

на правах рукописи



ГОНЧАРОВ Юрий Александрович

**ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИМПРЕГНАТА НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ В ПОЛЕ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ**

05.21.01 – «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Петрозаводск - 2015

Работа выполнена на кафедре Технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Куницкая Ольга Анатольевна

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Древесиноведения, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»
Шамаев Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой воспроизводства и переработки лесных ресурсов, ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»
Иванов Виктор Александрович

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Костромской государственный технологический университет »

Защита диссертации состоится 25 декабря 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.190.03, созданного на базе Петрозаводского государственного университета, по адресу: 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на его сайте: <http://petsu.ru>.

Автореферат разослан «28» октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Р.В. Воронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Комплексное использование лесных ресурсов, акцент на которое делается в рамках современной концепции развития лесопромышленного комплекса Российской Федерации (которая основана на принципах неистощительного природопользования), невозможно без вовлечения в переработку низкотоварной древесины. Для повышения эксплуатационных свойств такой древесины разработаны различные способы модификации. Отдельное место среди этих способов занимает пропитка древесины различными химическими соединениями. Способов пропитки известно несколько: пропитка вымачиванием, автоклавная пропитка, пропитка в поле центробежных сил (с использованием центрифуг, также «центробежная пропитка»). Последний способ представляет особый интерес, поскольку обладает рядом преимуществ: глубокая пропитка древесины происходит за сравнительно короткое время, при этом не требуется использовать энергоемкое и сложное по конструкции оборудование, как, например, при автоклавной пропитке. Все это облегчает внедрение технологических процессов модификации низкотоварной древесины путем пропитки на лесопромышленных складах.

Дальнейшее совершенствование центробежного способа пропитки требует проведения дополнительных исследований. Анализ литературных источников показывает, что до настоящего времени не исследован вопрос равномерности распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве пропитанной древесины. Кроме того, не проводились исследования пропитываемости древесины с учетом процентного соотношения зон ранней и поздней древесины. Ввиду вариативности свойств древесины как объекта пропитки, исследование в указанных направлениях требуют получения значительного объема дополнительных экспериментальных данных и их обобщения. В дополнение можно отметить, что модели, предложенные к настоящему времени для практического использования, составлены только для конкретных пар «порода древесины + пропиточная жидкость», при этом обобщение этих моделей не проводилось.

Таким образом, исследования, направленные на дальнейшее изучение процесса и совершенствование способа пропитки древесины в поле центробежных сил актуальны как для теории, так и для практики.

Степень разработанности темы исследования. Процесс пропитки древесины в поле центробежных сил ранее исследован теоретически в рамках решения задач общей гидродинамики. По полученным теоретическим результатам составлены модели, раскрывающие кинетику центробежной пропитки древесины как при линейном соотношении скорости фронта пропитки и гидравлического напора пропиточной жидкости, так и при нелинейном. В пред-

ложенных ранее моделях для их реализации используется ряд постоянных величин, определяемых экспериментально для каждой конкретной пары «порода древесины + пропиточная жидкость» по разработанным авторами методикам. При этом не делается разделение на зону ранней и поздней древесины, таким образом, обрабатываемая заготовка рассматривается как однородная среда. Кроме того, не исследован вопрос о равномерности распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве обработанной центробежным способом древесины.

Краткая аннотация работы. Диссертация представляет собой научное исследование, включающее в себя изучение состояния вопроса, постановку цели и задач, теоретический анализ процесса пропитки древесины в поле центробежных сил с составлением математической модели, экспериментальное исследование этого процесса с учетом процентного соотношения зон ранней и поздней древесины в экспериментальных образцах, практическую реализацию работы в виде рекомендаций по практической реализации результатов исследования.

Целью работы является совершенствование способа пропитки древесины при помощи центрифуг.

В соответствии с целью работы сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Разработать общую модель процесса пропитки древесины в поле центробежных сил с учетом свойств пропиточной жидкости (вязкость, плотность).
2. Разработать методику проведения экспериментальных исследований процесса пропитки древесины в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины.
3. Провести экспериментальные исследования с целью установить влияние соотношения зон ранней и поздней древесины на показатели ее пропитываемости.
4. Провести экспериментальные исследования распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве древесины после пропитки в поле центробежных сил.
5. Провести экспериментальные исследования по определению влияния физико-химических свойств пропиточной жидкости (вязкость, плотность) на показатели пропитываемости древесины в поле центробежных сил.

Объект исследований: деревянные заготовки подвергающиеся пропитке в поле центробежных сил.

Предметом исследования является процесс пропитки деревянных заготовок в поле центробежных сил с учетом влияния процентного соотноше-

ния зон ранней и поздней древесины на кинетику пропитки и равномерность распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве древесины.

Научная новизна. Разработаны и исследованы модели процесса пропитки древесины жидкостью в поле центробежных сил, отличающиеся учетом влияния процентного соотношения зон ранней и поздней древесины, а также вязкости пропиточной жидкости на кинетику, глубину и равномерность центробежной пропитки, устанавливающие степень и равномерность заполнения внутреннего пространства древесины жидкостью.

Теоретическая значимость работы. Предложенные модели для описания кинетики пропитки древесины в поле центробежных сил, результаты экспериментальных исследований влияния процентного соотношения зон ранней и поздней древесины, а также равномерности распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве древесины, развивают теоретические представления о пропитке древесины и позволяют обосновывать режимы работы и конструктивные параметры центрифуг для пропитки древесины в различных природно-производственных условиях.

Практическая значимость работы. Полученные результаты влияния процентного соотношения зон ранней и поздней древесины на заполнение внутреннего пространства при центробежной пропитке, а также результаты исследований равномерности распределения пропиточной жидкости, позволяют на практике более объективно подходить к прогнозированию физико-механических свойств модифицированной древесины, а также выбору основных параметров технологического процесса пропитки древесины в поле центробежных сил.

Положения, выносимые на защиту:

1. Общая модель процесса пропитки древесины в поле центробежных сил, построенная с учетом свойств пропиточной жидкости (вязкость, плотность).
2. Результаты экспериментальных исследований влияния процентного соотношения зон ранней и поздней древесины на показатели ее пропитываемости при пропитке в поле центробежных сил.
3. Результаты экспериментальных исследований равномерности распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве древесины при пропитке в поле центробежных сил.

