

Дерево —

ISSN 0011-9008

обрабатывающая промышленность

3/2022



Дерево — 3/2022 обрабатывающая промышленность

ISSN 0011-9008

Учредитель: Редакция журнала
«Деревообрабатывающая промышленность»
Основан в апреле 1952 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группе научных специальностей 05.21.00 – Технология, машины и оборудование лесозаготовок, лесного хозяйства, деревопереработки и химической переработки биомассы дерева.

Редакционная коллегия:



Главный редактор
Сафин Руслан Рушанович
д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»



Зам. главного редактора
Разумов Евгений Юрьевич
д.т.н., доцент

Сафин Рушан Гареевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Баширов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Хасанин Руслан Ромелевич, д.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Мазуркин Петр Матвеевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Рыкунин Станислав Николаевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

Царев Евгений Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Черных Михаил Михайлович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. Калашникова»

Тимербаев Наиль Фаритович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Лукаш Александр Андреевич, д.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»

Рыбин Борис Матвеевич, д.т.н., профессор
Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Сержанов Игорь Михайлович, д.с.-х.н., доцент
ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Давлетбаев Руслан Сагитович, д.х.н., профессор
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ»

Титунин Андрей Александрович, д.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет»

Тамби Александр Алексеевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнический университет»

Варанкина Галина Степановна, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Угрюмов Сергей Алексеевич, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

Адрес редакции:
117303, Москва, ул. Малая
Юшуньская, д. 1, корп. 1,

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2022

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

Свидетельство о регистрации
СМИ в Роскомпечати № 014990
Формат бумаги 60x88/8
Тираж 720 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

- Тихомиров П.В., Швецова В.В., Саранов И.А., Сапелкин Р.С., Брюховецкий А.Н., Щербаков Е.Д.**
Определение геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог с применением информационно-интеллектуальных систем 3
- Тихомиров П.В., Швецова В.В., Саранов И.А., Сапелкин Р.С., Брюховецкий А.Н., Щербаков Е.Д.**
Кривая «нового типа» или кадиоида, тормозная кривая и клотоида 15

Физико-механические процессы в деревообработке

- Шагеева А.И., Кайнов П.А., Сафин Р.Р.**
Разработка эффективной схемы энергообеспечения процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов 28
- Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Мялицин А.В.**
Повышение эффективности лесосушильных камер с естественной циркуляцией воздуха 34
- Сафина А.В., Ахметханова Е.Н., Сафин Р.Р., Исмаилов Л.Ю., Байгильдеева Е.И.**
Программное моделирование процесса экстракции ценных компонентов из растительного сырья 42
- Саерова К.В., Мухаметзянов Ш.Р., Хасанишин Р.Р.**
Исследование механических свойств полимерного композита, полученного двухступенчатой обработкой древесного наполнителя 50
- Бурмистрова О.Н., Побединский В.В., Кручинин И.Н., Михеевская М.А., Кунгурова Е.А.**
Разработка методов определения физико-механических свойств крупногабаритных изделий из прессованной древесины 57
- Сафина А.В., Губернаторов В.В.**
Математическое описание процесса водно-вакуумной экстракции *Inonotus Obliquus* 64
- Галяветдинов Н.Р., Илалова Г.Ф., Саерова К.В., Погодина Я.Д.**
Технология производства биоразлагаемых композитов для сельскохозяйственных целей 73

Химическая технология древесины

- Салимгараева Р.В., Ефремов Д.Г.**
Обзор исследований в области химической модификации древесины 83
- Чирков Д.Д., Шкуро А.Е., Глухих В.В.**
Оценка влияния химического состава наполнителя на свойства древесно-полимерных композитов с поливинилхлоридной полимерной матрицей 95
- Грачев А.Н., Бикбулатова Г.М., Баширов В.Н., Валеева А.Р., Валиуллина А.И., Дряхлов О.В.**
Применение реакции фентона и озонирования для очистки водорастворимой фракции жидких продуктов быстрого пиролиза древесины 101
- Шкуро А.Е., Чирков Д.Д., Глухих В.В., Кулаженко Ю.М., Бандуркин Д.В.**
Полимерные композиционные материалы на основе поливинилхлорида, отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки 112

Лесоинженерное дело

УДК 630.383

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННО- ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

П.В. Тихомиров, В.В. Швецова, И.А. Саранов, Р.С. Сапелкин, А.Н. Брюховецкий, Е.Д. Щербаков

Статья посвящена исследованиям по определению детальности разбивки и контролю возведения дорожных закруглений различными методами, в данном случае при помощи информационно – интеллектуальных систем. Применяемые на практике разбивочные интервалы обеспечивают иногда либо недостаточную, либо излишнюю детальность разбивки. Так, недостаточная детальность приводит к неточностям, отклонениям от проектных геометрических параметров закруглений, что ведет к ухудшению эксплуатационного качества лесовозной автомобильной дороги, технико – экономических показателей и безопасности движения. Излишняя детальность приводит к снижению производительности разбивочно – контрольных работ, задержке поточно – строительного процесса, неоправданно большому количеству разбивочных знаков, неизбежно уничтожаемых, подлежащих восстановлению и мешающих работе дорожно-строительных машин и механизмов. Таким образом, в данной статье приводятся результаты исследований по определению оптимальных интервалов детальной разбивки и контроля строительства дорожных закруглений переменной и постоянной кривизны.

Ключевые слова: стереофотограмметрия, стереоскопическая модель, кривая, геодезический метод.

Введение

При обследовании лесовозных автомобильных дорог с целью определения геометрических элементов дороги выполняется комплекс изыскательских работ с использованием методов измерений [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Весь этот комплекс изысканий в настоящее время выполняют непосредственно в полевых условиях, что в период реконструкции дорог, является довольно трудоемким процессом и зачастую небезопасным для исполнителей. Вопросам обследования лесовозных автомобильных дорог для определения геометрических элементов дорог посвящены большое количество исследований отечественных ученых. [10, 11, 12].

Анализ существующих инструментальных работ показывает, что наряду со своими преимуществами они имеют существенные недостатки, связанные в основном с недостаточной точностью измерений, довольно продолжительными периодом выполнения полевых работ и требующие большого количества исполнителей. Предлагается обследование лесовозных автомобильных дорог, подлежащих реконструкции, выполнять по материалам наземной фото-видео фиксации. Применение этого метода при определении геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог позволит в значительной степени автоматизировать изыскательские работы, перенести трудоемкие измерительные операции в камеральный процесс и одновременно с этим существенно повысить качество измерений. Материалы наземной фото-видео фиксации позволяют непосредственно в камеральных условиях по стереоскопической модели местности выполнять измерения ширины земляного полотна дороги, радиусов вертикальных и горизонтальных кривых, углов наклона и уклонов линий, определение положение главных точек кривых. Достоинства метода наземной стереофотограмметрии в значительной степени проявляются еще больше с применением современных компьютерных технологий.

Вопросы применения наземной стереофотограмметрической съемки для целей определения геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог являются актуальными в настоящее время по той причине, что от знания точных и достоверных данных о дороге зависит успех ее дальнейшего проектирования. Особенно остро эти вопросы стоят при выполнении работ по обследованию лесовозных автомобильных дорог для целей их реконструкции, в связи с тем, что отсутствуют разработки по оценке

точности при определении геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог. Поэтому при обследовании автомобильных дорог для целей определения их геометрических элементов предлагается метод наземной стереофотограмметрии, позволяющий устранить вышеперечисленные недостатки геодезических методов измерений, так как дает возможность получить достоверную информацию о дороге в результате применения современных компьютерных технологий.

Материалы и методы

Определение ширины земляного полотна дороги (проезжей части, обочин и т. д.) связано с линейными измерениями, тогда для нормального случая наземной фото-видео фиксации зависимость по определению линейных параметров лесовозной автомобильной дороги с использованием стереоскопической модели местности будет:

$$L_{i,i+1} = \frac{B_{\Phi}}{p_i p_{i+1}} \cdot \sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 \cdot (p_i - p_{i+1})^2} \quad (1)$$

где $L_{i,i+1}$ – длина измеряемой линии ($i, i+1$)

x_{1i}, x_{1i+1} – координаты точек i и $i+1$, измеренные на левом снимке;

p_i, p_{i+1} – продольные параллаксы i и $i+1$.

Контроль измерения величин $L_{i,i+1}$ можно выполнить по следующим зависимостям:

$$L'_{i,i+1} = \frac{B_{\Phi} \cdot (x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot \cos \alpha_{i,i+1}^0} \quad (2)$$

и

$$L''_{i,i+1} = \frac{B_{\Phi} \cdot (p_i - p_{i+1}) \cdot f_k}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot \sin \alpha_{i,i+1}^0} \quad (3)$$

где $\alpha_{i,i+1}^0$ – дирекционный угол измеряемой длины линии.

Величину $\alpha_{i,i+1}^0$ можно получить по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_{i,i+1}^0 = \frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1}} \quad (4)$$

откуда $\alpha_{i,i+1}^0$ будет равен:

$$\alpha_{i,i+1}^0 = \operatorname{arctg} \left[\frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1}} \right] \quad (5)$$

Подставляя в формулы (45) и (46) вместо $\alpha_{i,i+1}^0$ его значение из (48), получим в окончательном виде зависимости для определения $L'_{i,i+1}$ и $L''_{i,i+1}$, которые будут иметь вид:

$$L'_{i,i+1} = \frac{B_{\Phi} \cdot (p_i - p_{i+1}) \cdot f_k}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1}} \right]} \quad (6)$$

и

$$L''_{i,i+1} = \frac{B_{\Phi} \cdot (p_i - p_{i+1}) \cdot f_k}{p_i \cdot p_{i+1} \cdot \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{f_k \cdot (p_i - p_{i+1})}{x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1}} \right]} \quad (7)$$

Окончательное значение измеряемой величины $L_{i,i+1}$ будет равно среднему арифметическому из определений $L'_{i,i+1}$ и $L''_{i,i+1}$. Оценку точности выполненных измерений $L_{i,i+1}$ с использованием стереоскопической модели местности по материалам наземной стереофотограмметрии можно сделать по формуле (56).

Одним из основных элементов кривых лесовозных автомобильных дорог является их радиус R . При обследовании закруглений дорог с целью их реконструкции очень важным являются вопросы определения радиуса кривых. В связи с тем, что на существующей дороге непосредственное определение радиусов кривых (горизонтальных и вертикальных) вызывает значительные затруднения, а в большинстве случаев является опасным для исполнителей видом работ, то возникает задача по использованию косвенных методов измерений для отыскания R . От значений радиусов (горизонтальных и вертикальных) кривых лесовозных автомобильных дорог, а также от величин достаточной точности его определения, зависит выбор проектных решений при реконструкции закруглений лесовозных автомобильных дорог, а также разработка мер по их эффективной эксплуатации.

Радиус горизонтальных кривых лесовозных автомобильных дорог по материалам наземной стереофотограмметрии можно получить по следующей формуле (рисунок 1):

$$R_i^r = \frac{a}{2 \sin \alpha} \quad (8)$$

где R^r – радиус горизонтальной кривой;

a – хорда СВ;

α – горизонтальный угол, образованный хордами АВ и АС.

В формуле (8) неизвестными параметрами являются величины a и α , которые можно получить по материалам наземной стереофотограмметрии. Так, длина хорды СВ и равная, а для нормального случая съемки (рисунок 1) будет равна:

$$a = \frac{B\Phi \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 \cdot (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{p_{i+1} \cdot p_{i+2}} \quad (9)$$

где x_{1i+1}, x_{1i+2} – координаты точек $i+1$ и $i+2$ кромок покрытия, измеренные на левом снимке;

p_{i+1}, p_{i+2} – продольные параллаксы точек и кромок покрытия.

Для определения величины угла α воспользуемся известной из аналитической геометрии формулой:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

где b – хорда АС;

c – хорда АВ.

В формуле величины хорд АС и АВ являются неизвестными, тогда применительно к нормальному

$$c = \frac{B\Phi \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 \cdot (p_i - p_{i+2})^2}}{p_i \cdot p_{i+2}} \quad (11)$$

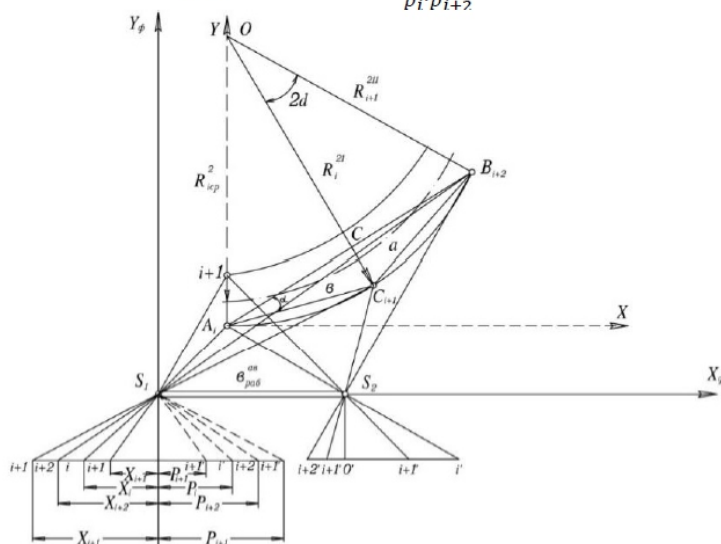


Рис. 1. Определение радиусов горизонтальных кривых методом наземной стереофотограмметрии

$$b = \frac{B\Phi \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 \cdot (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (12)$$

где $x_{1i}, x_{1i+1}, x_{1i+2}$ – координаты точек, измеренные по кромке покрытия.

Подставляя в формулу (10) величины хорд АС и АВ, полученных соответственно по формулам (11) и (12), найдем значение угла α , который равен:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right) \quad (13)$$

Радиус горизонтальной кривой дороги на основании формулы (8) после подстановки в нее вместо a из (9), а вместо α формулы (13), будем иметь:

$$R_i^r = \frac{B\Phi \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 \cdot (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{2p_{i+1} \cdot p_{i+2} \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right) \right]} \quad (14)$$

Определять величину R_i^r можно как по внутренней, так и по внешней кромкам покрытия, целесообразно измерять его дважды (один раз по внутренней $R_i^{r'}$ и по внешней $R_i^{r''}$), а окончательное получать горизонтальный радиус кривой как среднее арифметическое из этих определений (R_{icp}^r).

Выполним оценку точности определения радиусов горизонтальных кривых лесовозных автомобильных дорог геодезическим методом и методом наземной стереофотограмметрии. С этой целью продифференцируем зависимость (8) по параметрам a и α , тогда получим:

$$\partial R = \frac{a}{2 \sin \alpha} \cdot \left(\frac{\partial a}{a} \cdot \frac{\partial \alpha}{\tan \alpha \cdot p'} \right) \quad (15)$$

В формуле (15), перейдя от дифференциалов к квадратам средних квадратических погрешностей, будем иметь:

$$m_R^2 = R^2 \left[\left(\frac{m_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{m_\alpha}{\tan \alpha \cdot p'} \right)^2 \right] \quad (16)$$

На основании (16) средняя квадратическая погрешность определения радиуса кривой будет:

$$m_R = R \sqrt{\left(\frac{m_a}{a} \right)^2 + \left(\frac{m_\alpha}{\tan \alpha \cdot p'} \right)^2} \quad (17)$$

где m_a – средняя квадратическая погрешность измерения хорды a ;

m_α – средняя квадратическая погрешность измерения угла α ;

p' – величина радиана в минутах.

