Регионального Координационного совета по

современным проблемам древесиноведения (Москва, 2018); научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета (Санкт-Петербург, 2017); Второй международной научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2017); Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия «Повышение эффективности лесного комплекса» (Петрозаводск, 2016).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 работах, включая 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 основных глав, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка, включающего 108 наименований, 3 приложений. Общий объем текста без приложений – 135 машинописных страниц. Основной текст работы содержит 46 рисунков и 23 таблицы. Объем тома с приложениями составляет 151 страницу, включая 46 рисунков и 37 таблиц.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследования на основании анализа литературных источников по проблематике исследований, разработке и реализации математических моделей на стадии теоретических исследований, составлении методики и проведении экспериментов, анализе их результатов и обработке опытных данных, формулировании общих выводов и рекомендаций по результатам проведенных исследований.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.21.01 – технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства:

3. Разработка операционных технологий и процессов в лесопромышленном и лесохозяйственном производствах: заготовительном, транспортном, складском, обрабатывающем, лесовосстановительном и др.

7. Разработка технологий и систем машин, обеспечивающих комплексное использование древесного сырья и отходов в технологических и энергетических целях.

8. Обоснование технологий и оборудования лесобработывающих производств на лесопромышленных и лесохозяйственных предприятиях.

СТРУКТУРА РАБОТЫ

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно мнению отечественных ученых, диверсификация производства за счет организации переработки низкотоварной древесины является перспективным направлением совершенствования лесоперерабатывающего производства.

В главе проанализированы научные сведения, относящиеся к трем важнейшим операциям переработки низкотоварной древесины на нижних складах – пропитке, прессованию и измельчению.

Показано, что дальнейшее уточнение и развитие теории прессования низкотоварной древесины возможно за счет разработки математической модели, строящейся на зависимости напряжения от степени прессования при заданной скорости прессования, при этом в модели следует разделять мгновенные и длительные составляющие деформации.

Анализ литературных источников показал, что дальнейшее совершенствование операции пропитки низкотоварной древесины требует разработки математических моделей, которые позволят в явном виде учесть силы, возникающие в капиллярах и порах при проникновении в них пропиточной жидкости.

В ходе анализа литературных источников встречено сравнительно мало сведений об измельчении низкотоварной древесины, что снижает эффективность операции на практике. Установлено, что развить научное описание измельчения низкотоварной древесины возможно на основе исследований связи энергоемкости измельчения и предела прочности при перерезании поперек волокон.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка уточненной математической модели прессования древесины. Для моделирования поведения древесины при прессовании использована реологическая модель тела Бюргера – схема на рисунке 1.

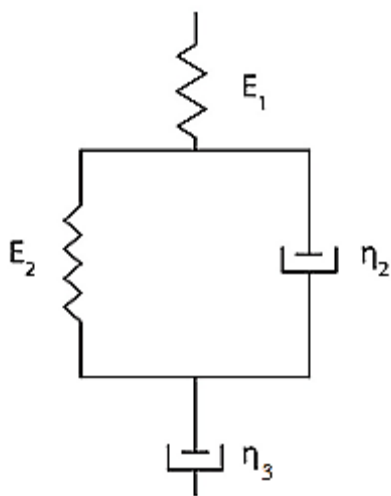


Рисунок 1 – Структурная схема реологической модели тела Бюргера

Модель состоит из четырех элементов. Первый из них, характеризующийся модулем E_1 , служит для учета деформаций, возникающих мгновенно после приложения нагрузки. Параллельные друг другу элементы с модулем E_2 и вязкостью η_2 отражают развитие вязких деформаций, которые развиваются во времени вплоть до некоторого предела, а элемент с вязкостью η_3 служит для учета необратимых деформаций при длительном воздействии.

Дифференциальное уравнение связи напряжения и деформации модели:

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{E_1\eta_2 + E_1\eta_3 + E_2\eta_3}{\eta_2\eta_3} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1E_2}{\eta_2\eta_3} \sigma = E_1 \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \frac{E_1E_2}{\eta_2} \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

где ε – относительная деформация заготовки в направлении силового воздействия, σ – нормальное напряжение, t – время.

Исследуем решение уравнения (1) при постоянной скорости прессования, относительную деформацию заготовки в этом случае определим по формуле:

$$\varepsilon = Vt, \quad (2)$$

где V – скорость прессования.