Методология и методы исследования. Теоретической основой исследования явились работы ведущих отечественных ученых по пропитке древесины. В работе использованы базовые методы научно-технического познания, математического моделирования, измерения и обработки экспериментальных данных.

Автор в своих исследованиях опирался на фундаментальные работы ученых в области теории и технологии первичной переработки и пропитки древесины. Это, в первую очередь, труды В.А. Баженова, С.М. Базарова, В.П. Кожина, И.В. Кречетова, О.А. Куницкой, А.Ю. Мануковского, А.И. Мигачева, Н.А. Оснача, В.И. Пятякина, А.И. Расева, А.К. Редькина, П.С. Серговского, В.И. Соколова, Б.Н. Уголева, Б.С. Чудинова, В.А. Шамаева И.Р. Шегельмана и других ученых МГУЛ, СПбГЛТУ, ВГЛТУ, УГЛТУ, ПетрГУ, С(А)ФУ, БрГУ.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается применением современных методов исследования, обоснованностью принятых допущений, обоснованностью методов расчета и моделирования, а также подтверждается экспериментальными исследованиями процесса пропитки древесины в поле центробежных сил.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: ежегодных НТК СПбГЛТУ в 2011–2015 гг., ежегодных НТК Лесоинженерного факультета в 2011–2015 гг. МНТИК «Леса России в XXI веке»; Республиканской НПК «Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности», (Петрозаводск, 2015); Республиканской НПК «Наука, образование, инновации в приграничном регионе», (Петрозаводск, 2015); МНТК «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика», (Воронеж, 2014). Исследования выполнялись в створе Перечня Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ, (от 07.07.2011 г.) пункт «Рациональное природопользование». Часть материалов работы получена при выполнении НИР № 01201255482 «Разработка теоретических основ сквозных технологических процессов и модульных систем машин лесозаготовительного производства».

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в семи печатных работах, включая две статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций. Результаты исследований также отражены в отчетах по НИР.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Общий объем работы 121 страница, список литературы содержит 93 наименования.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разделе рассмотрены различные способы пропитки древесины, проанализированы их преимущества и недостатки. Показано, что способ пропитки древесины в поле центробежных сил представляет особый практический интерес, поскольку обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами: глубокая пропитка древесины происходит за сравнительно корот-

кое время, при этом не требуется использовать энергоемкое и сложное по конструкции оборудование. Все это облегчает внедрение технологических процессов модификации низкотоварной древесины путем пропитки на лесопромышленных складах.

Проанализированы работы предыдущих исследователей по тематике центробежной пропитки, в которых доказано, что модели, построенные на законах фильтрации (в частности, с использованием линейного закона фильтрации Дарси) с достаточной точностью раскрывают кинетику процесса пропитки древесины в поле центробежных сил. Реализация рассмотренных моделей возможна после получения ряда экспериментальных величин, которые являются константами, характеризующими проницаемость той или иной породы древесины по отношению к определенному пропиточному составу. При этом не предпринималось попыток обобщения разработанных моделей путем замены коэффициентов, зависящих от типа пропиточного состава на коэффициенты, зависящие от свойств (вязкости, плотности) пропиточного состава.

Установлено, что ранее при описании процесса пропитки древесины в поле центробежных сил не делалось различие между проницаемостью зон ранней и поздней древесины по отношению к пропиточной жидкости. Кроме того, авторами принималось допущение о равномерности распределения пропиточной жидкости во внутреннем пространстве пропитанных заготовок.

По результатам анализа состояния вопроса по тематике центробежной пропитки древесины сформулированы задачи исследований настоящей работы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для составления модели, раскрывающей кинетику центробежной пропитки древесины принята схема, представленная на рисунке 1.

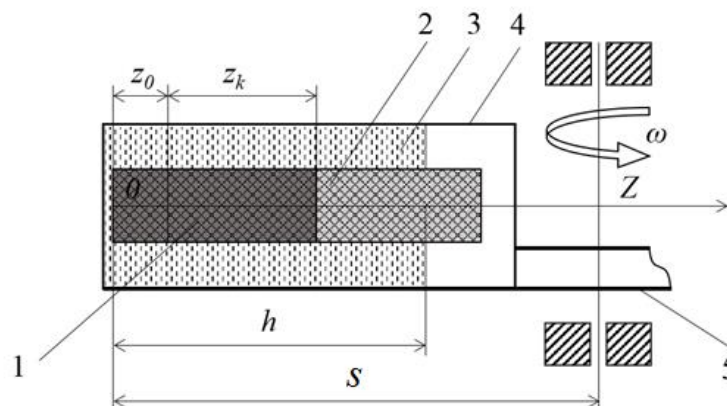


Рисунок 1. Расчетная схема процесса центробежной пропитки древесины:
1 – пропитанная область образца, 2 – непропитанная область образца, 3 – пропиточная жидкость, 4 – пропиточная емкость, 5 – платформа центрифуги

Пропитка образца осуществляется за счет градиента гидравлического давления жидкости в пропиточной емкости, объясняемого действием центробежной силы. Данный способ пропитки получил название встречно-центробежный способ пропитки древесины.

Для составления общей модели, раскрывающей кинетику движения пропиточной жидкости с учетом ее вязкости, использована следующая формулировка закона фильтрации Дарси:

$$V = -\frac{K}{\mu} \frac{dH(z)}{dz}, \quad (1)$$

где V – скорость движения фронта пропитки; K – коэффициент фильтрации, постоянная для определенной породы древесины величина, определяемая экспериментально; μ – вязкость пропиточной жидкости, $H(z)$ – гидравлический напор пропиточной жидкости.