Анализ полученной зависимости (17) показывает, что точность определения R будет в основном зависеть от его длины и a . Принимая во внимание, что в наземной стереофотограмметрии угол α не измеряют, а вычисляют на основании косвенных измерений, и подставив в (17) вместо m_α из (56), будем иметь:

$$m_R = \frac{R \cdot Y_{\max}^2 \cdot m_p}{v_\Phi \cdot f_k^2 \cdot a} \cdot \sqrt{2(x_1^2 \cos^2 \Psi + f_k^2 \cdot \sin^2 \Psi)} \quad (18)$$

В формуле (78) величина $\frac{Y_{\max}^2 \cdot m_p}{v_\Phi \cdot f_k^2}$ равна m_y , тогда можно записать:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y}{f_k \cdot a} \cdot \sqrt{2(x_1^2 \cos^2 \Psi + f_k^2 \cdot \sin^2 \Psi)} \quad (19)$$

В случае, если базис фотографирования расположен параллельно измеряемой линии a при $\Psi=0^\circ$, формула (19) примет следующий вид:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y \cdot x_1 \cdot \sqrt{2}}{f_k \cdot a} \quad (20)$$

В случае, если v_Φ расположен перпендикулярно измеряемой линии a , при $\Psi^0 = 90^\circ$, формула (19) будет:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y \cdot \sqrt{2}}{a} \quad (21)$$

В общем случае, при $\Psi^0 = 45^\circ$ будем иметь формулу для расчета точности определения радиусов кривых дорог по материалам наземной стереофотограмметрии с использованием стереоскопической местности:

$$m_R = \frac{R \cdot m_y}{a} \cdot \sqrt{x_1^2 + f_k^2} \quad (22)$$

Выполним сравнительный анализ точности определения R по стереомодели местности для $\Psi^0 = 0^\circ$ и $\Psi^0 = 90^\circ$, используя полученные зависимости (20) и (21). Численные значения m_R при $R=25-250$ метров, $x_1=80$ мм, $f_k=195$ мм и $m_y=0,25-1,00$ м сведем в таблицу 1.

Анализ полученных данных в таблице 1 показывает, что среднее квадратические погрешности определения радиусов кривых будут иметь наименьшее значение при расположении базиса фото-видео фиксации примерно параллельно измеряемой хорде a , при других значениях Ψ^0 точность измерений будет падать. Однако такое расположение базиса фотографирования повлечет за собой увеличение объемов съемочных работ, что в конечном итоге будет сказываться на продвижении полевых работ. Поэтому целесообразно при выполнении съемочных работ базис фото-видео фиксации располагать на обочинах дороги ($\Psi^0 = 90^\circ$), а оценку точности выполнять по формуле (21). В таком случае, как показывают данные, приведенные в таблице 1, точность определения радиуса также будет вполне приемлемой.

Результаты

При обследовании лесовозных автомобильных дорог возникает очень часто задача по определению вертикальных радиусов кривых (выпуклых и вогнутых). Для определения вертикального радиуса

выпуклой кривой по материалам наземной стереофотограмметрической съемки (рисунок 2) можно использовать формулу:

$$R_i^B = \frac{L^2}{2 \cdot i} \quad (23)$$

где R_i^B – радиус вертикальной выпуклой кривой;

L – величина расстояния видимости встречного автомобиля;

i – высота луча зрения водителя (1,2м).

Таблица 1 - Средние квадратические погрешности m_R полученные для случаев при $\Psi^0 = 0^0$ и $\Psi^0 = 90^0$.

R,м	$m_R, \text{м}$							
	$\Psi^0 = 0^0$				$\Psi^0 = 90^0$			
	m_y				m_y			
	0,25	0,50	0,75	1,00	0,25	0,50	0,75	1,00
25	0,04	0,07	0,11	0,14	0,08	0,17	0,25	0,34
50	0,08	0,14	0,22	0,28	0,16	0,34	0,50	0,68
100	0,14	0,28	0,42	0,56	0,35	0,70	1,05	1,40
125	0,18	0,36	0,54	0,72	0,43	0,87	1,30	1,74
250	0,36	0,72	1,08	1,44	0,87	1,75	2,62	3,50

Величину расстояния видимости L можно определить как длину хорды АВ, которая будет равна:

$$L = \frac{B_\Phi \cdot \sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (24)$$

где x_{1i}, x_{1i+1} – координаты точек i и $i + 1$, измеренные по кромке покрытия на левом снимке;

p_{i+1}, p_i – продольные параллаксы точек $i + 1$ и i .

Подставляя в формулу (59) вместо L ее значение из (24), будем иметь зависимость для определения вертикального радиуса выпуклой кривой с использованием материалов наземной стереофотограмметрии, которая равна:

$$R_i^B = \frac{B_\Phi^2 (x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}{2,4 \cdot p_i^2 \cdot p_{i+1}^2} \quad (25)$$

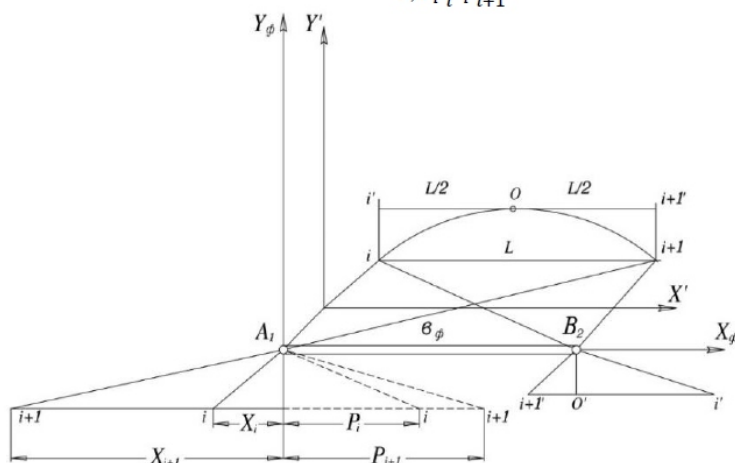


Рис. 2. Определение радиусов выпуклых кривых методом наземной стереофотограмметрии

Оценку точности определения вертикального радиуса выпуклой кривой можно получить по следующей зависимости:

$$m_{R^B} = \frac{Y_{\max}^2 \cdot L \cdot m_p \sqrt{2(x_1^2 \cos^2 \Psi^0 + f_k^2 \sin^2 \Psi^0)}}{B_\Phi \cdot f_k^2 \cdot i} \quad (26)$$

Для определения вертикального радиуса вогнутой кривой воспользуемся рисунком 3, из которого можно вывести зависимость для R_i^B , которая будет иметь следующий вид:

$$R_i^B = \frac{a}{2 \sin \alpha^0} \quad (27)$$

где R_i^B – радиус вертикальной вогнутой кривой;

a – хорда;

α – вертикальный угол, образованный хордами c и b и равный разности углов наклона этих хорд ($\alpha_1^0 - \alpha_2^0$).

Величину хорды a можно получить по формуле (9) которая имеет аналогичный вид и для этого типа кривой. Значение угла наклона можно получить по формуле:

$$\sin \alpha^0 = \frac{h_{i,i+1}}{L_{i,i+1}} \quad (28)$$

где $L_{i,i+1}$ – наклонное расстояние между определяемыми точками i и $i+1$ дороги;

$h_{i,i+1}$ – превышение между определяемыми точками i и $i+1$ дороги.

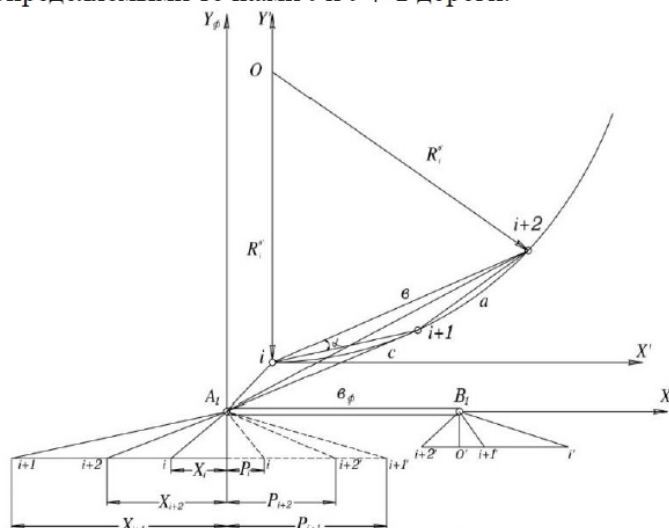


Рис. 3. Определение радиусов вогнутых кривых методом наземной стереофотограмметрии

Величину $L_{i,i+1}$ можно получить по формуле 26 в наземной стереофотограмметрии для нормального случая съемки будет:

$$h_{i,i+1} = \frac{B_f(z_{1i+1} \cdot p_i - z_{1i} \cdot p_{i+1})}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (29)$$

где z_{1i}, z_{1i+1} – координаты точек i и $i+1$ по кромке покрытия на левом снимке;

p_i, p_{i+1} – параллаксы точек i и $i+1$.

Вертикальный угол α^0 будет равен разности углов наклона хорды AC минус угол наклона хорды AB (рисунок 3), тогда для α^0 можно записать:

$$\alpha^0 = \alpha_1^0 - \alpha_2^0 \quad (30)$$

где α_1^0 – угол наклона хорды AC ;

α_2^0 – угол наклона хорды AB .

Тогда для углов наклона хорд AC и AB на основании (29) и после подстановки в нее вместо $L_{i,i+1}$ из формулы (9), а вместо α^0 из формулы (30) можно привести зависимости для определения α_1^0 и α_2^0 , которые будут иметь вид:

$$\alpha_1^0 = \arcsin \left[\frac{(z_{1i+2} \cdot p_i - z_{1i} \cdot p_{i+2})}{\sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+2})^2}} \right] \quad (31)$$

и

$$\alpha_2^0 = \arcsin \left[\frac{(z_{1i+1} \cdot p_i - z_{1i} \cdot p_{i+1})}{\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}} \right] \quad (32)$$

Подставляя в формулу (27) вместо α^0 его значение согласно (30), (32), а вместо $L_{i,i+1}$ из (9) получим зависимость для определения вертикального радиуса вогнутой кривой по материалам наземной стереофотограмметрии, которая в окончательном виде будет:

$$R_i^B = \frac{B_f \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{2 p_{i+1} \cdot p_{i+2} \cdot \sin \alpha^0} \quad (33)$$

Оценку точности определения радиусов вогнутых вертикальных кривых, на основании полученной зависимости (26) можно выполнять по формуле:

$$m_{R_i'} = \frac{B_{\Phi} \cdot m_y}{f_k} \cdot \sqrt{2(z_1^2 \cos^2 \Psi^0 + f_k^2 \sin^2 \Psi^0)} \quad (34)$$

При изыскания лесовозных автомобильных дорог на реконструкцию, наряду с определением их элементов: ширины земляного полотна (проезжей части) лесовозной автомобильной дороги, радиусов горизонтальных и вертикальных кривых, очень важным является определение главных точек кривых (начала и конца). Это обусловлено необходимостью обследования существующей дороги с точки зрения безопасности движения на ней.

Определение положения начала и конца кривой непосредственно в полевых условиях представляет собой довольно сложную и трудоемкую задачу. Существующие способы определения главных точек кривой, однако предполагают выполнение инструментальных геодезических работ. Поэтому наиболее рациональным способом определения главных точек кривой будет тот, при котором все измерительные операции будут вестись в камеральном процессе и с достаточной для дальнейшего проектирования точностью. Для определения главных точек кривой (начало и конец) предлагается аналитический способ с использованием материалов наземной стереофотограмметрической съемки, который основывается на получении полярных координат (r , φ и β) этих точек кривой.

Сущность аналитического способа заключается в следующем. Начало и конец закругления рассматривается с математической точки зрения как точки касания прямой к окружности (рисунок 4). Определение r , φ , β предусматривается выполнять в полярной системе координат, где точка O есть полюс, а отрезок ON полярная ось (рисунок 4) и уравнение касательно к кривой можно представить в следующем виде:

$$r = \frac{P}{\cos(\varphi + \beta)} \quad (35)$$

где r – радиус – вектор (расстояние от полюса до точки начала или конца кривой);

P – кратчайшее расстояние от полюса к прямой касательной;

φ – угол между радиусом – вектором и полярной осью;

β – угол между радиусом-вектором и произвольно взятой хордой OA на кривой.

Уравнение окружности в полярной системе координат в этом случае будет иметь следующий вид:

$$r = 2R_i^r \cdot \sin(\varphi + \alpha) \quad (36)$$

R_i^r – радиус горизонтальной кривой;

α – угол между касательной в точке полюса O и произвольно взятой хордой OA на кривой.

Итак, для определения положения начала (конца точки M) необходимо определить полярные координаты точки M , а именно величину полярного угла ($\varphi + \beta$) и длину радиуса – вектора r . Приравняв в формулах (35) и (36) правые части и выполнив некоторые преобразования, получим зависимость для определения полярного угла $\varphi + \beta$, которая будет иметь вид:

$$\sin(2\varphi + \alpha + \beta) = \frac{P}{R_i^r} - \sin(\alpha - \beta) \quad (37)$$

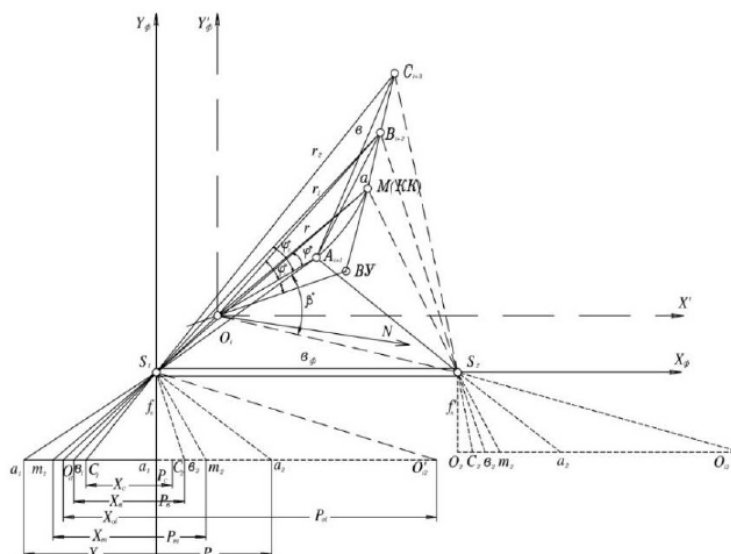


Рис. 4. Определение координат начала (конца) кривых методом наземной стереофотограмметрии

На основании формулы (30) угол φ будет равен:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{P}{R_l^i} - \sin(\alpha - \beta) \right] \quad (38)$$

В полученной формуле 38 для определения угла φ , однако необходимо установить зависимости для величин P , φ и β . Кратчайшее расстояние от полюса к прямой касательной P можно определить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} r_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta) = P \\ r_2 \cdot \cos(\varphi_2 + \beta) = P \end{cases} \quad (39)$$

где r_1 – расстояние от полюса точки O к произвольно взятой точке B на прямой,

r_2 – расстояние от полюса точки O к другой произвольно взятой точке C на прямой;

φ_1, φ_2 – углы между произвольно взятой хордой OA на кривой, и величинами расстояний соответственно OB и OC .

В формуле (39) выполним обозначения вместо $\varphi_1 + \beta = x$ и $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$, тогда систему уравнений можно будет представить в таком виде:

$$\begin{cases} r_1 \cdot \cos x = P \\ r_2 \cdot \cos(\varphi + x) = P \end{cases} \quad (40)$$

Выполнив в 40 некоторые преобразования и подставив вместо:

$$r_2 \cdot (\cos x \cdot \sin \varphi - \sin x \cdot \cos \varphi) = P$$

$$\sin x = \sqrt{1 - \frac{P_2}{r_2}} \text{ и } \cos x = \frac{P}{r_1}$$

получим следующее уравнение:

$$\frac{r_2}{r_1} \cdot \cos \varphi - r_2 \cdot \sin \varphi \cdot \sqrt{\frac{1}{P_2} - \frac{1}{r_2}} = 1 \quad (41)$$

Величина P из уравнения (41) будет равна:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{r_1} - \frac{1}{r_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \right]^2 + \frac{1}{r_1^2}}} \quad (42)$$

Для определения расстояний r_1 и r_2 , а также углов φ_1 и φ_2 воспользуемся выше приведенной зависимостью для измерения линейных параметров дорог (1), на основании которой можно получить следующие формулы:

$$r_1 = \frac{B_{\Phi} \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{p_i \cdot p_{i+2}} \quad (43)$$

$$r_2 = \frac{B_{\Phi} \sqrt{(x_{1i+3} \cdot p_{i+1} - x_{1i} \cdot p_{i+3})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+3})^2}}{p_i \cdot p_{i+3}} \quad (44)$$

$$l = \frac{B_{\Phi} \sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (45)$$

Величина углов φ_1 и φ_2 можно получить из известной из тригонометрии теоремы косинусов, откуда для φ_1 , φ_2 формулы будут иметь вид:

$$\varphi_1 = \arccos \left(\frac{r_1^2 + l^2 - a^2}{2r_1 \cdot l} \right) \quad (46)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{r_2^2 + l^2 - b^2}{2r_2 \cdot l} \right) \quad (47)$$

Длина хорд a , b и l в формулах (46) и (47) можно получить так:

$$a = \frac{B_{\Phi} \sqrt{(x_{1i+2} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+2})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+2})^2}}{p_{i+1} \cdot p_{i+2}} \quad (48)$$

$$b = \frac{B_{\Phi} \sqrt{(x_{1i+3} \cdot p_{i+1} - x_{1i+1} \cdot p_{i+3})^2 + f_k^2 (p_{i+1} - p_{i+3})^2}}{p_{i+1} \cdot p_{i+3}} \quad (49)$$

$$c = \frac{B_{\Phi} \sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}}{p_i \cdot p_{i+1}} \quad (50)$$

Получив зависимости для определения P и φ согласно (42) и (46), величину угла β можно рассчитать по формуле

$$\beta = \arccos \left(\frac{P}{r_1} - \varphi_1 \right) \quad (51)$$

Для угла α можно из рисунка 4 записать:

$$\alpha = \arcsin \frac{l}{2 \cdot R_i^r} \quad (52)$$

Заключение

Таким образом для определения координат положения начала (конца) закругления необходимо выполнить следующие подготовительные операции:

- определить радиус горизонтальной кривой R_i^r ;
- определить длины хорд r_1, r_2, l, a и b и углов φ_1 и φ_2 ;
- определить полярные координаты по формулам (35), (38), (11).