Уравнение (1) примет вид:

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{E_1\eta_2 + E_1\eta_3 + E_2\eta_3}{\eta_2\eta_3} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1E_2}{\eta_2\eta_3} \sigma = \frac{E_1E_2}{\eta_2} V. \quad (3)$$

Начальные условия к решению уравнения (3) следующие:

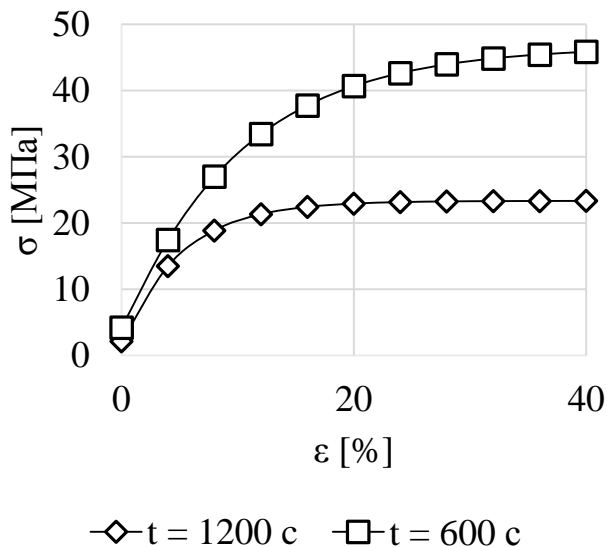
$$\sigma(0) = V \frac{\eta_2\eta_3}{\eta_2 + \eta_3}, \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma(0)}{dt} = 0. \quad (5)$$

Расчетным путем установлено, что рядом членов аналитического решения уравнения (3) можно пренебречь и представить его формулой:

$$\sigma = V\eta_3 \left(1 - \exp \left\{ \frac{-(E_1\eta_2 + E_1\eta_3 + E_2\eta_3) + \sqrt{(E_1\eta_2 + E_1\eta_3 + E_2\eta_3)^2 - 4E_1E_2\eta_2\eta_3}}{2\eta_2\eta_3} t \right\} \right). \quad (6)$$

На рисунке 1 показан график функции (6). Значения параметров $E_1 = 0,7$ ГПа, $E_2 = 1,4$ ГПа, $\eta_2 = 5,5$ ГПа·с, $\eta_3 = 55$ ГПа·с, $V = 1/600$ с⁻¹, $1/150$ с⁻¹ (прессование на 40 % за 10 и 20 минут).



Технология модифицирования древесины подразумевает поэтапное прессование, то есть чередование нагрузки и выдержки под давлением, при котором происходит релаксация внутренних напряжений в древесине. Такой характер прессования необходим во избежание образования трещин и разрушения заготовки и наблюдается он на участке, где связь напряжения и относительной деформации пропорциональна и близка к линейной.

Рисунок 2 – Взаимосвязь деформаций и напряжения по времени при постоянной скорости прессования, относительная деформация заготовки 40 %

В результате вычислительного эксперимента установлено, что зависимость «напряжение-деформация» на этапе прессования, интересующем нас с технологической точки зрения, достаточно точно описывается формулой:

$$\sigma = \varepsilon \sqrt{\frac{E_1 \eta_2 V}{2}}. \quad (7)$$

Заметим, что уравнение (7), в отличие известных ранее, позволяет учесть не только упругое, но и вязкое сопротивление прессованию заготовки, а также скорость прессования.

Далее рассмотрен вопрос релаксации напряжений после остановки плит пресса. В этом случае для деформации запишем:

$$\varepsilon = \text{const} = \varepsilon_k, \quad (8)$$

где ε_k – конечная степень прессования.

С учетом (8), получим из уравнения (1):

$$\frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{E_1 \eta_2 + E_1 \eta_3 + E_2 \eta_3}{\eta_2 \eta_3} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2 \eta_3} \sigma = 0. \quad (9)$$

Начальные условия к решению уравнения (9) представлены формулами:

$$\sigma(0) = \sigma_0 \approx \varepsilon_k \sqrt{\frac{E_1 \eta_2 V}{2}}, \quad (10)$$

$$\frac{d\sigma(0)}{dt} = 0. \quad (11)$$

Решение уравнения (9) при условиях (10), (11) следующее:

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left\{ \frac{-(E_1 \eta_2 + E_1 \eta_3 + E_2 \eta_3) + \sqrt{(E_1 \eta_2 + E_1 \eta_3 + E_2 \eta_3)^2 - 4E_1 E_2 \eta_2 \eta_3}}{2\eta_2 \eta_3} t \right\}. \quad (12)$$

Решив уравнение (12) относительно времени t , получим время прессования T , за которое напряжение достигнет заданного предела $[\sigma_1]$:

$$T_1 = X \ln \left(\frac{\eta_3 V - [\sigma_1]}{\eta_3 V} \right), \quad (13)$$

$$\text{где } X = \frac{2\eta_2 \eta_3}{-(E_1 \eta_2 + E_1 \eta_3 + E_2 \eta_3) + \sqrt{(E_1 \eta_2 + E_1 \eta_3 + E_2 \eta_3)^2 - 4E_1 E_2 \eta_2 \eta_3}}.$$