Формула для скорости перемещения фронта пропитки после дифференцирования выражения для гидравлического напора $H(z)$ по координате z (рисунок 1) и подстановки полученной производной в формулу (1) принимает вид:

$$V = K \frac{\rho\omega^2 \cdot (h - z) \cdot (2s - h - z)}{\mu \cdot z}. \quad (2)$$

При скорости, зависящей от положения фронта пропитки, выражение для расчета времени, необходимого чтобы занять это положение, имеет вид:

$$T = \int_{z_0}^{z_0+z_k} \frac{1}{V} dz, \quad (3)$$

где z_0, z_k – соответственно начальное и конечное положение фронта пропитки (обе величины отсчитываются от погруженного в жидкость торца заготовки).

Интегрирование выражения (3) дает следующую аналитическую зависимость:

$$T = \frac{\mu}{K\rho\omega^2(s-h)} \cdot \left[(2s-h) \cdot \ln \frac{-2s+h+z_0+z_k}{-2s+h+z_0} - h \cdot \ln \left(\frac{-h+z_0+z_k}{-h+z_0} \right) \right]. \quad (4)$$

В формуле (4) значения z_0, z_k определяются следующим образом:

$$z_0 = \frac{100Wm}{(100+W) \cdot \rho BHCk}; \quad (5)$$

$$z_k = \frac{100\Delta m}{\rho BHCk}, \quad (6)$$

где W – абсолютная влажность образца древесины, m – масса образца древесины до начала пропитки, B, H – геометрические размеры поперечного сечения образца (для прямоугольных сечений), C – пористость образца древесины,

k – коэффициент заполнения внутреннего пространства пропиточной жидкостью, Δm – прирост массы образца после окончания пропитки, ρ – плотность пропиточной жидкости.

Для применения на практике полученной модели (4), помимо характеристик жидкости (вязкость, плотность) и параметров процесса пропитки (угловая скорость платформы центрифуги, радиус вращения, количество жидкости в пропиточной емкости), необходимо располагать значением коэффициента фильтрации K , который определяется экспериментально.

3. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования пропитки древесины с использованием центрифуги (центробежная пропитка) проводились в лаборатории кафедры Технологии лесозаготовительных производств СПбГЛТУ. Целью экспериментальных исследований являлось:

1. Исследование влияния процентного соотношения ранней и поздней древесины в пропитываемых образцах на скорость центробежной пропитки.
2. Исследование глубины пропитки (отношения объема впитанной жидкости к общему объему порового пространства) ранней и поздней зон пропитываемых образцов древесины.
3. Определение коэффициента фильтрации пропиточной жидкости при варьировании ее вязкости и плотности.

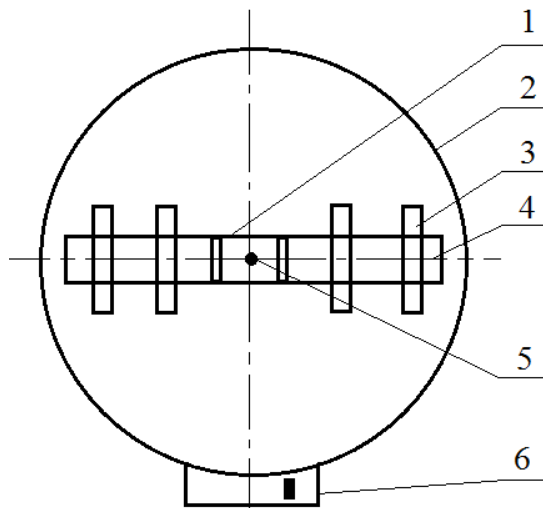


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки:

1 – карусель; 2 – корпус; 3 – крепежные полукольца; 4 – пропиточная емкость; 5 – ось вращения; 6 – пульт управления

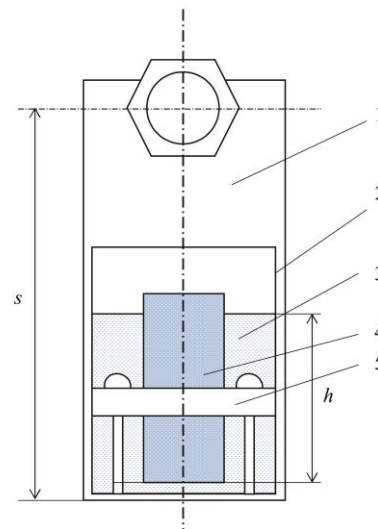


Рисунок 3. Схема к опытам по центробежной пропитке древесины:

1 – платформа центрифуги, 2 – пропиточная емкость, 3 – пропиточная жидкость, 4 – образец древесины, 5 – корсет

При проведении исследований процесса центробежной пропитки древесины использовалась экспериментальная установка, схема представлена на рисунке 2.

В ходе экспериментальных исследований влияния процентного соотношения зон ранней и поздней древесины на показатели процесса пропитки использованы образцы древесины сосны и ели с квадратным сечением 45x45 мм ($B = 0,045$ м, $H = 0,045$ м), длиной 200 мм.

Перед каждым опытом измерялась масса образца m , с использованием измеренного значения массы образца рассчитывалась его плотность ρ и пористость C . Для образцов древесины непосредственно перед проведением опытов по исследованию пропитываемости проводилась оценка процентного содержания поздней древесины.

Суть опытов заключалась в следующем. После определения массы и влажности образца, экспериментальный образец древесины 4 (рисунок 3) размещался в пропиточной емкости 2. Образец фиксировался в емкости при помощи корсета 5. Емкость заполнялась пропиточной жидкостью 3 до уровня 200 мм, герметично закрывалась крышкой (на рисунке условно не показана). Далее емкость с образцом древесины закреплялась на платформе центрифуги 1 при помощи хомутов (на рисунке условно не показаны).