Зная координаты положения начала и конца кривой можно без особого труда получить координаты середины кривой и вершины угла поворота трассы, а также вычислить остальные элементы кривой (тангенс, биссектрису, домер) по известным зависимостям.

Одним из основных геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог, кроме перечисленных выше, является уклон дороги $i_{тр}$. При обследовании дорог уклон $i_{тр}$ определяют с целью установления соответствия проектного решения, выполненному строительству и оценке качества дорожно-строительных работ. При этом особое внимание следует обращать на достоверность и качество (точность) получаемой информации о дороге в результате обследования ее, с целью получения уклона $i_{тр}$. Рассмотрим определения величин уклонов $i_{тр}$ углов наклона $\nu_{тр}^0$ дорог по материалам наземной стереофотограмметрии применительно к нормальному случаю съемки. Величину уклона $i_{тр}$ дороги можно получить по известной формуле

$$i_{тр} = \frac{h}{S} tg \nu_{тр}^0 \quad (53)$$

где $i_{тр}$ – уклон дороги;

$\nu_{тр}^0$ – угол наклона дороги.

В связи с тем, что непосредственно по материалам наземной стереофотограмметрии величину угла наклона $\nu_{тр}^0$ дороги определить невозможно, то с этой целью обратимся к формуле (29), откуда $\nu_{тр}^0$ равен:

$$\nu_{тр}^0 = \arcsin \left[\frac{(z_{1i} \cdot p_{i+1} - z_{1i+1} \cdot p_i)}{\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}} \right] \quad (54)$$

Подставляя (14) в формулу (13) вместо $\nu_{тр}^0$, получим зависимость для определения уклона дороги $i_{тр}$ методом наземной стереофотограмметрии, которая имеет вид:

$$i_{тр} = tg \left[\arcsin \frac{(z_{1i} \cdot p_{i+1} - z_{1i+1} \cdot p_i)}{\sqrt{(x_{1i+1} \cdot p_i - x_{1i} \cdot p_{i+1})^2 + f_k^2 (p_i - p_{i+1})^2}} \right] \quad (55)$$

где z_{1i}, z_{1i+1} – координаты точек i и $i + 1$, измеренные на левом снимке;

p_i, p_{i+1} – продольные параллаксы точек i и $i + 1$

Оценку точности определения уклона дороги $m_{i_{тр}}$ Методом наземной стереофотограмметрии можно выполнить по следующей формуле:

$$m_{i_{тр}} = \frac{\sqrt{2 \left(\frac{y_{max}^2 \cdot m_x^2}{f_k^2} + \frac{y_{max}^4 \cdot z_{1i}^2 \cdot m_p^2}{v_{\Phi} \cdot f_k^2} \right)}}{S_{i,i+1} \cdot \cos^2 \nu_{тр}^0 \cdot S'} \quad (56)$$

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что материалы наземной стереофотограмметрической съемки позволяют получить объективную и качественную информацию о лесовозной автомобильной дороге, перенести трудоемкие измерительные операции в камеральный процесс, автоматизировать изыскательские работы.

Результаты проведенных исследований для всех состояний системы совершенствования геометрического контроля строительства дорожных закруглений позволили установить, что при разбивке

и контроле строительства дорожных кривых примененной кривизны необходимо принимать разбивочные интервалы неодинаковыми по длине, обратно пропорциональными кривизне участка. Это позволяет сократить количество разбивочных знаков, измерений и построений и в то же время повысить эффективность и качество разбивочно-контрольных и дорожно-строительных работ.

Разработанный метод позволил сократить количество исполнителей и время выполнения работ, улучшить количество и качество получаемой информации о лесовозной автомобильной дороге, которые будут использованы при выборе нового направления трассы, существенным образом автоматизировать изыскательский процесс при выполнении работ.

На основании теоретического анализа геометрических параметров и динамических свойств тормозных кривых, выполненного для математического обеспечения комбинированного метода разбивки и контроля строительства примыканий и съездов, выяснено, что эти кривые не в полной мере обеспечивают безопасность и экономичность движения транспорта. В связи с этим выведены и проанализированы движения транспорта, проанализированы уточненные параметрические уравнения тормозных переходных кривых соответствующие реальным траекториям движения лесовозного автопоезда на поворотах с плавным изменением скорости. Уточненные кривые позволят повысить технико-экономические показатели, безопасность и комфортабельность движения на участках примыкания и съездов и сократить строительные затраты.

Литература

1. Козлов В.Г. Экспериментальные исследования сезонных изменений интенсивности подвижного состава автомобильного транспорта // Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК: материалы национальной научно-практической конференции Воронежского государственного аграрного университета им. императора Петра I. - 2019. - С. 317-326.

2. Курьянов В.К. Автоматизированная обработка результатов полевых измерений при оценке геометрических параметров лесовозных автомобильных дорог // Депонированная рукопись № 182-B2005 08.02.2005.

3. Курьянов В.К., О.Н. Бурмистрова, А.В. Скрыпников Анализ расчетных и экспериментальных данных по допустимым скоростям движения // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: межвузовский сборник научных трудов. - Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2000. - С. 70-75.

4. Курьянов В.К., С.И. Сушков, А.В. Скрыпников Введение в теорию массового обслуживания с ожиданием применительно к движению лесовозного транспорта // Повышение эффективности лесозаготовок малолесных районов России: межвузовский сборник научных трудов по материалам Международной конференции. - 2002. - С. 129-132.

5. Курьянов В.К., А.В. Скрыпников, Е.В. Кондрашова Комплекс эюр транспортно эксплуатационных характеристик дороги-основа оценки проектных решений // Лесоэксплуатация. - Красноярск: ГОУ ВПО "Сибирский государственный технологический университет", 2004. - С. 248-254.

6. Курьянов В.К., А.В. Скрыпников, В.А. Борисов; под общей редакцией профессора Камусина А.А. Лесотранспорт как система водитель-автомобиль- дорога-среда: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированного специалиста 250400 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств по специальности 250401 Лесоинженерное дело. - Москва: Московский государственный университет леса, 2010.

7. Курьянов В.К. Математическая обработка результатов полевых измерений при нивелировании для оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог // Депонированная рукопись № 248-B2005 21.02.2005.

8. Курьянов В.К., З.Н. Нахаев, А.В. Скрыпников Математические модели техногенного воздействия автомобильных дорог на экосистемы придорожной полосы // Депонированная рукопись № 571-B2003 28.03.2003.

9. Курьянов В.К., О.Н. Бурмистрова, А.В. Скрыпников Методика расчета допустимых скоростей на участках с ограниченной видимостью в профиле // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: межвузовский сборник научных трудов. - Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2000. - С. 65-69.

10. Боровлев А.О., Торопцев В.В., В.В.Никитин В.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В. Выбор центрально-проецирующего аппарата пространственных кривых при проектировании лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. - 2021. - № 7. - С. 51-54.

11. Микова Е.Ю., Никитин В.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Высоцкая И.А., Тимофеев В.А., Щербаков Е.Д. Графо-аналитический метод построения перспективных изображений лесовозных автомобильных дорог // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции. - Воронеж, 2020. - С. 225-229.

12. Логойда В.С., Букреев В.Ю., Дрыга И.А., Тихомиров П.В., Никитин В.В. Исследование работоспособности метода индивидуального прогнозирования // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. - 2019. - С. 317-322.

©Тихомиров П.В. – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой транспортотехнологических машин и сервиса, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (ФГБОУ ВО «БГИТУ»), e-mail: vtichomirov@mail.ru; Швецова В.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; Саранов И.А. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности, e-mail: mr.saranov@mail.ru; Сапелкин Р.С. – преподаватель цикловой комиссии информационных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»), e-mail: charls5796@mail.ru; Брюховецкий А.Н. – докторант кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», e-mail: ABN1985@inbox.ru; Щербаков Е.Д. – экстерн кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», e-mail: ESD88@inbox.ru.

UDC 630.383

DETERMINATION OF GEOMETRIC ELEMENTS OF LOGGING HIGHWAYS USING INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS

P.V. Tikhomirov, V.V Shvetsova, A.B. Bondarev, I.A. Saranov, R.S. Sapelkin

The article is devoted to research on determining the detail of the breakdown and control of the construction of road curves by various methods, in this case with the help of information and intelligent systems. The breakdown intervals used in practice sometimes provide either insufficient or excessive detail of the breakdown. Thus, insufficient detail leads to inaccuracies, deviations from the design geometric parameters of the curves, which leads to a deterioration in the operational quality of the logging road, technical and economic indicators and traffic safety. Excessive detail leads to a decrease in the productivity of center-control work, a delay in the flow-construction process, an unjustifiably large number of center signs that are inevitably destroyed, subject to restoration and interfering with the work of road construction machines and mechanisms. Thus, this article presents the results of research to determine the optimal intervals for detailed breakdown and control of the construction of road curves of variable and constant curvature.

Keywords: stereophotogrammetry, stereoscopic model, curve, geodetic method.

References

1. Kozlov V.G. [Experimental studies of seasonal changes in the intensity of rolling stock of motor transport. New technologies and technical means for the effective development of the agro-industrial complex] Materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. Imperatora Petra I [Materials of the national scientific and practical conference of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I.] - 2019. - pp. 317-326. (In Russ.).

2. Kuryanov V.K. [Automated processing of field measurement results in the assessment geometric parameters of logging roads] Deponirovannaya rukopis' [Deposited manuscript] No. 182-B2005 08.02.2005. (In Russ.).

3. Kuryanov V.K., O.N. Burmistrova, A.V. Skrypnikov [Analysis of calculated and experimental data on permissible speeds of movement. Mathematical modeling, computer optimization of technologies, parameters of equipment and management systems of the forest complex] *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov* [Interuniversity collection of scientific papers] 2000. - pp. 70-75. (In Russ.).

4. Kuryanov V.K., S.I. Sushkov, A.V. Skrypnikov [Introduction to the theory of queuing with expectation in relation to the movement of logging transport. Improving the efficiency of logging in low-forest areas of Russia] *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj konferencii* [Interuniversity collection of scientific papers based on the materials of the International Conference] - 2002. - pp. 129-132. (In Russ.).

5. Kuryanov V.K., A.V. Skrypnikov, E.V. Kondrashova [A set of diagrams of transport and operational characteristics of the road-the basis for evaluating design solutions] *Lesoekspluatatsiya* [Lesoexploitation] 2004. - pp. 248-254. (In Russ.).

6. Kuryanov V.K., A.V. Skrypnikov, V.A. Borisov; under the general editorship of Professor Kamusin A.A. [Forest transport as a driver-car-road-environment system] *Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihся po napravleniyu podgotovki diplomirovannogo specialista 250400 Tekhnologiya lesozagotovitel'nyh i derevopererabatyvayushchih proizvodstv po special'nosti 250401 Lesoinzhenernoe delo* [A textbook for university students studying in the direction of training a certified specialist 250400 Technology of logging and wood processing industries in the specialty 250401 Forest engineering] 2010. (In Russ.).

7. Kuryanov V.K. [Mathematical processing of the results of field measurements during leveling to assess the transport and operational qualities of logging roads] *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript] No. 248-B2005 02.21.2005. (In Russ.).

8. Kuryanov V.K., Z.N. Nakhaev, A.V. Skrypnikov [Mathematical models of the technogenic impact of highways on the ecosystems of the roadside strip] *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript] No. 571-B2003 28.03.2003. (In Russ.).

9. Kuryanov V.K., O.N. Burmistrova, A.V. Skrypnikov [Methodology for calculating permissible speeds in areas with limited visibility in the profile. Mathematical modeling, computer optimization of technologies, equipment parameters and control systems of the forest complex] *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov* [Interuniversity collection of scientific papers] 2000. - pp. 65-69. (In Russ.).

10. Borovlev A.O., Toroptsev V.V., V.V. Nikitin V.V., Tikhomirov P.V., Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V. [The choice of the central projection apparatus of spatial curves in the design of logging highways] *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines] 2021. - No. 7. - pp. 51-54. (In Russ.).

11. Mikova E.Yu., Nikitin V.V., Tikhomirov P.V., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Timofeev V.A., Shcherbakov E.D. [Grapho-analytical method of constructing perspective images of logging highways. Mechanization and automation of technological processes in agricultural production] *Materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Materials of the national scientific and practical conference] 2020. - pp. 225-229. (In Russ.).

12. Logoida V.S., Bukreev V.Yu., Dryga I.A., Tikhomirov P.V., Nikitin V.V. [Investigation of the efficiency of the individual forecasting method. Innovative technologies and technical means for agriculture] *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh i specialistov* [Materials of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists] 2019. - pp. 317-322. (In Russ.).

©**Tikhomirov P.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technological Machines and Services of Transport, Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE), e-mail: vtichomirov@mail.ru; **Shvetsova V.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Saranov I.A.** – PhD in Engineering sciences, Senior Lecturer of the Department of Information Security, Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), e-mail: mr.saranov@mail.ru; **Sapelkin R.S.** – Teacher of the cycle commission of information technologies, VSUET, e-mail: charls5796@mail.ru; **Bryukhovetskiy A.N.** – PhD student of the Department of Intellectual Security, VSUET, e-mail: ABN1985@inbox.ru; **Shcherbakov E.D.** – external student of the Department of Information Security, VSUET, e-mail: ESD88@inbox.ru.

УДК 630.383

КРИВАЯ «НОВОГО ТИПА» ИЛИ КАДИОДИДА, ТОРМОЗНАЯ КРИВАЯ И КЛОТОИДА

П.В. Тихомиров, В.В. Швецова, И.А. Саранов, Р.С. Сапелкин, А.Н. Брюховецкий, Е.Д. Щербаков

Статья посвящена криволинейным участкам, во многом определяющим уровень технико-экономических показателей и безопасности движения транспорта. Разбивке подлежат петлеобразные и прямые левоповоротные съезды, характеризующиеся сложным сочетанием горизонтальных и вертикальных кривых. В качестве вертикальной кривой чаще всего здесь применяется квадратная парабола, горизонтальными кривыми являются наиболее отвечающие реальным условиям движения на левоповоротных съездах – тормозные кривые (серпантин). Представляют интерес плоские пространственные закругления. Эти участки образованы соединением горизонтальной и вертикальной кривых в единую плоско-пространственную кривую. Разбивка таких закруглений непроизводительно делится на вертикальную и горизонтальную. Проектно-изыскательские работы на существующих автомобильных дорогах производятся в основном традиционными геодезическими методами. Таким образом, целью геодезических измерений является пополнение топографической информации о дороге разнообразными данными, связанными с определением геометрических элементов, технико-эксплуатационных показателей и других параметров дороги, которые необходимы проектировщику для принятия оптимального решения. Используя же полученную в результате обработки информацию о дороге в камеральных условиях без дополнительных геодезических работ на объекте исследования. Тем более, что современные достижения в области компьютерных технологий позволяют полностью автоматизировать камеральные процессы, связанные с обработкой материалов наземной стереофотограмметрии.