Уравнение (12), с учетом формулы (13), позволяет рассчитать время, за которое напряжения снизятся на заданную величину по отношению к напряжениям, действовавшим в древесине во время прессования, и достигнет требуемого значения $[\sigma_2]$:

$$T_2 = X \ln \left(\frac{[\sigma_2]}{[\sigma_1]} \right). \quad (14)$$

Среднюю скорость процесса прессования, определяющуюся скоростью плиты пресса, временем непосредственно прессования и временем выдержки при постоянной деформации определим по формуле:

$$\bar{V} = \frac{\varepsilon}{T_1 + T_2} = \frac{VT_1}{T_1 + T_2} = V \frac{\ln\left(\frac{\eta_3 V - [\sigma_1]}{\eta_3 V}\right)}{\ln\left(\frac{\eta_3 V - [\sigma_1]}{\eta_3 V}\right) + \ln\left(\frac{[\sigma_2]}{[\sigma_1]}\right)}. \quad (15)$$

Разработка уточненной математической модели пропитки древесины.

За основу при составлении математической модели примем схему, представленную на рисунке 3.

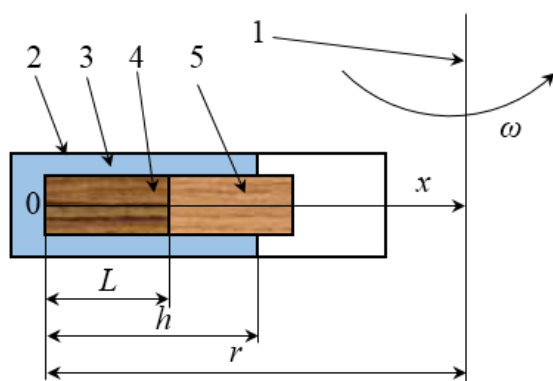


Рисунок 3 – Общая схема к составлению математической модели пропитки древесины на центрифуге: 1 – ось вращения платформы центрифуги (платформа условно не показана), 2 – пропиточная емкость, 3 – пропиточная жидкость, 4 – пропитанная зона заготовки, 5 – не пропитанная древесина

Дифференциальное уравнение положения фронта пропитки представим формулой:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\mu} \frac{1}{L} \left\{ \frac{1}{2} \omega^2 \rho (h - L)(2r - h - L) + \frac{2\sigma_k}{r_k} \right\}, \quad (16)$$

где k – коэффициент проницаемости древесины, L – положение фронта пропитки, μ – вязкость импрегната, ρ – плотность импрегната, h – глубина погружения заготовки, σ – параметр, характеризующий поверхностное натяжение импрегната, r_k – условный радиус капилляра.

При этом длина пропитанной зоны определяется по формуле:

$$L = \int_0^t \frac{dx}{dt} dt, \quad (17)$$

таким образом:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dx}{dt}. \quad (18)$$

Введем обозначения:

$$a = -\frac{k}{\mu} \left(h^2 \omega^2 \rho - h \omega^2 \rho r - \frac{2\sigma_k}{r_k} \right), \quad (19)$$

$$b = \frac{k}{\mu} \omega^2 \rho r, \quad (20)$$

$$c = \frac{k}{\mu} \frac{\omega^2 \rho}{2}. \quad (21)$$

и перепишем уравнение (16) следующим образом:

$$\frac{dL}{dt} = a \frac{1}{L} - b + cL. \quad (22)$$

Как показывают расчеты, можно принять без существенной потери точности:

$$a \frac{1}{L} - b + cL \approx a \frac{1}{L} - b, \quad (23)$$

при начальных условиях:

$$L(0) = 0. \quad (24)$$

При допущении (23) получим решение уравнения (22) в виде разложения комплексной функции Ламберта LambertW в ряд:

$$L = \frac{a}{b} \left\{ \text{LambertW} \left(- \frac{\exp(-1)}{\exp\left(\frac{b^2}{a} t\right)} \right) + 1 \right\} \approx -1 + \sqrt{\frac{2b^2}{a} t^{\frac{1}{2}}} - \frac{2b^2}{3a} t + \sqrt{\frac{b^6}{162a^3} t^{\frac{3}{2}}}. \quad (25)$$

Уравнение (25) используем при экспериментальном определении коэффициентов проницаемости.

Теоретические предпосылки к разработке математической модели доизмельчения древесины. Согласно результатам предыдущих исследований, удельная энергоемкость измельчения древесных материалов определяется уравнением (на примере отходов окорки хвойной древесины):

$$Q = K_K \ln i = 1,43W^{-0,33} \ln i, \quad (26)$$

где W – влажность сырья, i – степень измельчения.