Включался привод установки, после выхода на установившийся режим вращения (в среднем 4-5 с) образец пропитывался в течение 300 либо 600 с. После окончания каждого опыта измерялся прирост массы образцов Δm . Затем образцы раскалывали вдоль волокон и определяли расстояние от погруженного в пропиточную жидкость торца до конечного положения фронта пропитки l . После этого рассчитывался коэффициент заполнения внутреннего пространства образца пропиточной жидкостью:

$$k = \frac{100\Delta m}{\rho_{ж}CBHl} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Определение коэффициента фильтрации пропиточной жидкости, используемого в полученной модели (4) при расчете времени пропитки, осуществлялось на основании экспериментальных данных о приросте массы образца Δm за время пропитки T . Экспериментальные исследования проводились на образцах березы ($\rho=630\pm 20$ кг/м³), сосны ($\rho=490\pm 20$ кг/м³), ели ($\rho=440\pm 20$ кг/м³) и осины ($\rho=500\pm 20$ кг/м³). Во всех опытах использовались образцы с квадратным сечением размером 50x50 мм, длиной 250 мм. Влажность образцов перед пропиткой, определявшаяся при помощи электронного влагомера УЭБИВ, варьировалась в пределах от 10 до 30 %. Для пропитки использовались водные растворы хлористого кальция (массовая доля 25%, $\mu=1,86$ мПа·с, пропитано по 16 образцов каждой породы) и гидроксида натрия

(массовая доля 10 %, $\mu = 2,74$ мПа·с, пропитано по 16 образцов каждой породы), а также вода ($\mu = 1$ мПа·с, пропитано по 18 образцов каждой породы) при температуре 20 °С. Все пропиточные жидкости предварительно подкрашивались. Значения прочих факторов принимались постоянными, поскольку их влияние на процесс центробежной пропитки уже известно ранее. Радиус вращения R составлял 0,45 м, уровень пропиточной жидкости в емкостях h поддерживался на уровне 250 мм, угловая скорость ω вращения платформы центрифуги составляла 47 с^{-1} .

В ходе опытов определяли привес массы образцов Δm за определенные промежутки времени (300, 600 и 900 с обработки в поле центробежных сил для каждого образца, время обработки суммарное в установившемся режиме вращения центрифуги).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Во всех опытах результаты наблюдений проверяли на наличие значений, аномально отклоняющихся от средних, с использованием критерия Стьюдента.

Закон распределения наблюдаемых величин проверяли на соответствие нормальному закону распределения путем сопоставления расчетных значений χ -критерия (значимо не отличался от нормального закона распределения случайной величины).

Ввиду изложенного, к полученным экспериментальным данным можно применить методы корреляционного и регрессионного анализа.

Связь прироста массы образцов после пропитки, конечного положения фронта пропитки, а также расчетного значения степени пропитки для образцов древесины сосны и ели представлена на рисунках 4–6.

Во всех случаях показатель точности p , характеризующий ошибку измерения экспериментальной величины, не превышал величину 5 %, при этом в большинстве опытов достаточное число наблюдений n составляло 6 – 7. Это дает основание считать полученные экспериментальные данные удовлетворительно точными, пригодными для получения зависимостей с доверительной вероятностью 95 %.

На графиках на рисунках 4 – 6 также приведены регрессионные зависимости наблюдаемых и исследуемых величин от процентного содержания поздней древесины, полученные при помощи метода наименьших квадратов. Обращает на себя внимание сходный характер зависимостей коэффициента насыщения внутреннего пространства образцов древесины от процентного содержания поздней древесины за время пропитки 5 и 10 минут.

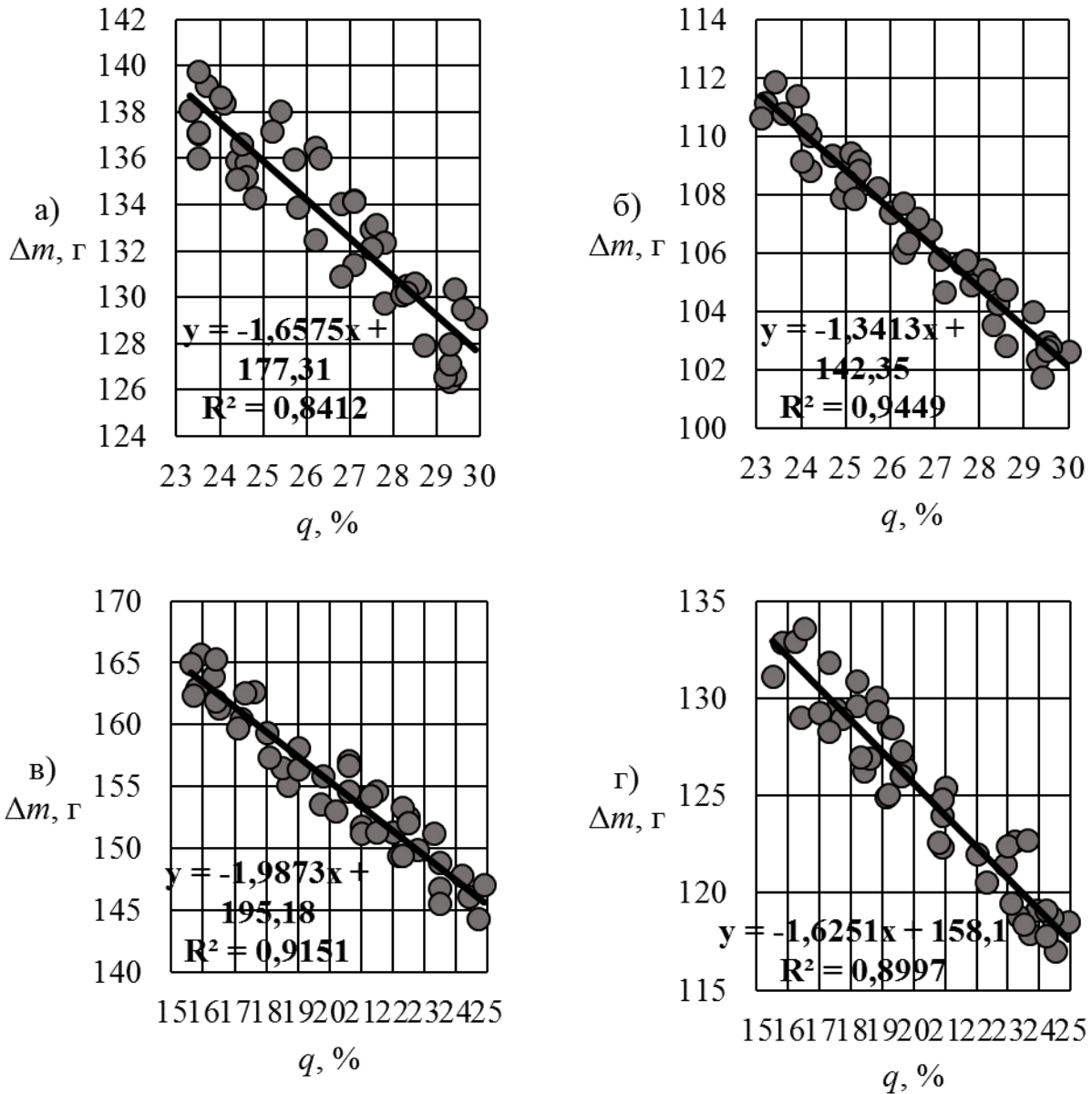


Рисунок 4. Прирост массы экспериментальных образцов древесины:

а) образцы сосны, время пропитки 10 минут, б) образцы сосны, время пропитки 5 минут, в) образцы ели, время пропитки 10 минут, г) образцы ели, время пропитки 5 минут

Для сосны уравнения регрессии, описывающие связь процентного содержания поздней древесины q и коэффициента насыщения внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью за 5 и 10 минут пропитки имеют вид:

$$k = -0,5578q + 80,292, R^2 = 0,7831, \quad (8)$$

$$k = -0,5153q + 79,114, R^2 = 0,7798. \quad (9)$$

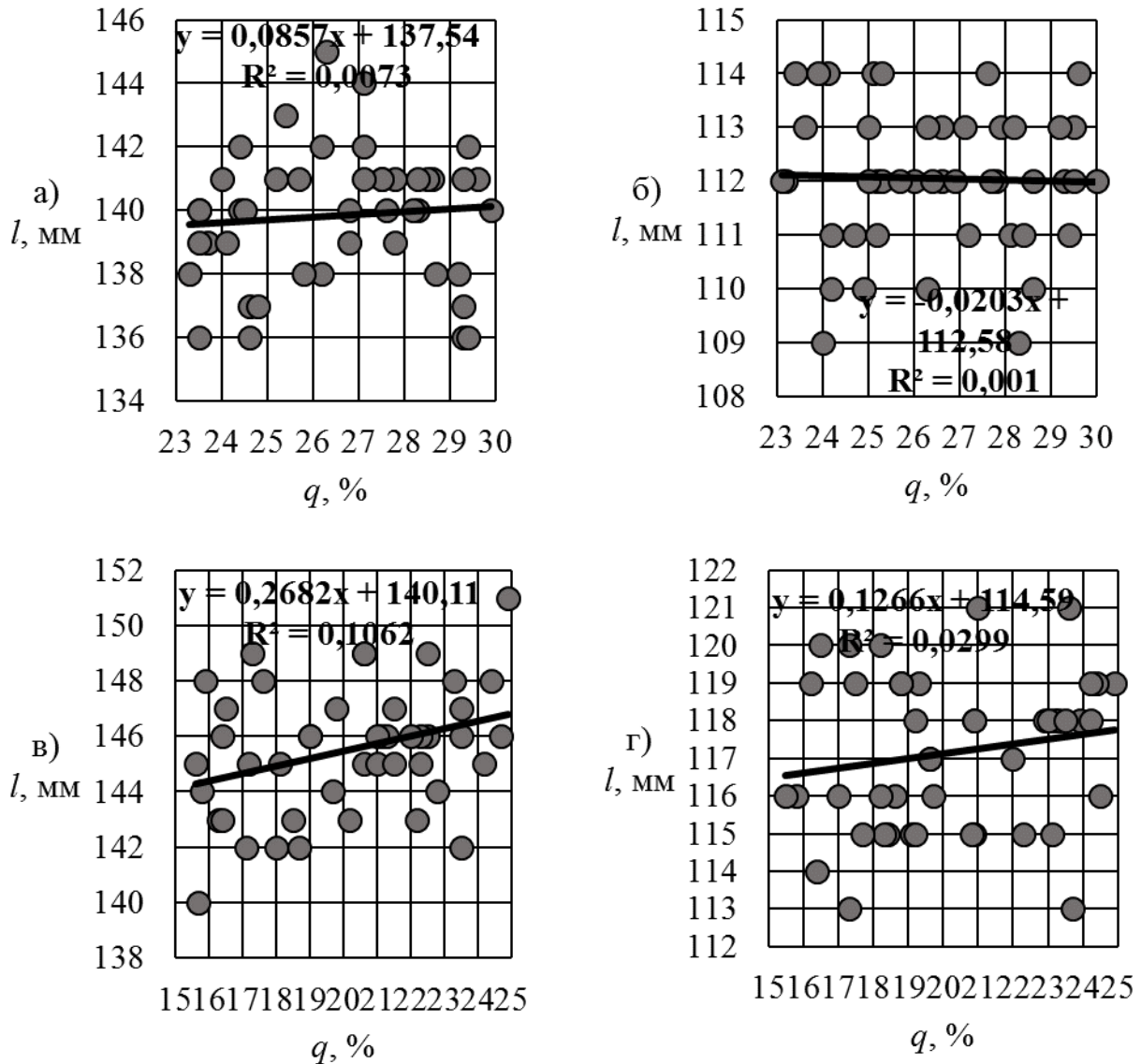


Рисунок 5. Глубина пропитки экспериментальных образцов древесины:
 а) образцы сосны, время пропитки 10 минут, б) образцы сосны, время пропитки 5 минут, в) образцы ели, время пропитки 10 минут, г) образцы ели, время пропитки 5 минут

Аналогичные уравнения для образцов ели следующие:

$$k = -0,6411q + 85,706, R^2 = 0,8411, \quad (10)$$

$$k = -0,6203q + 85,513, R^2 = 0,8430. \quad (11)$$

При этом описать зависимость конечного положения фронта пропитки l от процентного содержания поздней древесины q с удовлетворительной точностью не представляется возможным ни в одном случае (см. рисунок 5).

Результаты корреляционного анализа представленных на рисунках 4–6 данных сведены в таблицы 1–4. В таблицах значения коэффициента корреляции

величин r выделены жирным в том случае, если по результатам оценки значимости коэффициент корреляции признан значимым.