Ключевые слова: тормозная кривая, центробежная сила, траектория, кривизна, клотоида, кривая, радиус кривизны, элементы тормозной кривой.

Введение

В современном мире особую часть проектирования и разбивки дорожных закруглений занимают переходные кривые, служащие для смягчения влияния центробежной силы, появляющейся при переходе автомобиля с прямолинейного участка на круговой. В рамках данного исследования были выбраны наиболее распространенные математические кривые – клотоида, кадиодида (кривая «нового типа»), тормозная кривая. Данный класс математических кривых имеет свою область применения. Несомненно, целью применения криволинейных участков на практике является повышение уровня технико-экономических показателей и обеспечение безопасности движения транспорта. Одна из основных задач исследования - получение математических зависимостей для определения оптимальных геометрических параметров криволинейных участков лесовозных автомобильных дорог. Кроме того, вопросу о горизонтальных и вертикальных кривых посвящено немало исследований.

Методы и материалы

Белятинским А.А. предложена кривая, характеризующая плавным изменением углового ускорения, что благоприятствует условиям и безопасности движения на кривой. Расчет разбивочных данных этой кривой может быть произведен по уравнениям в прямоугольной системе координат, которые представлены в таком виде:

$$x = \frac{15}{8} R_c \beta \int_0^t \cos \beta t^3 (10 - 15t + 6t^2) dt \quad (1)$$

$$y = \frac{15}{8} R_c \beta \int_0^t \cos \beta t^3 (10 - 15t + 6t^2) dt \quad (2)$$

где R_c – радиус в середине кривой, β – угол поворота; $t = S/L$, где L – длина кривой, S – расстояние от начала кривой до текущей точки.

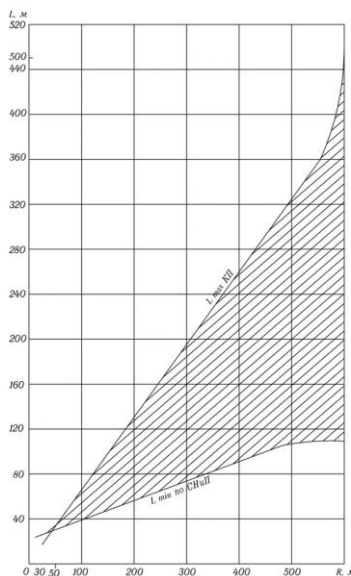


Рис. 1. График ограничений длины кубической параболы (КП) в зависимости от радиуса кривой вставки

При создании этой кривой был предложен новый подход к проектированию переходных кривых для постоянной скорости движения — не выбиралась и не приспособлялась какая-либо известная математическая кривая к условиям движения, но было выведено уравнение новой кривой исходя из реальных условий динамики криволинейного движения транспортной единицы с постоянной линейной скоростью.

Для переменной скорости с подобным подходом были выведены автором уточненные параметрические уравнения тормозной кривой:

$$x = S - \frac{u^2}{4K} \gamma^5 \left(\frac{1}{5} - \frac{\gamma}{18} - \frac{\gamma^2}{10} \right) \quad (3)$$

$$y = \frac{u}{3k} \gamma^3 \left(1 + \frac{\gamma}{4} - \frac{\gamma^2}{10} + \frac{\gamma^3}{4} - \frac{\gamma^4}{56} u^2 \right) \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{1 + KS-1} \quad (5)$$

$$k = \frac{2a}{V_0^2} \quad (6)$$

$$u = \frac{2V_0 - g}{a(V_R - V_0)9.8} \quad (7)$$

где S — расстояние от начала кривой до ее точки, V_0 и V_R — скорости в начале и конце кривой; a — замедление или ускорение.

Подробные исследования, обоснование и вывод уточненных параметрических уравнений тормозной кривой, а также методика разбивки этой кривой будут представлены далее.

Для постоянной скорости движения, несмотря на указанные некоторые преимущества других кривых, в качестве переходной кривой получила наибольшее распространение в практике современного дорожного строительства клотоида.

Тормозная кривая, учитывающая реальное изменение скорости в пределах кривой, занимает особое положение среди переходных кривых, она имеет в отличие от клотоиды ослабленную кривизну и предписывается действующими СНиП для проектирования на сложных пересечениях в целях уменьшения общей площади размещения узла и в целях повышения безопасности движения. Тормозные кривые описаны во многих литературных источниках [1, 2, 3, 4]. Бабков В.Ф. отмечает, что на безопасность движения «наибольшее влияние оказывает не размер радиуса кривой левоповоротного съезда, а обеспечение плавности изменения скорости при переходе с проезжей части дороги на съезд.

Однако, на основании исследований автора установлено, что параметрические уравнения для разбивки тормозных кривых [5, 6, 7, 8, 9] не соответствует оптимальной траектории входа автомобилей на съезды и выхода из них в равномерными ускорением замедлением. Рассмотрим эти уравнения (рисунок 2):

$$x = S - CS^5 \quad (8)$$

$$y = DS^3 - ES^7 \quad (9)$$

$$R = \frac{V_R^2}{2a} \quad (10)$$

$$C = \frac{a^2}{10(V_R - V_0)^2 V_0^6}; \quad (11)$$

$$D = \frac{a^3}{3(V_R - V_0)V_0^3}; \quad (12)$$

$$E = \frac{a^3}{42(V_R - V_0)^3 V_0^9}; \quad (13)$$

где S – расстояние от начала кривой до текущей ее точки; $a = (V_R - V_0)/t$ – замедление или ускорение; $t = L/V_{cp}$ – время движения по кривой, имеющей длину L с конечным радиусом R ;

$$a = \frac{V_R^2 - V_0^2}{2L} \quad (14)$$

V_0, V_R, V_{cp} – скорости (в начале кривой, в конце и средняя).

Разбиваемые по формулам (13), не способствуют в полной мере безопасности движения на кривой. С помощью переходной кривой должно достигаться плавное изменение радиуса от величины ∞ до R и, соответственно, плавное изменение центробежной силы $\Pi = mV^2/R$, действующей на автомобиль в общем и лесовозный автопоезд в частности, однако можно показать, что автомобили двигающиеся от точки НПК по траектории тормозной кривой, разбиваемой по формулам (13), в точке КПК стыка переходной с круговой кривой находятся в аварийной ситуации поскольку получают резкий боковой толчок центробежной силы, достигающей величины более 12 % веса автомобиля (при $g=9,81\text{м/с}^2$). Иными словами, указанная кривая (13), применяемая на развязках в настоящее время не выполняет своих прямых функций. Это явление сильно снижает безопасность движения, требования к безопасности особенно велики, увеличивает износ ходовой части автомобиля и дорожного покрытия и кроме всего прочего создает дискомфорт.

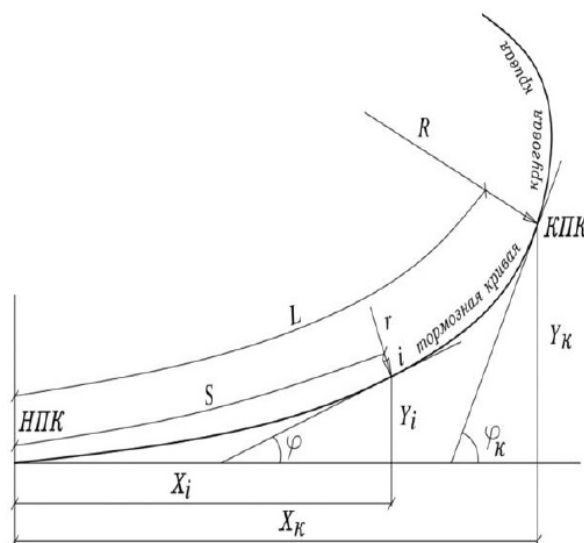


Рис. 2. Элементы тормозной кривой

Проанализируем уравнения (13). Эти уравнения выведены из исходной несколько преобразованной формулы тормозной кривой предложенной Блашке В., выражающей радиус кривизны в текущей точке кривой в функции от расстояния S по кривой до этой точки:

$$r = \frac{(V_0^2 - 2aS)(V_R - V_0)}{2(\sqrt{V_0^2 - 2aS} - V_0)} \quad (15)$$

В этой формуле величина a для частного случая замедления взята по абсолютной величине, и в ней сокращена величина $\frac{9,8}{g}$, что повлияло на размерность. В конце переходной кривой, где $S=L$ и $r=R$, формула (15) приобретает вид:

$$R = \frac{v_R^2}{2} \quad (16)$$

По формуле (16) проектируется радиус последующей круговой кривой [5, 8, 10]. Следовательно, параметрические уравнения (13) должны описывать переходную кривую, имеющую в конечной своей точке, в точке стыка с круговой кривой, радиус кривизны $R = \frac{v_R^2}{2}$. Определим, чему же в действительности в конечной точке равен радиус кривизны кривой (13) с помощью известной в дифференциальной геометрии формулы, определяющей радиус кривизны кривой:

$$r = \frac{1}{\sqrt{(x'')^2 + (y'')^2}} \quad (17)$$

Дифференцируем дважды x и y формул (13)

$$x' = 1 - 5CS^4; \quad (18)$$

$$x'' = -20CS^3; \quad (19)$$

$$y' = 3DS^2 - 7ES^6; \quad (20)$$

$$y'' = 6DS - 42ES^5 \quad (21)$$

Представим коэффициенты D , C и E уравнений (13) в следующем виде:

$$D = \frac{a}{3(v_R - v_0)v_0^3}; \quad C = 0,9D^2; \quad E = \frac{9}{14}D^3 \quad (22)$$

Подставим полученные значения в (21):

$$r = \frac{1}{\sqrt{(6DS - 42ES^5)^2 + 400C^2S^6}} = \frac{1}{\sqrt{36D^2S^2 + 729D^6S^{10} - 324D^4S^6 + 324D^4S^6}}$$

или в конечной точке тормозной кривой, где $S=L$, $r=R$:

$$R = \frac{1}{6DL} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 20,25(DL^2)^4}} \quad (23)$$

Покажем, что второе слагаемое под корнем выражения (23) является величиной пренебрегаемо малой по сравнению с первым слагаемым – единицей. Указанное слагаемое $20,25(DL^2)^4$ с учетом значения D из (22) и выражения (19) представим в виде:

$$20,25(DL^2)^4 = 20,25 \left(\frac{L(v_R + v_0)}{6v_0^3} \right)^4 \quad (24)$$

Отсюда видно, что максимальное значение полученной величины (24) будет достигнуто наименьшем V_0 , при максимальной сумме $(V_R + V_0)$ и при максимальной в этом случае длине L . Наименьшая скорость V_0 перед входом на съезд, при наименьшей расчетной скорости на съезде 36 км/ч (10 м/с), равна

$$V_{0min} = 45 \text{ км/ч} \quad (25)$$

Так как при изменении расчетной скорости на переходной кривой менее, чем на 9 км/ч, отпадает необходимость в устройстве тормозной кривой. Учитывая это обстоятельство, максимальная сумма:

$$36 \text{ км/ч} + 45 \text{ км/ч} = 81 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с} + 12,5 \text{ м/с} = 22,5 \text{ м/с} \quad (26)$$

Длина тормозной кривой L при указанных скоростях, учитывая (27), приобретает максимальное значение при минимальном значении $|a|_{min} = 0,3 \text{ м/с}^2$ [5, 8]:

$$L_{max} = \frac{v_R^2 - v_0^2}{2a} = \frac{10^2 - (12,5)^2}{-0,6} = 93,75 \text{ м} \quad (28)$$

Учитывая (26), (27) и (28), величина (24) приобретает значение 0,02, то есть максимально возможное при проектировании тормозных кривых второе слагаемое под корнем выражения (23) равно 0,02, что дает основание полагать с точностью до 1м:

$$R = \frac{1}{6DL} \quad (29)$$

Подставляя значение D из (22) и значение a из (28), получим:

$$R = \frac{3(V_R - V_0)V_0^3}{6a} * \frac{2a}{V_R^2 - V_0^2} = \frac{V_0^3}{V_R + V_0} \quad (30)$$

Таким будет радиус кривизны в конце кривой, описанной уравнениями (13). но в конце кривой, где $S=L$, $r=R$ исходные формулы (15) и (16), из которых выведены уравнения (13), требуют чтобы радиус был равен $R = \frac{V_R^2}{2}$. На самом же деле имеем (30):

$$R = \frac{V_0^3}{V_R + V_0} \neq \frac{V_R^2}{2} \quad (31)$$

Отсюда видно, что уравнения (13) не достаточно соответствуют исходным формулам тормозной кривой (15) и (16), из которых они были выведены, что подтверждается и численными примерами.

Посмотрим, в какой же степени находится указанное несоответствие кривой (13) реальной траектории движения автомобиля, и как оно влияет на режим движения транспортной единицы. Радиус кривизны в конце тормозной переходной кривой R и радиус круговой кривой $R_{кр}$ должны совпадать по величине (по меньшей мере с точностью до 1-2м), однако в точке КПК кривой (13) мы наблюдаем

$$R = \frac{V_0^3}{V_R + V_0} \neq \frac{V_R^2}{2} \quad (32)$$

или

$$R \neq R_{кр} \quad (33)$$

Найдем отношение этих радиусов

$$\frac{R}{R_{кр}} = \frac{2V_0^3}{V_R^2(V_R + V_0)} = \frac{2n^3}{n+1} \quad (34)$$

где

$$n = \frac{V_R}{V_0} \quad (35)$$

Отсюда можно сделать вывод, что чем больше расчетная разница между начальной и конечной скоростями движения на кривой, тем большее несоответствие формул (13) исходной формуле тормозной кривой, тем более далека кривая (13) от реальной траектории движения автомобиля, что и подтверждается численными примерами. Каков же результат указанного несоответствия? Центробежная сила, ν на автомобиль влияющая в конечной точке переходной кривой, разбитой по формулам (13), когда $R = R_{кр} * \frac{2n^3}{n+1}$ при расчетной скорости движения по съезду $V_R = \sqrt{2R}$, равна:

$$\psi = \frac{PV_R^2}{gR_{кр} * \frac{2n^3}{n+1}} * \nu = \frac{PV_R^2}{g \frac{V_R^2 * 2n^3}{2 * n+1}} * \nu = 0.204p * \frac{n+1}{2n^3} * \nu \quad (36)$$

На круговой кривой в этой же точке $R_{кр} = \frac{V_R^2}{2}$ и центробежная сила равна:

$$\psi_{кр} = \frac{PV_R^2}{g * \frac{V_R^2}{2}} * \nu = 0.204 * P * \nu \quad (37)$$

где ν – коэффициент, снижающий влияние центробежной силы за счет уклона выража i_g :

$$\nu = \frac{\psi - P * i_g}{\psi} = 0.706 \text{ при } i_g = 0,06 \quad (38)$$

Таким образом резкий боковой толчок центробежной силы F , который получает автомобиль на границе между тормозной кривой (13) и круговой при расчетной скорости движения по съезду, равен:

$$F = \psi_{кр} - \psi = 0.204P * \nu - 0.204P * \frac{n+1}{2n^3} * \nu = 0.144P(1 - \frac{n+1}{2n^3}) \quad (39)$$

Если $g=9.8$ м/с², то толчок силы F достигает 5%, 9%, 12% P - веса автомобиля при $n= 1,2; 1,5; 2,0$ соответственно. Чем больше расчетное изменение скорости, то есть, чем меньше радиус круговой кривой, тем больше угроза безопасности движения на кривой, запроектированной по формулам (13).

График изменений центробежной силы, действующей на автомобиль двигающийся по кривой (13), и затем по круговой кривой съезда, наглядно демонстрирует скачок центробежной силы F в точке сопряжения переходной и круговой кривых (рисунок 3). Во избежание этого

толчка автомобили вынуждены, как показывают исследования работ [5, 11, 8], резко снижать скорость до величины ниже расчетной на съезде и выезжать на обочину, что влияет опять-таки на безопасность движения и пропускную способность.