Ранее было получено уравнение связи влажности и предела прочности коры хвойных пород древесины при перерезании поперек волокон в тангенциальном направлении τ [МПа]:

$$\tau = 26,331W^{-0,359}. \quad (27)$$

Сопоставляя предел прочности τ и коэффициент пропорциональности K_K в уравнении (26), приходим к выводу о наличии их близкой, практически функциональной связи, коэффициент пропорциональности можно выразить линейной функцией:

$$K_K = 0,0596\tau. \quad (28)$$

Если предположить, что зависимость коэффициента пропорциональности от прочности при перерезании сохраняется и у древесины, то можем сделать прогноз об энергоемкости доизмельчения кусковых древесных отходов.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика экспериментальных исследований прессования древесины. Целью опытов являлось определение зависимости напряжения σ в исследуемой заготовке в период прессования и выдержки под давлением. Напряжение принимали равным давлению прессования.

Опыты по исследованию прессования древесины поперек волокон при заданной скорости прессования проводились с использованием гидравлического пресса фирмы RUF на предприятии «Завод Эко Технологий». Система управления прессом позволяет точно регулировать скорость надвигания плиты пресса V_n , а электронная измерительная аппаратура – фиксировать давление прессования P .

Исследовано прессование заготовок древесины березы и осины. Для каждой породы древесины проведено по 4 опыта с пятью повторениями в каждом.

К управляемым параметрам отнесены скорость плиты пресса на стадии прессования V_n и время прессования T . Время выдержки под давлением при неподвижной плите пресса принято равным времени прессования. План эксперимента представлен в таблице 2.

Таблица 2 – План эксперимента по прессованию древесины березы и осины

Номер опыта	Управляемые параметры		Примечание
	V_n , мм/с	T , с	
1	0,042	120	$\varepsilon_k = 0,05$
2	0,084	120	$\varepsilon_k = 0,10$
3	0,042	240	$\varepsilon_k = 0,10$
4	0,084	240	$\varepsilon_k = 0,20$

Давление прессования фиксировали через равные промежутки времени, равные 20 секундам в опытах №1 и №2 и 40 секундам в опытах №3 и №4.

В качестве начальных точек для поиска значений параметров функций (6), (12) E_1 , E_2 , η_1 , η_2 принимали значения реологических параметров, полученных в работах проф. Шамаева при прессовании древесины при постоянном давлении прессования.

Методика экспериментальных исследований пропитки древесины. Целью опытов являлась проверка теоретического уравнения для определения положения фронта пропитки (25) и определение коэффициентов проницаемости при пропитке древесины березы, осины и ольхи.

Опыты по пропитке древесины были выполнены в 2015 году с использованием центрифуги на кафедре технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

Образцы древесины размером 20x20x350 мм размещали в пропиточных емкостях, наполненных импрегнатом, расположенных на платформе центрифуги. После выхода скорости вращения платформы на стационарный режим время обработки образцов варьировалось в пределах от 30 до 600 с. После остановки платформы образцы извлекали из емкостей и раскалывали, положение фронта пропитки L относительно торца образца, находившегося в жидкости, определяли линейкой. Исследовано по 30 образцов каждой породы древесины.

Параметры процесса пропитки: $r_k = 2,4 \cdot 10^{-6}$ м, $\sigma_k = 0,02$ Н/м (согласно исследованиям проф. Пятакина), $h = 0,3$ м, $\rho = 1000$ кг/м³, $r = 0,5$ м, $\mu = 0,002$ Па·с, $\omega = 50$ с⁻¹, 100 с⁻¹, 150 с⁻¹.

Методика экспериментальных исследований измельчения древесины. Эксперименты по изучению энергоемкости измельчения кусковых отходов древесины проведены на предприятии «Завод Эко Технологий» с использованием промышленного измельчителя Erdwich M600/1-400.

Цель экспериментальных исследований – установить закономерность для оценки затрат энергии, требующейся для измельчения древесины в зависимости от степени измельчения i и их относительной влажности W .

Опыты проводились с кусковыми отходами древесины березы, ольхи и осины. Число наблюдений в опытах варьировалось в пределах 15 – 30, что было обусловлено различным доступным количеством экспериментального материала.

Для экспериментального материала проводилась предварительная сепарация на установке АЛГМ-3. Отбирали навески массой 5 кг, отобранные пробы отдельно измельчали в экспериментальной установке

Во время работы измельчителя данные о потребляемой силе тока фиксировались. Работу A , совершенную во время измельчения материала, рассчитывали по графикам потребляемой силы тока при известном напряжении в сети (380 В) в программе MS-Excel 2013.