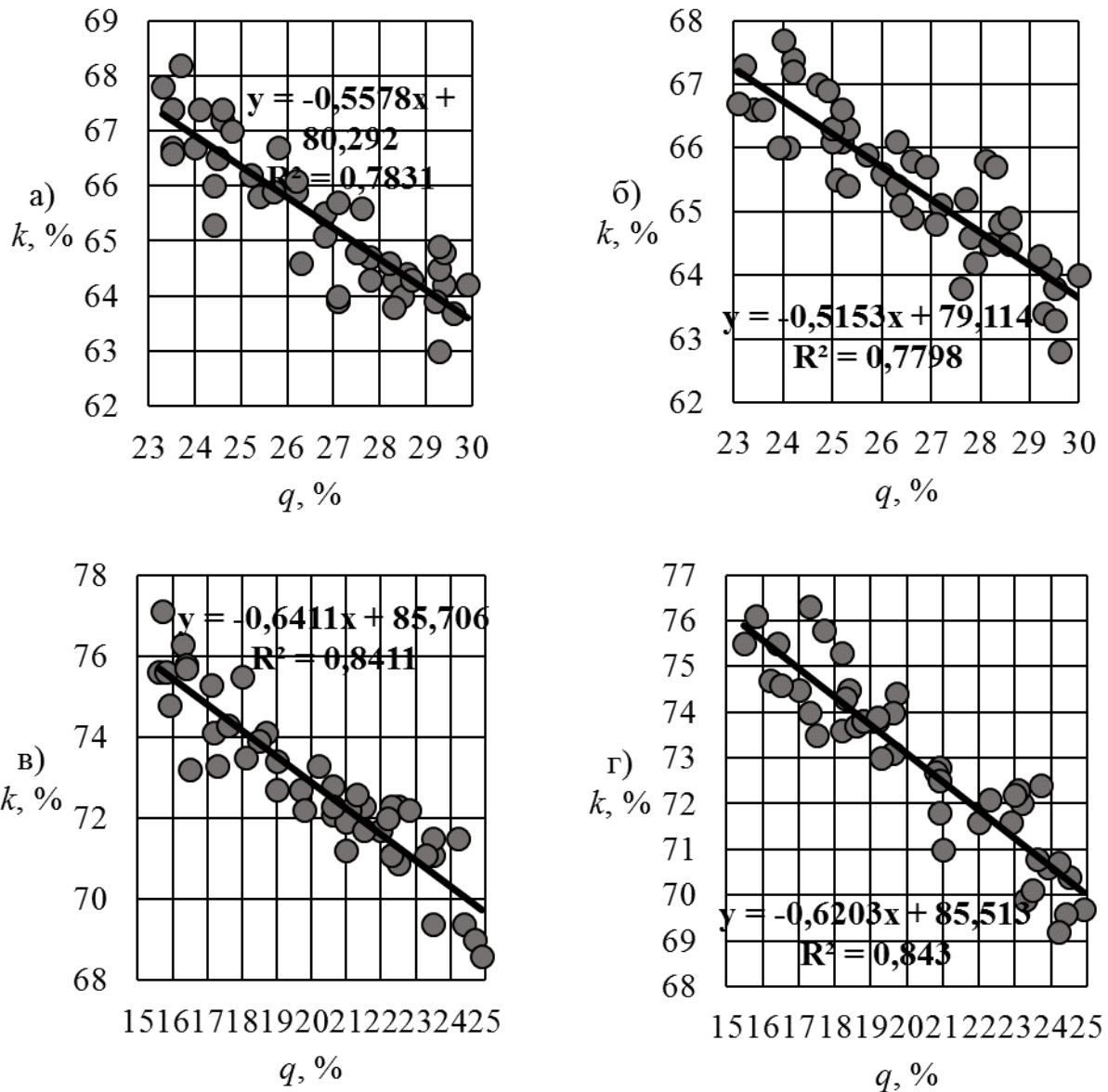


Рисунок 6. Коэффициент заполнения внутреннего пространства экспериментальных образцов древесины:

- а) образцы сосны, время пропитки 10 минут, б) образцы сосны, время пропитки 5 минут, в) образцы ели, время пропитки 10 минут, г) образцы ели, время пропитки 5 минут

Таблица 1. Коэффициент корреляции исследуемых величин в опытах по центробежной пропитке древесины сосны (пропитка в течение 10 минут)

	Δm	k	l	q	ρ
Δm	-	0,8104	0,2068	-0,9172	-0,8963
k	0,8104	-	-0,3842	-0,8849	-0,8550
l	0,2068	-0,3842	-	0,0856	0,1226
q	-0,9172	-0,8849	0,0856	-	0,9465
ρ	-0,8963	-0,8550	0,1226	0,9465	-

Таблица 2. Коэффициент корреляции исследуемых величин в опытах по центробежной пропитке древесины сосны (пропитка в течение 5 минут)

	Δm	k	l	q	ρ
Δm	-	0,8240	0,1968	-0,9720	-0,9395
k	0,8240	-	-0,3725	-0,8831	-0,8356
l	0,1968	-0,3725	-	-0,0310	0,0030
q	-0,9720	-0,8831	-0,0310	-	0,9567
ρ	-0,9395	-0,8356	0,0030	0,9567	-

Таблица 3. Коэффициент корреляции исследуемых величин в опытах по центробежной пропитке древесины ели (пропитка в течение 10 минут)

	Δm	k	l	q	ρ
Δm	-	0,8890	-0,1260	-0,9566	-0,9409
k	0,8890	-	-0,5431	-0,9171	-0,9103
l	-0,1260	-0,5431	-	0,3259	0,3623
q	-0,9566	-0,9171	0,3259	-	0,9893
ρ	-0,9409	-0,9103	0,3623	0,9893	-

Таблица 4. Коэффициент корреляции исследуемых величин в опытах по центробежной пропитке древесины ели (пропитка в течение 5 минут)

	Δm	k	l	q	ρ
Δm	-	0,8533	0,0837	-0,9485	-0,9268
k	0,8533	-	-0,4270	-0,9182	-0,9030
l	0,0837	-0,4270	-	0,1729	0,2135
q	-0,9485	-0,9182	0,1729	-	0,9811
ρ	-0,9268	-0,9030	0,2135	0,9811	-

Данные таблиц 1 – 4 подтверждают тесные линейные связи плотности, прироста массы образцов, а также коэффициента заполнения порового пространства пропиточной жидкостью во всех проведенных опытах, при этом статистически значимая связь процентного содержания поздней древесины в образцах и конченого положения фронта пропитки не выявлена. Значения коэффициентов линейной корреляции коэффициента заполнения внутреннего

пространства древесины пропиточной жидкостью и процентного содержания поздней древесины в образце, полученные для данных опытов при пропитке в течение 10 и 5 минут у обеих исследованных пород практически равны. Таким образом, насыщение жидкостью имело схожий характер.