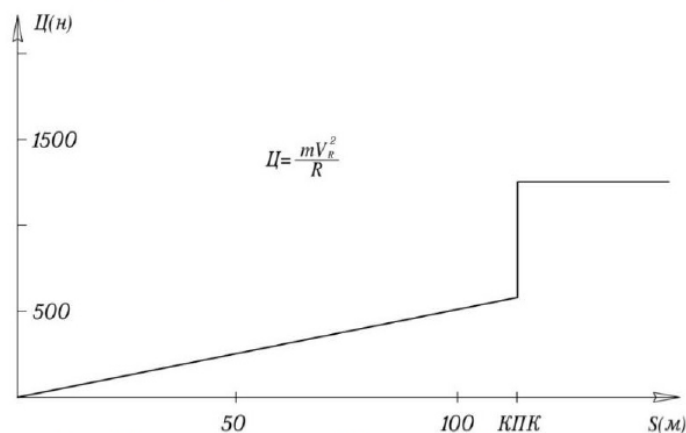


Рис. 3. График изменения центробежной силы, действующей на автомобиль,двигающийся по применяемой в настоящее время кривой

Результаты

Результатами исследования является вывод уточненных параметрических уравнений тормозной кривой с целью повышения технико-экономических показателей и безопасности движения.

Суть вывода можно проследить в следующих рассуждениях и математических преобразованиях.

Сначала преобразуем исходную формулу тормозной кривой (15) из работ [5, 6, 7, 8, 10].

Поскольку замедление $a = (V_R - V_0)/t$, где $t = L/V_{cp}$ – время проезда по кривой, и $V_{cp} = (V_0 + V_R)/2$, то не сложно установить, что длина тормозной кривой равна:

$$L = (V_r^2 - V_0^2)/2a \quad (40)$$

А расстояние S до точки с радиусом r будет равно:

$$S = (V_r^2 - V_0^2)/2a \quad (41)$$

Тогда скорость движения в точке i кривой, где радиус равен r на расстоянии S от ее начала будет

$$V_r = V_0^2 + 2aS \quad (42)$$

В отличие от

$$V_r = V_0^2 - 2aS \quad (26,35,97) \quad (43)$$

Учитывая знак величины a : плюс – ускорение, минус – замедление. Изменение центробежного ускорения происходит в пропорциональной зависимости от продолжительности движения, поэтому

$$\frac{V_r^2}{r} = Qt = \frac{Q(V_r - V_0)}{a} \quad (44)$$

В конце переходной кривой $\frac{V_R^2}{R} = Qt = \frac{Q(V_R - V_0)}{a}$.

Значит коэффициент пропорциональности равен:

$$Q = \frac{V_R^2 a}{R(V_R - V_0)} \quad (45)$$

Подставляя (45), (43) в (44), путем элементарных указанных зависимостей получаем исходную формулу тормозной кривой, отвечающую реальным условиям движения:

$$r = \frac{(V_0^2 + 2aS)(V_r - V_0)}{V_R^2(\sqrt{V_0^2 + 2aS} - V_0)} * R \quad (46)$$

Поскольку допускаемый минимальный радиус кривой равен: $R = \frac{V_R^2}{g(\mu+i_b)}$ то при коэффициенте поперечной силы $\mu=0,15$ и при уклоне выража $i_b=0,06$, радиус в конце тормозной переходной кривой будет равен

$$R = \frac{V_R^2}{2}, (\text{м}) \quad (47)$$

где V_R – выражено в м/с.

Величина $9,8/g$ сокращена, и для простоты дальнейших вычислений ее записывать не будем. Принимая обозначения:

$$k = \frac{2a}{V_0^2} \quad (48)$$

$$u = \frac{2V_0}{a(V_r - V_0)} \quad (49)$$

получим:

$$r = \frac{2}{uk} * \frac{1+ks}{\sqrt{1+ks}-1} \quad (50)$$

В конце тормозной кривой, где $s = L$ и $r = R$, с учетом (42) и (43), уравнение (50) приобретает вид:

$$R = \frac{V_R^2}{2} \quad (51)$$

Известно, что центральный угол, стягиваемый дугой окружности равен длине этой дуги, деленной на радиус. Соответственно выглядит дифференциальное уравнение $d\varphi = \frac{ds}{r}$, решая которое найдем (рисунок 2):

$$\varphi = \int_0^s \frac{ds}{r} = u \{ \sqrt{1+ks} - \frac{1}{2} \ln(1+ks) - 1 \} \quad (52)$$

Для нахождения декартовых координат x и y решаем дифференциальные уравнения

$$dx = ds \cos \varphi \quad (53)$$

$$dy = ds \sin \varphi \quad (54)$$

Получим

$$x = \int_0^s \cos \varphi * ds = \int_0^s \left(1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \dots \right) ds = S - \frac{1}{2} \int_0^s \varphi^2 ds. \quad (55)$$

Учитывая (52) далее получим:

$$\text{Интегрируем почленно: } \int_0^s 2ds = 2s; \quad \int_0^s ksd s = \frac{ks^2}{2};$$

$$\int_0^s \frac{1}{4} \ln^2(1+ks) ds = \frac{1+ks}{4k} \{ \ln^2(1+ks) - 2 \ln(1+ks) + 2 \} - \frac{1}{2k};$$

$$\int_0^s -\sqrt{1+ks} \ln(1+ks) ds = \frac{2}{3k} \sqrt{(1+ks)^3} \left\{ \frac{2}{3} - \ln(1+ks) \right\} - \frac{4}{9k};$$

$$\int_0^s -2\sqrt{1+ks} ds = -\frac{4}{3k} \sqrt{(1+ks)^3} + \frac{4}{3k};$$

$$\int_0^s \ln(1+ks) ds = \frac{1+ks}{k} \{ \ln(1+ks) - 1 \} + \frac{1}{k};$$

Вводим в результат интегрирования обозначение

$$Sk = 1 + ks \quad (57)$$

и, произведя элементарные преобразования, получим:

$$x = s - \frac{u^2 Sk}{4k} \left(1 + Sk + \ln Sk + \frac{1}{2} \ln^2 Sk - \frac{4}{3} \sqrt{Sk} \ln Sk - \frac{16}{9} \sqrt{Sk} - \frac{2}{9Sk} \right) \quad (58)$$

Далее также

$$y = \int_0^s \sin \varphi * ds = \int_0^s \left(\varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \dots \right) ds \quad (59)$$

Учитывая (52) имеем:

$$y = u \int_0^s \left\{ \sqrt{1+ks} - \frac{1}{2} \ln(1+ks) - 1 \right\} ds - \frac{u^3}{6} \int_0^s \left\{ 3\sqrt{1+ks} + (1+ks)\sqrt{1+ks} + \frac{3}{4}\sqrt{1+ks} \ln^2(1+ks) + \sqrt{1+ks} \ln(1+ks) - \frac{3}{2}(1+ks) \ln(1+ks) - 3(1+ks) + 2\sqrt{1+ks} \ln(1+ks) - \frac{3}{2 \ln(1+ks)} - \frac{1}{8} \ln^3(1+ks) - \frac{3}{4} \ln^2(1+ks) - 1 \right\} ds \quad (60)$$

Интегрируем почленно:

$$\begin{aligned} \int_0^s \sqrt{1+ks} ds &= \frac{2}{3k} \sqrt{(1+ks)^3} - \frac{2}{3k}; \\ \int_0^s -\frac{1}{2} \ln(1+ks) ds &= -\frac{1+ks}{2k} \{ \ln(1+ks) - 1 \} - \frac{1}{2k}; \\ \int_0^s -1 ds &= -S; \\ \int_0^s 3\sqrt{1+ks} ds &= \frac{2}{k} \sqrt{(1+ks)^3} - \frac{2}{5k}; \\ \int_0^s \left\{ \frac{3}{4} \sqrt{1+ks} \ln^2(1+ks) + \sqrt{1+ks} \ln(1+ks) \right\} ds &= \frac{1}{2k} \sqrt{(1+ks)^3} \ln^2(1+ks); \\ \int_0^s -\frac{3}{2} (1+ks) \ln(1+ks) ds &= -\frac{3}{4k} (1+ks)^2 \ln(1+ks) + \frac{3}{8k} (1+ks)^2 - \frac{3}{8k}; \\ \int_0^s -3(1+ks) ds &= -3S - \frac{3ks^2}{2}; \\ \int_0^s 2\sqrt{1+ks} \ln(1+ks) ds &= \frac{4}{3k} \sqrt{(1+ks)^3} \left\{ \ln(1+ks) - \frac{2}{3} \right\} + \frac{8}{9k}; \\ \int_0^s -\frac{3}{2} \ln(1+ks) ds &= \frac{3}{2k} (1+ks) \{ 1 - \ln(1+ks) \} - \frac{3}{2k}; \end{aligned}$$

Введем в результат интегрирования, как и ранее обозначение $Sk = 1 + ks$ произведем элементарные преобразования и, переписав, (57) получим уточненные параметрические уравнения тормозной кривой:

$$\begin{aligned} y &= \frac{usk}{2k} \left(\frac{4}{3} \sqrt{Sk} - \ln Sk - \frac{1}{Sk} - 1 \right) - \frac{u^3 Sk}{6k} \left(\frac{10}{9} \sqrt{Sk} + \frac{2}{5} \sqrt{Sk}^3 + \frac{1}{2} \sqrt{Sk} \ln^2 Sk - \frac{3}{4} Sk \ln Sk - \frac{9}{8} Sk + \frac{4}{3} \sqrt{Sk} \ln Sk - \frac{3}{8} \ln^2 Sk - \frac{1}{8} \ln^3 Sk - \frac{3}{4} \ln Sk - \frac{1}{4} - \frac{49}{360 Sk} \right); \\ x &= s - \frac{u^2 Sk}{4k} \left(1 + Sk + \ln Sk + \frac{1}{2} \ln^2 Sk - \frac{4}{3} \sqrt{Sk} \ln Sk - \frac{16}{9} \sqrt{Sk} - \frac{2}{9 Sk} \right) \end{aligned}$$

Для практических целей можно ограничиться значениями:

$$\begin{cases} y = \frac{usk}{2k} \left(\frac{4}{3} \sqrt{Sk} - \ln Sk - \frac{1}{3Sk} - 1 \right) \\ x = S - \frac{u^2 Sk}{4k} \left(1 + Sk + \ln Sk + \frac{1}{2} \ln^2 Sk - \frac{4}{3} \sqrt{Sk} \ln Sk - \frac{16}{9} \sqrt{Sk} - \frac{2}{9 Sk} \right); \end{cases} \quad (61)$$

где $Sk = 1 + \frac{2aS}{V_0^2}$ (переменная величина), $u = \frac{2V_0 g}{a(V_R - V_0)9.8}$; $k = \frac{2a}{V_0^2}$ (постоянные величины).

Для проверки дифференцируем (60), подставляем полученное в (17) для радиуса в конце кривой, где $S=L$ и, произведя элементарные преобразования, получим:

$$R = \frac{V_R^2}{2} \quad (62)$$

Отсюда можно сделать вывод, что уточненные уравнения (1.70) и (1.71) соответствуют исходному уравнению (50) или (51). Это соответствие подтверждается также многими численными примерами. Но, следует отметить, что уравнения (60) точнее уравнений (61). Кривая (60) в конечной точке имеет радиус кривизны соответствующий $R = \frac{V_R^2}{2}$ с точностью до 0,1м, а кривая (61) – с точностью до 1,7м в отличие

от кривой (13), которая в конечной точке имеет радиус кривизны соответствующий необходимому $R = \frac{v_R^2}{2}$ с точностью до 60-120 м. Однако уравнения (60) и (61) довольно громоздки и неудобны. Поэтому сделаем попытку упростить параметрические уравнения тормозных кривых (60), (61) без уменьшения их точности.

Введем обозначение

$$\gamma = \sqrt{1 + kS} - 1 \quad (63)$$

Тогда (52) представится в виде: $\varphi = u\{\gamma - \ln(1 + \gamma)\}$.

Разложим $\ln(1 + \gamma)$ в ряде Тейлора: $\ln(1 + \gamma) = \frac{\gamma}{1} - \frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma^3}{3} - \frac{\gamma^4}{4} + \frac{\gamma^5}{5} \dots$

Тогда

$$\varphi = u\left(\frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma^3}{3} + \frac{\gamma^4}{4} - \frac{\gamma^5}{5} \dots\right) \quad (64)$$

Выражение (63) можно представить в виде: $(\gamma + 1)^2 = 1 + kS$

Дифференцируя это выражение получим: $2(\gamma + 1)d\gamma = kds$

Отсюда

$$dS = \frac{2(\gamma+1)}{k} d\gamma \quad (65)$$

Декартовы координаты текущей точки тормозной кривой определяются решением дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dx &= ds \cos \varphi \\ dy &= ds \sin \varphi \end{aligned}$$

Раскладывая $\cos \varphi$ в ряд и оставляя два первых члена ряда, получим $dx = \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) dS$.

Проинтегрируем это выражение с учетом (1.74) и (1.75):

$$\begin{aligned} x &= \int_0^S \left\{1 - \frac{u^2}{2} \left(\frac{\gamma^4}{4} + \frac{\gamma^6}{9} - \frac{\gamma^5}{3}\right)\right\} \cdot \frac{2}{k} (\gamma + 1) d\gamma = \int_0^S \frac{2}{k} (\gamma + 1) d\gamma - \frac{u^2}{k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^5}{4} + \frac{\gamma^7}{9} - \frac{\gamma^6}{3}\right) d\gamma - \frac{u^2}{k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^4}{4} + \frac{\gamma^6}{9} - \frac{\gamma^5}{3}\right) d\gamma; \\ x &= S - \frac{u^2}{k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^4}{4} - \frac{\gamma^5}{12} - \frac{2\gamma^6}{9}\right) d\gamma = S - \frac{u^2}{k} \gamma^5 \left(\frac{1}{20} - \frac{\gamma}{72} - \frac{2\gamma^2}{63}\right) = S - \frac{u^2}{4k} \gamma^5 \left(\frac{1}{5} - \frac{\gamma}{18} - \frac{\gamma^2}{10}\right). \end{aligned} \quad (66)$$

Раскладывая в ряд и оставляя два члена ряда, получим (с учетом 65)

$$dy = ds \sin \varphi = \frac{2(\gamma + 1) \sin \varphi}{k} d\gamma = \frac{2(\gamma + 1)}{k} \left(\varphi - \frac{\varphi^3}{6}\right) d\gamma$$

Проинтегрируем это выражение в учетом (64):

$$\begin{aligned} y &= \frac{2u}{k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma^3}{3} + \frac{\gamma^4}{4}\right) (\gamma + 1) d\gamma - \frac{u^3}{3k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^6}{8} - \frac{\gamma^7}{4}\right) (\gamma + 1) d\gamma = \frac{2u}{k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^3}{2} - \frac{\gamma^4}{3} + \frac{\gamma^5}{4} + \frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma^3}{3} + \frac{\gamma^4}{4}\right) d\gamma - \\ &\quad \frac{u^3}{3k} \int_0^S \left(\frac{\gamma^7}{8} - \frac{\gamma^8}{4} + \frac{\gamma^6}{8} - \frac{\gamma^7}{4}\right) d\gamma = \frac{u}{3k} \gamma^3 \left(1 + \frac{\gamma}{4} - \frac{\gamma^2}{10} + \frac{\gamma^3}{4} - \frac{\gamma^4}{56} u^2\right). \end{aligned}$$

Окончательно получим еще один вариант уточненных параметрических уравнений тормозной кривой:

$$\begin{aligned} x &= S - \frac{u^2}{4k} \gamma^5 \left(\frac{1}{5} - \frac{\gamma}{18} - \frac{\gamma^2}{10}\right) \\ y &= \frac{u}{3k} \gamma^3 \left(1 + \frac{\gamma}{4} - \frac{\gamma^2}{10} + \frac{\gamma^3}{4} - \frac{\gamma^4}{56} u^2\right) \end{aligned} \quad (67)$$

где $\gamma = \sqrt{1 + kS} - 1$ (переменная величина – S).

$k = \frac{2a}{v_0^2}$; $u = \frac{2v_0 g}{a(v_R - v_0)^{9.8}}$ (постоянные величины).