После измельчения средняя крупность обработанной пробы определялась при помощи лабораторного сепаратора, для этого отбирали 3 навески экспериментального материала массой 0,1 кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты экспериментальных исследований прессования древесины. Установлено, что модули E_1 , E_2 и параметры вязкости η_2 , η_3 не зависят от скорости прессования и относительной деформации заготовки. В таблице 3 представлены средние значения параметров.

Эксперименты по уплотнению древесины березы и осины подтвердили теоретические разработки: расхождения расчетных и экспериментальных значений напряжения при прессовании не превышают 10 %. Пример результатов сопоставления экспериментальных значений напряжения с расчетными по формулам (6), (12) представлен на рисунке 4.

Таблица 3 – Параметры реологических моделей по результатам опытов

Параметр	Береза			Осина		
	Среднее	S	Δ	Среднее	S	Δ
E_1 , ГПа	1,12	0,0698	0,15	0,56	0,0317	0,07
E_2 , ГПа	2,21	0,1025	0,21	1,13	0,0745	0,16
η_2 , ГПа·с	11,24	0,6407	1,34	5,35	0,2639	0,55
η_3 , ГПа·с	112,58	6,0325	12,63	54,65	3,5014	7,33

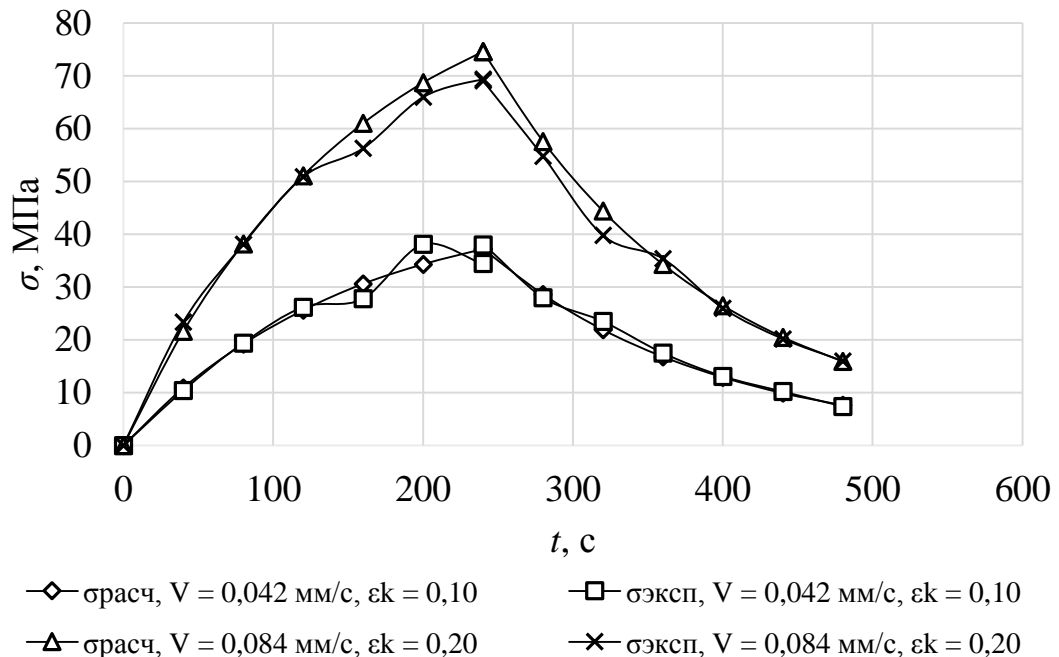


Рисунок 4 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения при прессовании древесины березы (время прессования 4 мин., время выдержки 4 мин.)

Результаты экспериментальных исследований пропитки древесины. Расчетные значения коэффициентов проницаемости, полученные по экспериментальным данным, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Статистические данные по результатам экспериментального определения коэффициента фильтрации при пропитке древесины березы, осины и ольхи

Порода древесины	$k \cdot 10^{13}$, м ²	$S \cdot 10^{13}$, м ²	$\Delta \cdot 10^{13}$, м ²
Береза	1,303	0,0684	0,140
Осина	1,392	0,0939	0,192
Ольха	1,348	0,0817	0,167

Анализ данных показал, что экспериментальные значения коэффициента проницаемости k при пропитке древесины березы, осины и ольхи не зависят от

угловой скорости платформы центрифуги ω и времени пропитки t , что говорит в пользу корректности предложенной теоретической модели пропитки (25).

Как показывает сопоставление экспериментальных и расчетных данных, полученных при использовании уравнения (25) с коэффициентами фильтрации по таблице 4, опытные значения отличаются от теоретических на величины, обусловленные варьированием коэффициента фильтрации в пределах доверительных интервалов, обусловленных вариацией экспериментальных данных.