Результаты позволили сделать ряд выводов, в частности: процентное содержание поздней древесины в образце заметно не влияет на скорость перемещения фронта центробежной пропитки; процентное содержание поздней древесины в образце влияет на степень заполнения внутреннего пространства древесины жидкостью; заполнение внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью происходит равномерно по мере перемещения фронта пропитки.

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных получены регрессионные модели, связывающие процентное содержание поздней древесины q [%], плотность образцов древесины ρ [кг/м³] и степень пропитки образцов k [%]. Для древесины сосны модели представлены следующими формулами:

$$k = -0,5369q + 79,7144, R^2 = 0,7800, \quad (12)$$

$$k = -0,0971\rho + 107,4890, R^2 = 0,7151, \quad (13)$$

$$\rho = 5,0358q + 299,0890, R^2 = 0,9050. \quad (14)$$

Модели, полученные по результатам обработки опытов по пропитке образцов ели, следующие:

$$k = -0,6296q + 85,5894, R^2 = 0,8385, \quad (15)$$

$$k = -0,0967\rho + 114,0800, R^2 = 0,8207, \quad (16)$$

$$\rho = 6,3437q + 297,9490, R^2 = 0,9700. \quad (17)$$

Также была произведена оценка доверительных ($p = 95$ %) интервалов изменения параметров моделей (12)–(17), результаты представлены в таблицах 5, 6 (в таблицах обозначено: a_0 – свободные члены в уравнениях (12)–(17), a_1 – параметры при аргументах).

Таблица 5. Оценки и доверительные интервалы коэффициентов регрессионных моделей по результатам опытов по центробежной пропитке древесины сосны

Уравнение	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	Доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
(12)	a_0	79,7114	0,8091	78,1034	81,3193
	a_1	-0,5369	0,0304	-0,5973	-0,4765
(13)	a_0	107,4890	2,8288	101,8670	113,1110
	a_1	-0,0971	0,0065	-0,1101	-0,0841
(14)	a_0	299,0890	4,6286	289,8910	308,2880
	a_1	5,0358	0,1739	4,6902	5,3814

Таблица 6. Оценки и доверительные интервалы коэффициентов регрессионных моделей по результатам опытов по центробежной пропитке древесины ели

Уравнение	Параметр	Оценка	Стандартная ошибка	Доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
(15)	a_0	85,5894	0,6013	84,3943	86,7844
	a_1	-0,6296	0,0295	-0,6882	-0,5711
(16)	a_0	114,0800	2,0559	109,9940	118,1660
	a_1	-0,0967	0,0048	-0,1063	-0,0871
(17)	a_0	297,9490	2,4260	293,1270	302,7700
	a_1	6,3437	0,1189	6,1075	6,5800

На втором этапе экспериментальных исследований коэффициент фильтрации, использующийся в расчетах времени пропитки в поле центробежных сил по зависимости (4), определялся расчетным путем для четырех пород древесины: сосна, ель, осина, береза.

Статистическая обработка полученных данных подтвердила предположение о том, что коэффициент фильтрации K является постоянной величи-

ной, зависящий от породы древесины, но не от вязкости пропиточной жидкости. Это подтверждается графически на рисунке 7.