Указанные уравнения выводились автором несколько раз с последовательным увеличением их точности, соответственно увеличивая процесс выводов количество членов расположения в ряд. Точность уравнений проверялась соответствием их исходной формуле тормозной кривой (16) или (23) с помощью формулы радиуса кривизны кривой (17). Например: продифференцируем дважды x и y из (67) с учетом (68):

$$x' = 1 - \frac{u^2}{4k} \left(\gamma^4 - \frac{\gamma^5}{3} - \frac{7\gamma^6}{10}\right) \frac{k}{2(\gamma+1)} = 1 - \frac{u^2}{8(\gamma+1)} \left(\gamma^4 - \frac{\gamma^5}{3} - \frac{7\gamma^6}{10}\right); \quad (68)$$

$$x'' = -\frac{u^2}{12(\gamma+1)^3} \gamma^3 \left(3 + \gamma - \frac{83}{20} \gamma^2 - \frac{21}{8} \gamma^3 \right); \quad (69)$$

$$y' = \frac{u}{6(\gamma+1)} (3\gamma^2 + \gamma^3 - \frac{\gamma^4}{2} + \frac{3\gamma^5}{2} - \frac{\gamma^6}{8} u^2); \quad (70)$$

$$y'' = \frac{u^2}{2(\gamma+1)^3} \gamma \{ 1 + \gamma + \gamma^3 + \gamma^4 - \frac{u^2}{48} (6\gamma^4 + 5\gamma^5) \} \quad (71)$$

Подставляем полученное в формулу (17)

$$R = \frac{2(\gamma+1)^3}{uk\gamma \sqrt{\frac{u^2\gamma^4}{36} (3-\gamma-\frac{79}{16}\gamma^2-\frac{105}{32}\gamma^3)^2 + \{1+\gamma+\gamma^3+\gamma^4-\frac{u^2}{48}(6\gamma^4+5\gamma^5)\}}} \quad (72)$$

Результаты вычислений сравнивались с величиной $R = \frac{v_R^2}{2}$

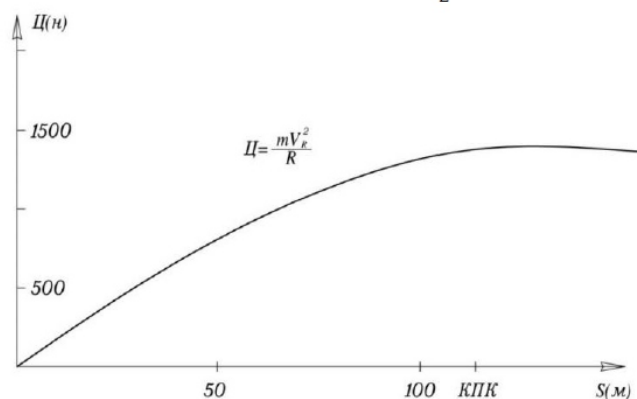


Рис. 4. График изменения центробежной силы, действующей на автомобиль,двигающийся по уточненной тормозной кривой (60 или 67)

Заключение

Итак, радиусы кривизны в конечных точках четырех кривых (60), (62), (67) и (13) соответствуют необходимому радиусу кривизны $R = \frac{v_R^2}{2}$ с точность равной соответственно 0,1м, 1,7м, 0,6м и 90м. Отсюда можно сделать вывод, что при проектировании и разбивке тормозных кривых следует пользоваться уточненными параметрическими уравнениями, предложенными автором (60) или (67), а также (62) и нельзя пользоваться уравнениями (13), применяемыми в настоящее время.

Для сравнения на рисунках 3 и 4 представлены графики изменения центробежной силы, действующей на транспортную единицу,двигающуюся по траекториям (13) и (67) соответственно. Для траектории (13), как отображают графики характерен скачок центробежной силы, существенно угрожающий безопасности движения при переходе автомобиля с тормозной кривой, а для траектории (67) или (60) напротив, характерно плавное изменение центробежной силы, что благоприятно действует на безопасность и технико-экономические показатели движения. Абсциссы и ординаты переходной кривой (13) x_{13} и y_{13} и уточненной тормозной кривой (67) или (60) x_{58} и y_{58} существенно отличаются друг от друга.

Обзор современного состояния дорожных сооружений и закруглений, встречающихся на лесовозных автомобильных дорогах, анализ их геометрических и динамических характеристик показывает в частности, что тормозные переходные кривые транспортных развязок не в полной мере соответствуют технико-экономическим требованиям безопасного движения с изменяющейся скоростью. В связи с этим, выведенные автором уточненные параметрические уравнения тормозных кривых повышают безопасность и экономичность движения на транспортных развязках.

Литература

1. Кравченко В.Е., Самцов В.В., Тихомиров П.В., Никитин В.В., Болтнев Д.Е., Мащнев М.В, Анализ влияния погодно-климатических факторов на системы комплекса водитель-автомобиль-дорога-среда // Молодежный вектор развития аграрной науки. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет, 2019. - С. 125-132.

2. Козлов В.Г. Результаты исследования колееобразования на грунтовых усах лесовозных дорог // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. - 2016. - Т.20. - № 2. - С. 159-166.
3. Курьянов В.К. Расчетная схема и дифференциальные уравнения движения автомобиля при торможении на криволинейном участке дороги с продольным и поперечным уклонами // Депонированная рукопись № 249-B2005 21.02.2005.
4. Курьянов В.К., Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В. Энергосберегающие проектные решения. Технологии, машины и производство лесного комплекса будущего: Международная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию лесоинженерного факультета. - 2004. - С. 81-92.
5. Кравченко В.Е., Самцов В.В., Тихомиров П.В., Никитин В.В., Болтнев Д.Е., Мацнев М.В. Выбор мероприятий по обеспечению сцепных качеств дорожных покрытий // Молодежный вектор развития аграрной науки. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет, 2019. - С. 338-351.
6. Микова Е.Ю., Никитин В.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Высоцкая И.А., Тимофеев В.А., Щербаков Е.Д. Графо-аналитический метод построения перспективных изображений лесовозных автомобильных дорог // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции. - Воронеж, 2020. - С. 225-229.
7. Дорохин С.В., Скрыпников А.В. Обоснование области применения информационных устройств и их эффективность на участках лесных автомобильных дорог // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 1-1. - С. 87.
8. Боровлев А.О., Торопцев В.В., Никитин В.В., Тихомиров П.В., Брюховецкий А.Н., Тимофеев В.А. Зрительная ясность криволинейных участков лесовозной автомобильной дороги // Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса: материалы V Международной научно-практической конференции, в рамках реализации Ассоциации «Технологическая платформа «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания». Воронеж. гос. ун-т инж. технол., 2021. - С. 294-310.
9. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Саблин С.Ю., Никитин В.В., Самцов В.В., Слюсарев А.В. Количественная оценка влияния характеристик компонентов ландшафта на сложность строительства лесовозных автомобильных дорог // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы международной научно-практической конференции. - Воронеж, 2020. - С. 244-251.
10. Курьянов В.К. Система повышения транспортно-эксплуатационного уровня автомобильных дорог Республики Коми. - Воронеж, 2005.
11. Дорохин С.В. Повышение эффективности пассивной безопасности на участках лесовозных автомобильных дорог // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 1-1. - С. 90.
12. Скрыпников А.В., Дорохин С.В., Чистяков А.Г., Чернышова Е.В. // Модель движения автомобилей на участках дорог с ограниченной видимостью / Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 4(62). – С. 81-85.
13. Гусейнов Э.М., Гусейнов Р.Э., Гусейнова Н.Э., Нгуен Л.Л. // Исследование тормозной динамики колесного лесохозяйственного трактора / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 5-4(16-4). – С. 73-77. – DOI 10.12737/16209.
14. Ивченко. Д. С., Кириленко И.А. Повышение скоростей движения на автомобильных дорогах Республики Беларусь: проблемное поле и перспективы развития направления // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 07–08 февраля 2019 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – С. 143-148.
15. Дорохин, С. В. Методика расчета допустимой скорости движения по криволинейной траектории // Мир транспорта и технологических машин. – 2014. – № 3(46). – С. 110-117.

©**Тихомиров П.В.** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой транспортнотехнологических машин и сервиса, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (ФГБОУ ВО «БГИТУ»), e-mail: vtichomirov@mail.ru; **Швецова В.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Саранов И.А.** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информационной безопасности, e-mail: mr.saranov@mail.ru; **Сапелкин Р.С.** –

преподаватель цикловой комиссии информационных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»), e-mail: charls5796@mail.ru; **Брюховецкий А.Н.** – докторант кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», e-mail: ABN1985@inbox.ru; **Щербakov Е.Д.** – экстерн кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», e-mail: ESD88@inbox.ru.

UDC 630.383

«NEW TYPE» OR KADIODID CURVES, BRAKING CURVE AND KLOTOID PAPER TITLE

P.V. Tikhomirov, V.V. Shvetsova, A.B. Bondarev, I.A. Saranov, R.S. Sapelkin

The article is devoted to curved sections, which largely determine the level of technical and economic indicators and traffic safety. Loop-shaped and straight left-turn ramps, characterized by a complex combination of horizontal and vertical curves, are subject to breakdown. As a vertical curve, a square parabola is most often used here, horizontal curves are the most appropriate for the real conditions of movement at forest turning ramps - braking curves (serpentine). Flat spatial roundings are of interest. These sections are formed by connecting the horizontal and vertical curves into a single plane-spatial curve. The breakdown of such roundings is unproductively divided into vertical and horizontal. Design and survey work on existing roads is carried out mainly by traditional geodetic methods. Thus, the purpose of geodetic measurements is to supplement the topographic information about the road with a variety of data related to the determination of geometric elements, technical and operational indicators and other road parameters that are necessary for the designer to make the best decision. Using the information about the road obtained as a result of processing in office conditions without additional geodetic work at the object of study. Moreover, modern advances in the field of computer technology make it possible to fully automate cameral processes associated with the processing of terrestrial stereophotogrammetry materials.

Keywords: braking curve, centrifugal force, trajectory, curvature, clothoid, curve, radius of curvature, braking curve elements.

References

1. Kravchenko V.Ye., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Nikitin V.V., Boltnev D.Ye., Matsnev M.V. [Analysis of the influence of weather and climate factors on the systems of the complex driver-car-road-environment] *Molodezhnyy vektor razvitiya agrarnoy nauki* [Youth vector of agricultural science development] 2019. pp. 125-132. (In Russ.)
2. Kozlov V.G. The results of the study of rutting on unpaved mustaches of logging roads [Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoy vestnik.] *Bulletin of the Moscow State Forest University - Forest Bulletin.* 2016. T.20 No. 2, pp. 159-166. (In Russ.)
3. Kuryanov V.K. [Calculation scheme and differential equations of car movement during braking on a curved section of road with longitudinal and transverse slopes] *Deponirovannaya rukopis'* [Deposited manuscript] No. 249-B2005 02.21.2005. (In Russ.)
4. Kuryanov V.K., Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V. [Energy-saving design solutions. Technologies, machines and production of the forest complex of the future] *Mezhdunarodnaya nauchno- prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya 50-letiyu lesoinzhenernogo fakul'teta* [An international scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of the Faculty of Forestry Engineering] 2004. pp. 81-92. (In Russ.)
5. Kravchenko V.E., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Nikitin V.V., Boltnev D.E., Matsnev M.V. [The choice of measures to ensure the coupling qualities of road surfaces] *Molodezhnyy vektor razvitiya agrarnoy nauki* [Youth vector of agricultural science development]. 2019. pp. 338-351. (In Russ.)
6. Mikova E.Yu., Nikitin V.V., Tikhomirov P.V., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Timofeev V.A., Shcherbakov E.D. [Grapho-analytical method of constructing perspective images of logging highways. Mechanization and automation of technological processes in agricultural production] *materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Materials of the national scientific and practical conference]. 2020. pp. 225-229. (In Russ.)
7. Dorokhin S.V., Skrypnikov A.V. [Substantiation of the field of application of information devices and their effectiveness on forest highway sections] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* № 1-1. [Modern problems of science and education] - 2015. No. 1-1 - p. 87. (In Russ.)

8. Borovlev A.O., Toroptsev V.V., Nikitin V.V., Tikhomirov P.V., Bryukhovetsky A.N., Timofeev V.A. [Visual clarity of curved sections of a logging highway. System analysis and modeling of quality management processes in the innovative development of the agro-industrial complex] *Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, v ramkah realizacii Associacii «Tekhnologicheskaya platforma «Tekhnologii pishchevoj i pererabatyvayushchej promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya»*. [Materials of the V International Scientific and Practical Conference, within the framework of the implementation of the Association "Technological the platform "Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products"] 2021. pp. 294-310. (In Russ.)

9. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Sablin S.Yu., Nikitin V.V., Samtsov V.V., Slyusarev A.V. [Quantitative assessment of the influence of the characteristics of landscape components on the complexity of the construction of logging highways] *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij dlya effektivnogo razvitiya APK: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Current directions of scientific research for the effective development of agriculture: materials of the international scientific and practical conference] 2020. pp. 244-251. (In Russ.)

10. Kuryanov V.K. [The system of increasing the transport and operational level of highways of the Komi Republic] 2005. (In Russ.)

11. Dorokhin S.V. [Improving the efficiency of passive safety on sections of logging highways] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education] 2015. - № 1-1 - p. 90. (In Russ.)

12. A.V. Skrypnikov, S. V. Dorokhin, A. G. Chistyakov, E. V. Chernyshova [Model of car movement on road sections with limited visibility] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologij* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies] 2014. -№ 4(62) – Pp. 81-85. (In Russ.)

13. Huseynov E.M., Huseynov R.E., Huseynova N.E., Nguyen L.L. [Research of braking dynamics of a wheeled forestry tractor] *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika* [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice] 2015. – T. 3. – № 5-4(16-4). – Pp. 73-77. (In Russ.)

14. Ivchenko. D. S., Kirilenko I.A. [Increasing traffic speeds on the highways of the Republic of Belarus: a problem field and prospects for the development of the direction] *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya molodyh uchyonyh: Sbornik materialov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh* [Fundamental and applied research of young scientists: A collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists] 07-08, 2019.– pp. 143-148. (In Russ.)

15. Dorokhin, S. V. [Methodology for calculating the permissible speed of movement along a curved trajectory] *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines] – 2014. – № 3(46). – Pp. 110-117. (In Russ.)

©**Tikhomirov P.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technological Machines and Services of Transport, Bryansk State Technological University of Engineering (BSTUE), e-mail: vtichomirov@mail.ru; **Shvetsova V.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: vikt.schvetzova2012@yandex.ru; **Saranov I.A.** – PhD in Engineering sciences, Senior Lecturer of the Department of Information Security, Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), e-mail: mr.saranov@mail.ru; **Sapelkin R.S.** – Teacher of the cycle commission of information technologies, VSUET, e-mail: charls5796@mail.ru; **Bryukhovetskiy A.N.** – PhD student of the Department of Intellectual Security, VSUET, e-mail: ABN1985@inbox.ru; **Shcherbakov E.D.** – external student of the Department of Information Security, VSUET, e-mail: ESD88@inbox.ru.

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 674.047.3

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СВЧ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

А.И. Шагеева, П.А. Кайнов, Р.Р. Сафин

В статье рассмотрены пути повышения энергоэффективности процессов сушки пиломатериалов в электромагнитной среде. Описана разработанная энергосберегающая схема введения процесса вакуумной СВЧ сушки в режиме осцилляции давления среды. Представлена инженерная методика расчета предложенной схемы вакуумной СВЧ сушильной установки с тепловым насосом. Энергообеспечение данной установки предложено осуществлять электрогенератором, работающим за счет выработки электроэнергии на отходах деревообработки. Представлены результаты анализа энергопотребления агрегатов сушильной установки в зависимости от объема загрузки высушиваемых пиломатериалов.