Пример сопоставления результатов экспериментов с расчетными данными, полученными при использовании предложенного нами теоретического уравнения (25) представлен на рисунке 5.

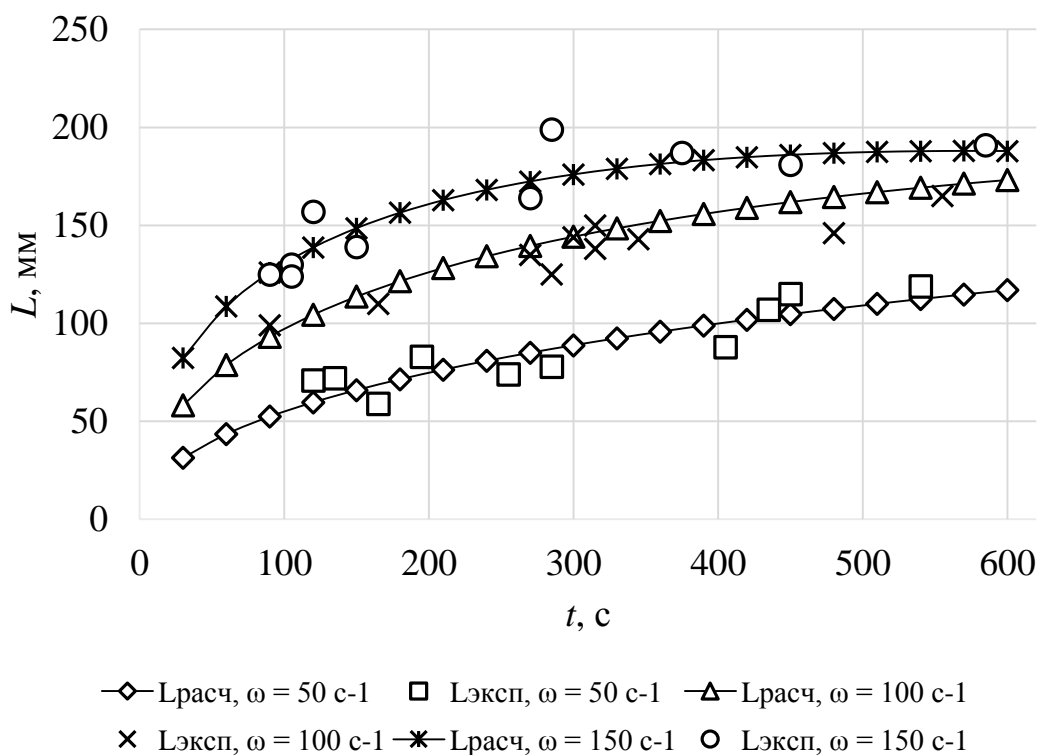


Рисунок 5 – Сопоставление теоретических значений положения фронта пропитки с экспериментальными данными по пропитке древесины березы

Дополнительно отметим, что уравнение (25) и коэффициенты фильтрации в таблице 4 получены с учетом действия капиллярных сил в древесине. По этой причине на их базе в дальнейшем станет возможным прогнозировать и исследовать процесс пропитки древесины жидкостями с высокими значениями параметров поверхностного натяжения, такими как, например, расплавленные парафины.

Результаты экспериментальных исследований дробления древесины. Обработка опытов по измельчению кусковых отходов древесины березы, ольхи и осины подтвердила, что закон измельчения выражается уравнением со структурой формулы (26):

$$Q = K_K \ln i = a_1 W^{a_2} \ln i. \quad (29)$$

Значения коэффициентов уравнения (29) для трех исследованных пород древесины представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты уравнение энергоемкости измельчения кусковых отходов древесины березы, ели и сосны

Порода древесины	a_1		a_2	
	оценка	Δ	оценка	Δ
Береза	8,38	1,11	-0,79	0,08
Ольха	1,98	0,34	-0,47	0,073
Осина	2,94	0,51	-0,57	0,045

Сопоставление расчетных значений пределов прочности древесины при перерезании поперек волокон в тангенциальном направлении с экспериментальными значениями коэффициентов пропорциональности уравнения (29) показало, что коэффициент K_K связан с пределом прочности τ линейной зависимостью:

$$K_K = 0,0239\tau, \quad (30)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$.

Результаты сопоставления представлены на графике на рисунке 6.