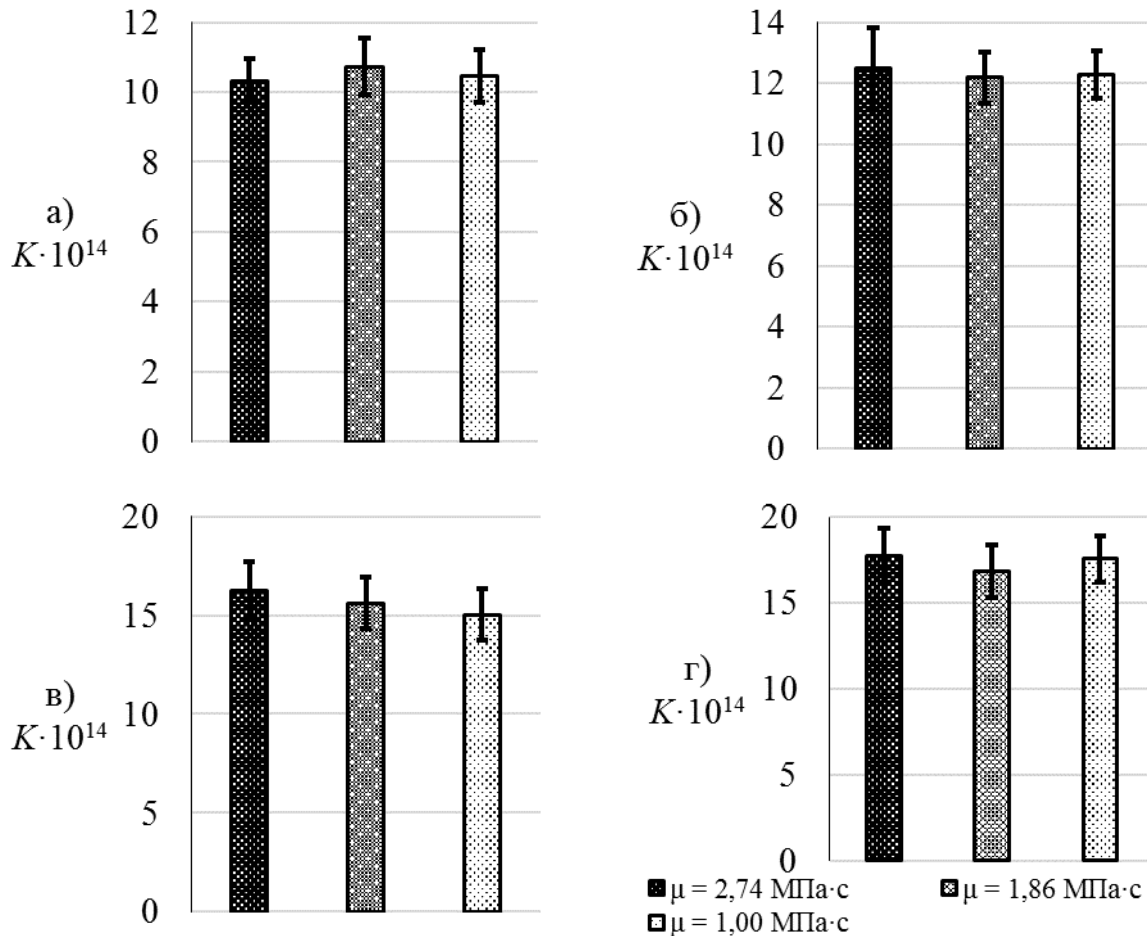


Рисунок 7. Коэффициент фильтрации при пропитке древесины осины в поле центробежных сил жидкостями с различными значениями вязкости:

а) - сосна, б) – ель, в) – осина, г) – береза

Сводные данные по значениям коэффициента фильтрации K для общей зависимости (4), сведения о стандартных ошибках определения S и отклонениях, соответствующих верхней и нижней границам доверительных интервалов Δ , представлены в таблице 7.

Таблица 7. Сводные данные по значениям коэффициента фильтрации и доверительным интервалам его изменения

Порода древесины	$K \cdot 10^{-14}$	S	$\Delta \cdot 10^{-14}$
Сосна	10,5037	1,4060	0,2250
Ель	12,2688	1,7438	0,2791
Осина	15,6909	2,7565	0,4411
Береза	17,3766	3,0369	0,4860

Полученные значения коэффициента фильтрации используются для расчетов времени, необходимого для достижения заданной степени пропитки заготовки при заданных значениях вязкости и плотности пропиточной жидкости, угловой скорости и радиуса платформы центрифуги, а также необходимого количества пропиточной жидкости в емкости.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Аналитическое выражение для расчета времени, за которое фронт центробежной пропитки переместится на заданное расстояние от погруженного в пропиточную жидкость торца заготовки (рисунок 1), представлено формулой (4). Она учитывает вязкость и плотность пропиточной жидкости, угловую скорость и радиус платформы центрифуги, а также количество пропиточной жидкости в емкости, порода древесины учтена при помощи коэффициента фильтрации.
2. Коэффициент фильтрации в модели для расчета времени (4), требующегося для достижения заданного положения фронта пропитки (и, таким образом, степени пропитки) заготовки, зависит от породы пропитываемой древесины (рисунок 7). Сводные данные по значениям коэффициента фильтрации и доверительным интервалам его изменения для древесины сосны, ели, осины и березы представлены в таблице 7.
3. Процентное содержание поздней древесины в образце влияет на отношение объема впитанного импрегната к расчетному значению объема внутреннего пространства заготовки (коэффициент заполнения внутреннего пространства), связь выражается для древесины сосны моделью (12) ($R^2 = 0,7800$), для ели – моделью (15) ($R^2 = 0,8385$), доверительные интервалы для коэффициентов полученных моделей представлены в таблицах 5, 6 соответственно.
4. Заполнение внутреннего пространства древесины пропиточной жидкостью происходит равномерно по мере перемещения фронта пропитки. Это доказывается тем, что расчетные значения коэффициентов заполнения внутреннего пространства исследованных образцов древесины в опытах в течение 5 и 10 минут практически равны (как для древесины сосны, так и для древесины ели, рисунок 6).
5. Связь процентного содержания поздней древесины в образцах и конечного положения фронта пропитки статистически не значима, что подтверждается расчетными значениями коэффициента корреляции данных величин, представленными в таблицах 3, 4, а также графиками на рисунке 5.
6. Процентное содержание поздней древесины в образце заметно не влияет на скорость перемещения фронта центробежной пропитки от погру-

женного в пропиточную жидкость торца по направлению к центру вращения.

7. Дальнейшим направлением работы является получение сведений об энергоемкости процесса центробежной пропитки и интеграция результатов исследований в модели, служащие для оценки качества технологических процессов ЛПК по эколого-энергетическому критерию.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гончаров Ю.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Куницкая О.А. Модель процесса пропитки древесины центрифугированием с учетом вязкости пропиточной жидкости. Научное обозрение, № 6, 2014. С. 329 – 336.
2. Гончаров Ю.А., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Экспериментальные исследования процесса пропитки древесины сосны в поле центробежных сил с учетом соотношения зон ранней и поздней древесины. Инженерный Вестник Дона, № 3, 2014. С. 418 – 430.
3. Гончаров Ю.А. Перспективные направления исследований в области пропитки древесины. Сборник трудов молодых ученых СПбГЛТУ, 2014. С. 77 – 80.
4. Гончаров Ю.А., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. результаты исследований равномерности центробежной пропитки древесины с учетом процентного соотношения зон ранней и поздней древесины. Материалы XI МНТИК «Леса России в XXI веке», Санкт-Петербург, 2014. С. 82 – 85.
5. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Гончаров Ю.А. Поиск новых технических решений для повышения эффективности пропитки древесины / Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности Материалы республиканской научно-практической конференции, посвященной 75-летию ПетрГУ. Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, 2015. С. 16-17.
6. Гончаров Ю.И., Куницкая О.А., Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н. Обзор состояния вопроса и перспективных направлений исследований процесса пропитки древесины после центробежных сил / Наука, образование, инновации в приграничном регионе. Материалы республиканской научно-практической конференции. Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, 2015. С. 21-23.
7. Куницкая О.А., Гончаров Ю.А. Математическая модель центробежной пропитки древесины с учетом вязкости и плотности пропиточного состава / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 5-4 (10-4). С. 187-190.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Петрозаводский государственный университет. Ученому секретарю диссертационного совета 212.190.03.