Ключевые слова: сушильная камера, СВЧ-нагрев, осциллирующий режим, древесина, вакуумный насос, тепловой насос

Введение

В связи с интенсивным ростом потребления топливно-энергетических ресурсов внедрение энергосберегающих технологий является одним из важных направлений повышения эффективности производства и умелого ведения технологических процессов. При этом к наиболее энергоемким процессам можно отнести операции сушки, которые обуславливаются высокими энергетическими и временными затратами. Сократить продолжительность процесса без ущерба к качеству высушиваемых пиломатериалов позволяет техника сушки, осуществляемая в условиях пониженного давления [1,2,3,4]. Однако, несмотря на неоспоримые преимущества, при вакуумной сушке возникает проблема подвода тепловой энергии к высушиваемому материалу, поэтому применение СВЧ поля в процессах сушки пиломатериалов является перспективным направлением развития процесса. При этом данный способ подвода тепловой энергии к материалу является достаточно сложно регулируемым без применения дополнительной конвективной или иной составляющей. Кроме того, неэффективное потребление электроэнергии СВЧ генератором ставит под вопрос дальнейшие перспективы данной технологии сушки. Одним из решений данных вопросов является использование импульсных технологий, которые применительно к вакуумным методам получили распространение в виде осциллирующих режимов. В работе [5] было представлено математическое описание и результаты математического моделирования процессов СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, которые позволили определить перспективы развития данного метода сушки древесины. В этой связи в данной работе была поставлена задача разработки энергоэффективной схемы технологии вакуумной СВЧ сушки при осциллирующем режиме [6,7,8,9].

Методы и материалы

В последние годы для снижения энергетических затрат наибольшее внимание уделяется использованию альтернативных источников энергии, в частности отходов деревообработки [10,11]. Для реализации СВЧ сушки пиломатериалов была разработана схема процесса, при которой на стадии импульса используется СВЧ-нагрев, а на стадии вакуумирования в работу включаются тепловой и вакуумный насосы. При этом энергообеспечение СВЧ генератора, теплового и вакуумного насосов осуществляется от электрогенератора, работающего на генераторном газе, получаемом из отходов деревообработки (рис.1).

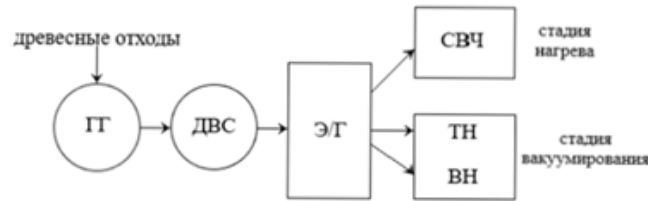


Рис.1. Схема осциллирующей СВЧ сушки пиломатериалов, работающей на продуктах газификации отходов деревообработки

На основе проведенных исследований [12,13] по разработанной технологии была разработана пилотная установка для сушки древесных материалов в СВЧ среде, которая работает следующим образом (рис.2). Измельченные влажные древесные отходы из бункера хранения поступают в сушильный бункер 1, куда вентилятором 10 нагнетается горячий воздух для их предварительной подсушки. Нагрев воздуха осуществляется с помощью тепловой энергии, отведенной тепловым насосом от испаренной в камере 11 влаги. Далее подсушенные древесные отходы подаются питателем из бункера 1 в газификатор 2, в котором происходит термохимическая конверсия отходов древесного сырья с последующим получением генераторного газа. Полученный генераторный газ после очистки от пылевидных частиц и остаточных смол в системе очистки 3, состоящем из циклона и фильтра тонкой очистки, поступает в двигатель внутреннего сгорания 4 для выработки электроэнергии в электрогенераторе 5. Полученная электроэнергия обеспечивает работу компрессора 7 теплового насоса, вакуумного насоса 9, вентилятора 10 на стадии вакуумирования и СВЧ генератора с магнетронами 6 на стадии нагрева.

Сушку материала проводят следующим образом: высушиваемый материал 12 помещают в сушильную камеру 11. После загрузки материала и закрытия камеры ведут стадию нагрева при атмосферном давлении среды, для этого в работу включают СВЧ генератор. Продолжительность стадии начального нагрева определяется достижением температуры в центре высушиваемого материала 12 заданного значения. Вслед за этим ведут стадию вакуумирования, для этого в работу включают компрессор 7 теплового насоса и вакуумный насос 9, отключают магнетроны 6, и сушка древесины происходит за счет предварительно акумулированной тепловой энергии. Отводимая из сушилки 11 тепловая энергия передается тепловым насосом 7 в калорифер 13 для нагрева агента сушки, подаваемого в сушильный бункер 1 вентилятором 10.

Выдержка под вакуумом осуществляется до снижения температуры в центре высушиваемого материала 12 до заданного значения, при котором градиент температуры не будет оказывать существенного влияния на процесс дальнейшего удаления влаги. После окончания стадии вакуумирования открытием напускного клапана в сушильную камеру 11 нагнетается атмосферный воздух и начинается стадия СВЧ нагрева материала. После завершения стадии вакуумирования цикл «нагрев-вакуум» повторяется. На стадии вакуумирования происходит увеличение влажности воздушной среды в сушильной камере 11 и выравнивание влажности по сечению пиломатериала, что способствует снятию возникших напряжений. Таким образом осуществляется чередование стадий прогрева и вакуумирования в процессе вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, что в свою очередь позволяет отказаться от проведения промежуточной и конечной влаготеплообработки.

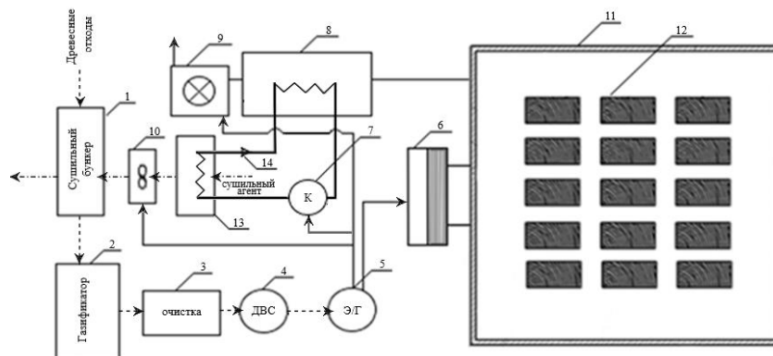


Рис.2. СВЧ сушильная камера с тепловым насосом: 1 – сушильный бункер с древесными отходами; 2 – газификатор; 3 – система очистки газа; 4 – двигатель внутреннего сгорания; 5 – электрогенератор; 6 – магнетрон СВЧ генератора; 7 – компрессор теплового насоса; 8 – конденсатор; 9 – вакуумный насос; 10 – вентилятор; 11 – сушильная камера; 12 – высушиваемый материал; 13 – калорифер; 14 – дроссель

Для определения основных энергетических показателей различных агрегатов сушильного комплекса была разработана инженерная методика расчета.

Основным параметром в инженерной методике расчета узлов предложенной конструктивной схемы сушильной установки является поток влаги, испаряющейся из материала, находящегося в камере 11, который определяется в результате математического моделирования, описанного в [5]

$$j_{\text{м.пов}} = \rho_0 \cdot \left(a_{\text{м}} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} + a_{\text{м}} \cdot \delta \cdot \frac{\partial T_{\text{м}}}{\partial x} \Big|_{x=0} \right), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность древесины, кг/м³; $a_{\text{м}}$ – коэффициент массопроводности, м²/с; U – влагосодержание древесины; $T_{\text{м}}$ – температура материала, °C; δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/°C.

Площадь поверхности высушиваемого материала определяется уравнением

$$F_{\text{пов.м}} = \frac{V_{\text{др.}}}{S_{\text{пил.}}} \cdot 2, \quad (2)$$

где $V_{\text{др.}}$ – объем высушиваемой древесины, м³; $S_{\text{пил.}}$ – толщина пиломатериалов, м.

Расход испаряющейся из древесины влаги находится как

$$P_{\text{исп.вл.}} = F_{\text{пов.м}} \cdot j_{\text{м.пов}}. \quad (3)$$

Отсюда тепловой напор конденсатора

$$Q_{\text{тепл.}} = P_{\text{исп.вл.}} \cdot r, \quad (4)$$

где r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Зная, что на передачу тепловой энергии тепловым насосом затрачивается в 3÷5 раз меньшая электроэнергия, то требуемая мощность теплового насоса равна

$$N_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{тепл.}}}{3 \div 5} \cdot \eta_{\text{к}}. \quad (4)$$

где $\eta_{\text{к}}$ – КПД компрессора теплового насоса.

Задавая время τ_0 , в течение которого давление газа необходимо понизить с барометрического $P_{\text{атм}}$ до рабочего остаточного значения $P_{\text{ост}}$, определяем производительность вакуумного насоса

$$V_{\text{св}} = \frac{V_{\text{св}}}{\tau_0} \cdot \ln \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{ост}}}, \quad (5)$$

где $V_{\text{св}}$ – свободный объем камеры сушки, м³.

Мощность вакуумного насоса можно определить из выражения

$$N_{\text{вн}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot V_{\text{св}}}{\eta_{\text{вн}}}. \quad (6)$$

Производительность вентилятора, обеспечивающего сушку отходов с необходимой производительностью бункера 1 можно определить из выражения

$$P_{\text{вен}} = \left(\frac{Q}{c_{\text{возд.}} \cdot \Delta T} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{возд.}}} \right), \quad (7)$$

где Q – количество тепла, необходимого для испарения влаги из древесных отходов, Дж/с; $c_{\text{возд.}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C); ΔT – разность температур воздуха на входе и выходе из бункера 1, °C; $\rho_{\text{возд.}}$ – плотность воздуха, кг/м³.

Скорость воздуха, подаваемого вентилятором в сушильный бункер 1, определяется как

$$v = \frac{P_{\text{вен.}}}{R_{\text{кам.}}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{кам.}}$ – сечение бункера, м².

Тогда мощность вентилятора определяем из выражения

$$N_{\text{вен}} = \xi \frac{\rho_{\text{возд}} \cdot v^2}{2} \cdot \Pi_{\text{вен}} \cdot \eta_{\text{вен}}, \quad (9)$$

где ξ – местное сопротивление сыпучего материала; $\eta_{\text{вен}}$ – КПД вентилятора.

Отсюда, необходимая мощность электрогенератора определяется как

$$N_{\text{э/г}} \approx N_{\text{к}} + N_{\text{вн}} + N_{\text{вен}} \approx N_{\text{СВЧ-ген}}. \quad (10)$$

Для проведения инженерного расчета параметров разработанного сушильного комплекса были использованы следующие данные: порода высушиваемой древесины – сосна с $\rho_0 = 400 \text{ кг/м}^3$; объем загрузки камеры сушки – 10, 15, 20 м^3 ; фактический объем штабеля древесины – 5,88; 8,82; 11,76 м^3 ; свободный объем камеры – 4,12; 6,18; 8,24 м^3 .

Результаты

Для определения требуемой мощности электрогенератора в зависимости от объема загрузки камеры были проведены исследования процесса СВЧ сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды [12,13], позволяющие определить исходные данные для инженерной методики расчета.

По результатам расчета по предложенной инженерной методике была получена номограмма (рис. 3), по которой можно определить требуемую мощность электрогенератора в зависимости от толщины высушиваемых пиломатериалов.

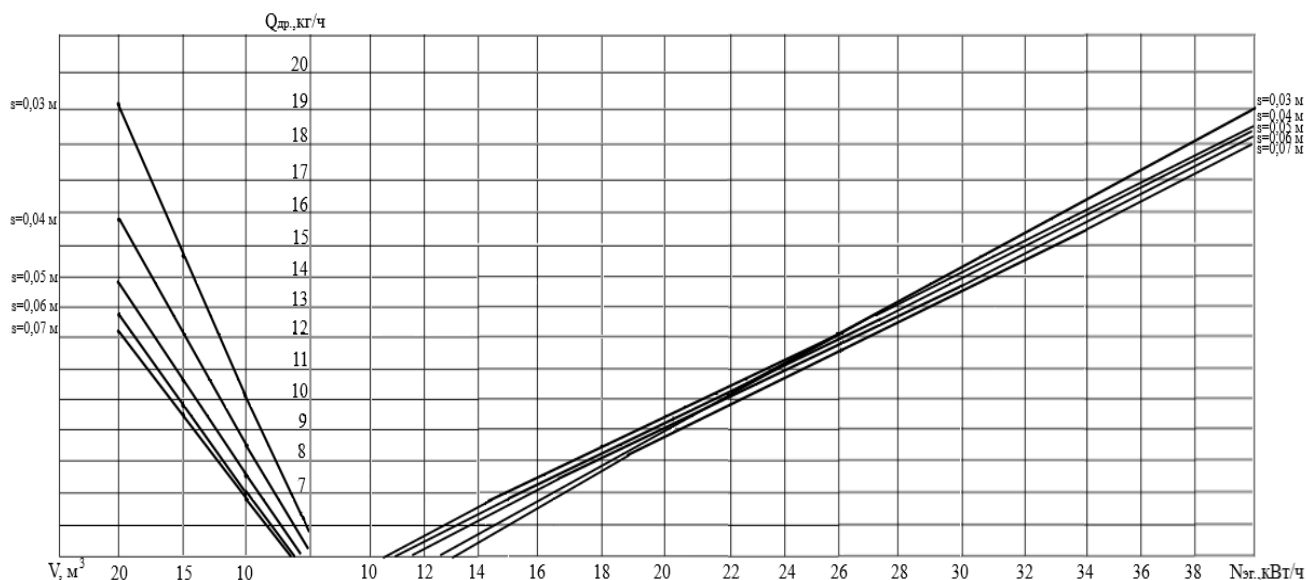


Рис.3. Номограмма мощности электрогенератора в зависимости от объема загрузки сушильной камеры

Кроме того, в ходе проведенных расчетов был установлен необходимый на два часа сушки объем сушильного бункера с древесными отходами, обеспечивающий проведение процесса предварительной подсушки в течении 2 часов, в зависимости от объема загрузки сушильной камеры (рис. 4). Из представленных графиков видно, что с увеличением толщины высушиваемых пиломатериалов снижается потребляемая мощность сушильного комплекса, что позволяет снизить капитальные затраты на проведение процесса.

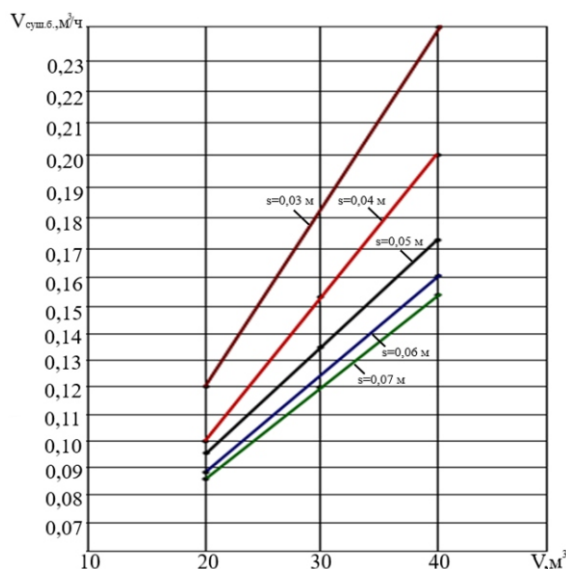


Рис.4. Зависимость объема сушильного бункера с древесными отходами от объема загрузки сушильной камеры и толщины пиломатериалов

Заключение

Для проведения анализа энергоэффективности процессов вакуумной сушки пиломатериалов был создан экспериментальный сушильный комплекс, состоящий из камеры сушки с СВЧ генератором и тепловым насосом, энергообеспечение которого осуществляется электрогенератором, работающим за счет выработки электроэнергии из предварительно подсушенных древесных отходов. В ходе проведенных расчетов было установлено, что преобразованные в электроэнергию измельченные древесные отходы позволяют полностью обеспечить работу электрогенератора, вырабатывающего энергетические ресурсы для агрегатов предложенной схемы СВЧ сушильного комплекса. По результатам реализации разработанной инженерной методики расчета оптимальных энергетических показателей основных элементов сушильной установки было выявлено, что увеличение толщины высушиваемых пиломатериалов приводит к снижению требуемой максимальной вырабатываемой мощности электрогенератора, что, в свою очередь, свидетельствует об эффективности предложенной схемы вакуумной СВЧ сушки в мобильных лесопильных комплексах, использование которых позволит снизить расходы при транспортировке леса.