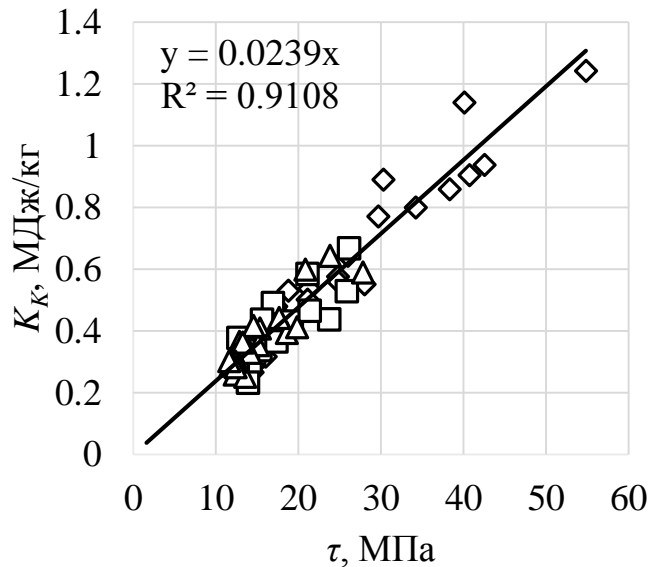


Рисунок 6 – Сопоставление расчетных значений пределов прочности древесины березы, ольхи и осины при перерезании поперек волокон в тангенциальном направлении и экспериментальных значений коэффициента пропорциональности в законе измельчения

Исследован вопрос определения оптимальной влажности кусковых отходов древесины, подлежащих измельчению. Определим теплоту сгорания сухого вещества древесины, содержащейся в измельчаемом сырье:

$$Q_{\text{сух}} = \frac{100 - W}{100} \cdot Q_{\text{сд}}, \quad (31)$$

где $Q_{\text{сд}}$ – массовая теплотворная способность абсолютно сухой древесины.

Далее определим минимум функции:

$$\frac{Q}{Q_{\text{сух}}} \rightarrow \min, \quad (32)$$

представляющей собой «энергетическую себестоимость» измельчения кусковых отходов.

Функция (32) получает минимум при влажности, определяемой соотношением:

$$W = \frac{100a_2}{1 - a_2}. \quad (33)$$

Расчет по формуле (33) при значениях коэффициента a_2 по таблице 5 приводит к следующим значениям оптимальной влажности кусковых отходов по критерию «энергетической себестоимости»: для березы $W = 44 \%$, для ольхи $W = 32 \%$, для осины $W = 36 \%$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате выполненного исследования установлено:

1. За основу математической модели напряженно-деформированного состояния древесины при прессовании принято реологическое уравнение четырехэлементного тела Бюргера (1). Исследование аналитического решения уравнения (1) при постоянной скорости прессования показало, что зависимость напряжения от относительной деформации заготовки при постоянной скорости прессования имеет вид экспоненциальной функции (6). Исследование решения уравнения (1) при постоянной деформации показало, что релаксация напряжений описывается экспоненциальной функцией (12).
2. Опытные значения параметров реологической модели древесины березы и осины, доверительные интервалы их изменения представлены в таблице 3. Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 10 %, таким образом, следует признать удовлетворительную сходимость результатов, получаемых по теоретическим формулам (6), (12) с экспериментом.
3. На основе функции (12) получено уравнение, позволяющее рассчитать время, за которое напряжения снизятся на заданную величину по отношению к напряжениям, действовавшим в древесине во время прессования, представленное формулой (14). Средняя скорость процесса прессования, определяющуюся скоростью плиты пресса, временем прессования и временем выдержки при постоянной деформации определяется по формуле (15).

4. Дифференциальное уравнение для определения положения фронта пропитки в отпряженный момент времени представлено формулой (16). Математическая модель учитывает параметры процесса пропитки, относящиеся к избыточному давлению импрегната в поле центробежных сил, а также капиллярное давление в древесине, возникающее в следствии действия сил поверхностного натяжения.
5. Исследование уравнения (16) позволило получить его приближенное решение в виде разложения комплексной функции Ламберта параметров процесса пропитки в степенной ряд относительно времени – уравнение (25) со вспомогательными обозначениями по формулам (19), (20). Решение (25) практически точно повторяет численное решение уравнения (16).
6. Расчетные значения коэффициентов проницаемости, полученные по экспериментальным данным, представлены в таблице 4. Как показывает сопоставление экспериментальных и расчетных данных, полученных при использовании уравнения (25) с коэффициентами фильтрации по таблице 4, опытные значения отличаются от теоретических на величины, обусловленные варьированием коэффициента фильтрации в пределах доверительных интервалов, обусловленных вариацией экспериментальных данных.
7. Уравнение (25) и коэффициенты фильтрации в таблице 4 получены с учетом действия капиллярных сил в древесине, по этой причине на их базе в дальнейшем станет возможным прогнозировать и исследовать процесс пропитки древесины жидкостями с высокими значениями параметров поверхностного натяжениями, такими как, например, расплавленные парафины.
8. Обработка опытов по измельчению кусковых отходов древесины березы, ольхи и осины подтвердила, что закон измельчения выражается уравнением, в котором коэффициент пропорциональности зависит от влажности измельчаемого сырья в виде формулы (29), значения коэффициентов уравнения (29) для трех исследованных пород древесины представлены в таблице 5.
9. Сопоставление расчетных значений пределов прочности древесины при перерезании поперек волокон в тангенциальном направлении с экспериментальными значениями коэффициентов пропорциональности уравнения (29) показало, что коэффициент пропорциональности связан с пределом прочности линейной зависимостью (30) с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$.
10. Значения оптимальной влажности кусковых отходов, подлежащих измельчению, по критерию «энергетической себестоимости» следующие: для березы $W = 44 \%$, для ольхи $W = 32 \%$, для осины $W = 36 \%$.

**Основное содержание диссертации опубликовано в
следующих печатных работах:**

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кучер, С.В. Уточненная модель процесса центробежной пропитки древесины [Текст] / С.В. Кучер, Г.В. Григорьев, В.А. Иванов // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 121-124.
2. Бастриков, Д.В. Исследование энергоемкости измельчения отходов окорки установкой с ножевым рабочим органом [Текст] / Д.В. Бастриков, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 1 (29). С. 120-128.
3. Бастриков, Д.В. Экспериментальные исследования энергоемкости дробления отходов окорки сосны [Текст] / Д.В. Бастриков, Ю.Н. Власов, Д.А. Ильюшенко, С.В. Кучер // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. № 219. С. 193-205.
4. Чибирев, О.В. Оценка упругих свойств конгломерата древесных частиц [Текст] / О.В. Чибирев, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер, О.А. Куницкая // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 140-146.
5. Бастриков, Д.В. Экспериментальные исследования энергоемкости дробления отходов окорки ели [Текст] / Д.В. Бастриков, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер, Д.Е. Куницкая // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 81-90.

В прочих изданиях:

6. Кучер, С.В. Разработка уточненной математической модели прессования древесины [Текст] / С.В. Кучер, Е.Г. Хитров, В.А. Соколова // В сборнике: СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ДРЕВЕСИНЫ - 2018 Материалы VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам лесоведения. 2018. С. 130-133.
7. Кучер, С.В. Реологическая модель древесины при затухающих необратимых деформациях [Текст] / С.В. Кучер, А.В. Теппоев, А.В. Чураков // В сборнике: Научно-техническая конференция института технологических машин и транспорта леса Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета по итогам научно-исследовательских работ 2017 года Сборник статей по материалам научно-технической конференции. Ответственный редактор В.А. Соколова. 2018. С. 6-13.
8. Бастриков, Д.В. Оборудование для измельчения древесных отходов [Текст] / Д.В. Бастриков, В.А. Кацадзе, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер // В сборнике: Леса России: политика, промышленность, наука, образование Материалы Второй международной научно-технической конференции. 2017. С. 11-13.
9. Бастриков, Д.В. Математические выражения для оценки работы измельчения коры [Текст] / Д.В. Бастриков, В.А. Кацадзе, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер // В сборнике: Леса России: политика, промышленность, наука, образование Материалы Второй международной научно-технической конференции. 2017. С. 13-16.
10. Чибирев, О.В. Топливные брикеты из отходов лесопереработки [Текст] / О.В. Чибирев, В.А. Кацадзе, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер // В сборнике: Леса России:

- политика, промышленность, наука, образование Материалы Второй международной научно-технической конференции. 2017. С. 46-48.
11. Чибирев, О.В. Современное прессовое оборудование для брикетирования древесных отходов [Текст] / О.В. Чибирев, В.А. Кацадзе, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер // В сборнике: Леса России: политика, промышленность, наука, образование Материалы Второй международной научно-технической конференции. 2017. С. 48-51.
 12. Ильюшенко, Д.А. Динамические нагрузки при уплотнении древесных материалов [Текст] / Д.А. Ильюшенко, Ю.Н. Власов, С.В. Кучер // В сборнике: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. 2016. С. 112-114.
 13. Власов, Ю.Н. Устройство для повышения энергоэффективности раскряжевки [Текст] / Ю.Н. Власов, Д.А. Ильюшенко, С.В. Кучер // В сборнике: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. 2016. С. 43-45.
 14. Жданович, В.Е. Перспективы дальнейших исследований пиления древесины [Текст] / В.Е. Жданович, С.В. Кучер // В сборнике: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. 2016. С. 91-92.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., 5 с пометкой «В диссертационный совет Д212.220.03»