Литература

1. Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла // Деревообрабатывающая промышленность. 2012. №4. С. 20-24.
2. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Гильмиев Р.Р., Валиев Ф.Г. Снижение расхода энергии на проведение процессов сушки древесины посредством вакуумно-конвективной технологии // Деревообрабатывающая промышленность. 2008. №5. С. 22-23.
3. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г., Кайнов П.А. Новые подходы к совершенствованию вакуумно-конвективных технологий сушки древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2005. №5. С. 16.
4. Пат. № 2425305 Российская Федерация, МПК F26B5/04, F26B3/34. Способ сушки и термической обработки древесины / Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Разумов Е.Ю., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А., Кузьмин И.А., Мазохин М.А., Шайхутдинова А.Р., Ахтямова Т.Н., Воронин А.Е. – опубл. 27.07.2011.
5. Шагеева А.И., П.А. Кайнов, Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин. Математическое моделирование процессов СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. №2. С.44-54.
6. Сафин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Кайнов П.А., Николаев А.Н., Сафина А.В. Обзор современных технологических решений повышения энергоэффективности в процессах сушки пиломатериалов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. №21. С. 50-52.

7. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Мухаметзянов Ш.Р., Кайнов П.А. Повышение энергоэффективности процесса осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки древесины путем использования теплового насоса // Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90. №2. С. 334-341.
8. Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Кайнов П.А., Шаяхметова А.Х. Методика расчета установки вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов с использованием теплового насоса // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2015. Т.29. №2. С. 96-102.
9. Safin R.G., Lashkov V.A., Golubev L.G., Safin R.R. Mathematical model of vacuum-oscillating drying of lumber // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2002. Vol. 75. No.2. pp.95-98.
10. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste// Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. pp. 7414929.
11. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // 15th International Multidisciplinary GeoConference SGEM 2015. Sofia, 2015. pp. 699-706.
12. Шагеева А.И., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Порфирьева К.М. Математическое моделирование процессов сушки пиломатериалов в СВЧ-среде // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. №57. С. 71-74.
13. Кайнов П.А., Мухаметзянов Ш.Р., Шамсутдинова А.И., Мухтарова А.Р. Математическая модель процесса сушки пиломатериала в вакуумной СВЧ установке // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. №4. С. 17-21.

©Шагеева А.И. – аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: sham.adilya@yandex.ru; Кайнов П.А. – канд.техн.наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: petr.k@plastline.org; Сафин Р.Р. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru.

UDC 674.047.3

DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT SCHEME OF ENERGY SUPPLY OF THE PROCESS OF VACUUM MICROWAVE DRYING OF LUMBER

A.I. Shageeva, Kainov P.A., R.R. Safin, R.R. Khasanshin

The article discusses ways to improve the energy efficiency of lumber drying processes in an electromagnetic environment. The developed energy-saving scheme for introducing the process of vacuum microwave drying in the mode of medium pressure oscillations is described. An engineering method for calculating the proposed scheme of a vacuum microwave dryer with a heat pump is presented. The power supply of this installation is proposed to be carried out by an electric generator operating by generating electricity from woodworking waste. The results of the analysis of the energy consumption of the units of the drying plant, depending on the volume of loading of dried lumber, are presented.

Keywords: drying chamber, microwave heating, oscillating mode, wood, vacuum pump, heat pump

References

1. Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R. [Investigation of the processes of vacuum drying of lumber with convective methods of heat supply] // Derevoobrabatyvayuschaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2012. No. 4. pp. 20-24. (In Russ.)
2. Safin R.R., Khasanshin R.R., Gilmiev R.R., Valiev F.G. [Reducing energy consumption for wood drying processes by means of vacuum convective technology] // Derevoobrabatyvayuschaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2008. No. 5. pp. 22-23. (In Russ.)
3. Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G., Kainov P.A. New approaches to improving vacuum-convective technologies for wood drying // Woodworking industry. 2005. No. 5. pp. 16. (In Russ.)

4. Pat. No. 2425305 Russian Federation, IPC F26B5/04, F26B3/34. Ways of drying and heat treatment of wood / Safin R.R., Safin R.G., Razumov E.Yu., Khasanshin R.R., Kainov P.A., Kuzmin I.A., Mazokhin M.A., Shaikhutdinova A. .R., Akhtyamova T.N., Voronin A.E. - publ. 07/27/2011. (In Russ.)
5. Shageeva A.I., P.A. Kainov, R.R. Safin, R.R. Khasanshin. [Mathematical modeling of the processes of microwave drying of lumber in an oscillating mode] // Derevoobrabatывayuschaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2022. No.2.pp.44-54. (In Russ.)
6. Safin R.R., Khakimzyanov I.F., Kainov P.A., Nikolaev A.N., Safina A.V. [Review of modern technological solutions to improve energy efficiency in the processes of drying lumber] //Vestnik Kazanskogo technologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014. Vol.17. No. 21. pp. 50-52.(In Russ.)
7. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. [Improving the energy efficiency of the process of oscillating vacuum-conductive drying of wood by using a heat pump]// Inzhenerno-fizicheskij zhurnal[Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 2017. V.90. No. 2. pp. 334-341.(In Russ.)
8. Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A., Shayakhmetova A.Kh. [Calculation method for vacuum-conductive drying of lumber using a heat pump] // Vestnik Moskovskogo universiteta lesa – lesnoy vestnik [Bulletin of the Moscow State University of Forests - Forest Bulletin]. 2015. Vol.29. No. 2. pp. 96-102.(In Russ.)
9. Safin R.G., Lashkov V.A., Golubev L.G., Safin R.R. Mathematical model of vacuum-oscillating drying of lumber // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2002. Vol. 75. No.2. pp.95-98.
10. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste// Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. pp. 7414929.
11. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // 15th International Multidisciplinary GeoConference SGEM 2015. Sofia, 2015. pp. 699-706.
12. Shageeva A.I., Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Porfiryeva K.M. [Mathematical modeling of lumber drying processes in the microwave environment] // Actual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of the forestry complex]. 2020. No. 57. pp. 71-74. (In Russ.)
13. Kainov P.A., Mukhametzyanov Sh.R., Shamsutdinova A.I., Mukhtarova A.R. [Mathematical model of the lumber drying process in a vacuum microwave unit] // Derevoobrabatывayuschaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2017. No. 4. pp. 17-21. (In Russ.)

©Shageeva A.I. – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU e-mail: sham.adilya@yandex.ru; Kainov P.A. – PhD of technical sciences, associate professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU e-mail: petr.k@plastline.org; Safin R.R. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products. KNRTU, e-mail: cfaby@mail.ru .

УДК 674.047.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ КАМЕР С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА

А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, А.В. Мялицин

Сушка пиломатериалов во всей технологии деревообработки является наиболее энергозатратной. По данным различных исследователей доля электрической энергии в общих энергозатратах может составлять до 50 %. С учетом постоянного устойчивого роста цен на электроэнергию можно в ближайшие годы прогнозировать существенное увеличение стоимости сушки древесины, а вместе с этим и стоимости продукции деревообработки. Это приводит производителей и исследователей к необходимости обратиться к такому виду оборудования для сушки пиломатериалов как камеры с естественной циркуляцией воздуха, которые были весьма распространены в отечественной промышленности в 30-е – 50-е годы прошлого века. Наибольшее распространение получили камеры

системы В.Е. Грум-Гржимайло и некоторые другие. К преимуществам камер с естественной циркуляцией воздуха можно отнести отсутствие затрат электроэнергии на привод вентиляторов и их ремонт, а также простоту и более низкую стоимость самих камер. Наряду с указанными преимуществами камеры с естественной циркуляцией имеют и такие существенные недостатки как неравномерное высыхание материала по высоте штабеля, низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом, а также относительно большая продолжительность процесса сушки. По мнению многих исследователей причины недостатков камер с естественной циркуляцией кроются в крайне низкой скорости циркуляции (в пределах 0,2 м/с). Действительно, с увеличением скорости циркуляции воздуха по материалу сокращается продолжительность сушки и увеличивается производительность камер, но возрастают эксплуатационные расходы. При малой скорости движения воздуха доски просыхают неравномерно, наблюдается перепад влажности древесины на входе воздуха в штабель и выходе из него. Проходя через штабель воздух увлажняется, при малой скорости движения часть пути он проходит в насыщенном состоянии и поэтому не может захватывать с собой влагу из досок, лежащих дальше от входа в штабель. Если же скорость воздуха сравнительно велика, то благодаря большему его количеству и более быстрому прохождению его по материалу, штабель в целом более равномерно омывается воздухом. Таким образом, одной из основных проблем повышения эффективности камер с естественной циркуляцией является повышение скорости циркуляции и коэффициента заполнения штабеля.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов, сушильные камеры с естественной циркуляцией воздуха

Введение

Проблемой влияния скорости циркуляции агента на процесс сушки занимались многие исследователи W.L. Greenhill [1], J.H. Junkins [2], П.С. Серговский [3], Н. Geul [4], Н. Sturany [5], А.К. Пухов [6], С.И. Мачулис [7] и др.

Резюмируя результаты приведенных выше исследований можно заключить, что вполне приемлемая скорость и неравномерность сушки может быть достигнута уже при скорости циркуляции в пределах 0,8 – 1,0 м/с [8]. Именно такое значение скорости циркуляции рекомендует также И.В. Кречетов [9].

Традиционно в классических камерах с естественной циркуляцией (например [10]), применяется укладка штабеля со шпациями (в противном случае в камере не будет циркуляции). Однако такая укладка приводит к тому, что типичные значения величин коэффициента сопротивления движению воздуха составляют $\lambda_{\text{шт}} = 100 \div 200$ и более (рис. 1). В то же время, при традиционной плотной укладке штабеля (без шпаций) величина данного коэффициента составляет в пределах $\lambda_{\text{шт}} = 20 \div 40$.

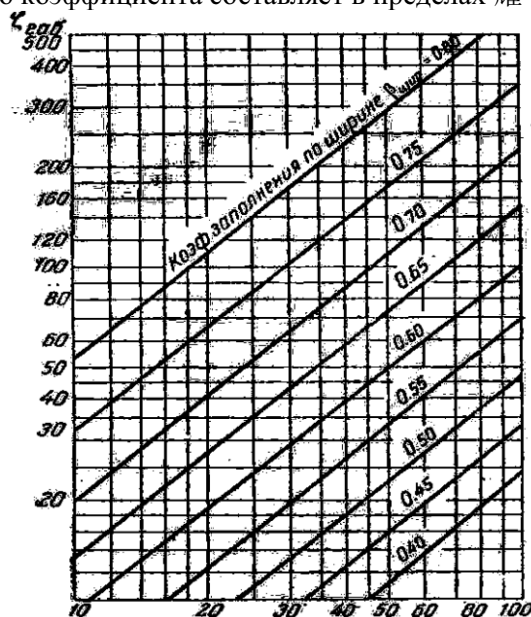


Рис. 1. Коэффициенты сопротивления штабелей при вертикальном движении воздуха и укладке со шпациями [11]

Следует отметить, что в эпоху широкого использования камер с естественной циркуляцией [12, 9] была предложена так называемая вертикальная штабелевка досок (рис. 2), позволяющая повысить коэффициент заполнения штабеля и снизить коэффициент сопротивления движению воздуха.

Однако данный способ формирования штабелей достаточно трудоемок и «требует специальных самозатягивающихся вагонеток и штабелевочной машины» [12].

Дополнительно интенсифицировать процесс сушки в камерах с естественной циркуляцией возможно за счет применения, так называемых осциллирующих режимов, основанных на явлении термовлагопроводности [13, 14].

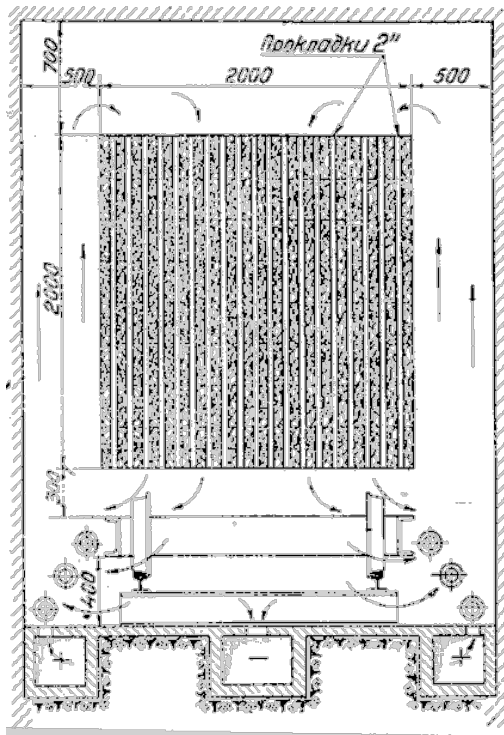


Рис. 2. Вертикальная штабелевка досок [12]

Методика проведения исследования

В УралНИИПДрев и УГЛТУ были проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента [13, 14].

Процесс естественной циркуляции исследовался на основе гидравлической теории газов [15], разработанной В.Е. Грум-Гржимайло, а также теории свободных конвективных струй академика Г.Н. Абрамовича [16].

Процессы тепломассообмена в частности с использованием явления термовлагопроводности, а также с учетом неизотермичности исследовались как по традиционно применяемым методикам [17, 18, 19], так и по вновь разработанным оригинальным методикам [13, 14]. Особо это касается лабораторных и промышленных экспериментов.

Результаты исследования и их анализ

Запатентовано устройство по сути реализующее принцип ребровой укладки пиломатериалов [20] (рис. 3), но отличающееся тем, что пиломатериал укладывается на ребро в опорно-фиксирующую раму рядами, разделенными прокладками, на подштабельное устройство с уклоном от 2 до 45° к вертикали. При этом отпадает необходимость в самозатягивающихся вагонетках и штабелевочной машине.

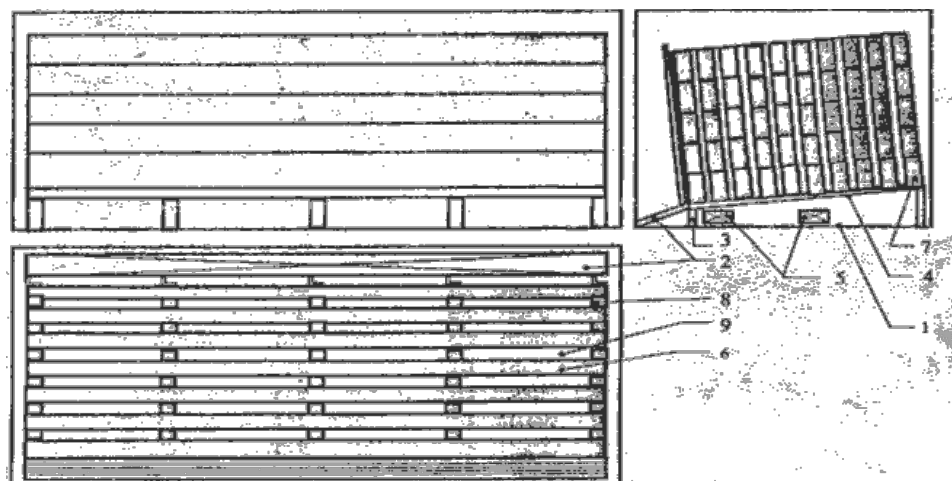


Рис. 3. Устройство для сушки пиломатериала [19]: 1 – корпус; 2 – калорифер; 3 – подштабельное устройство; 4 – опорно-фиксирующая рама; 5 – приточно-вытяжные каналы; 6 – доски; 7 – торец доски; 8 – прокладки; 9 – циркуляционные каналы в штабеле

1. Разработана теория естественной циркуляции с учетом статической и динамической составляющей теплового напора.

Результаты исследования позволяют заключить, что:

- применение патентованной конструкции штабеля [20] позволяет существенно снизить коэффициент аэродинамического сопротивления и, соответственно, повысить скорость естественной циркуляции;

- сопротивление штабеля воздушному напору зависит, с одной стороны, от квадрата скорости циркуляции, а с другой – от геометрических параметров штабеля, в первую очередь от соотношения толщины досок и прокладок;

- скорость естественной циркуляции главным образом определяется линейной тепловой мощностью нагревателя и толщиной высушиваемых пиломатериалов и может достигать 0,7 – 1,0 м/с [13].

3. Теоретически и экспериментально обоснована структура осциллирующих режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией. Доказано, что:

- за весь период сушки термовлагопроводность работает на протяжении 35 – 38 % времени цикла. При этом величина отрицательного градиента температуры составляет 2 – 2,5 °C (рис. 4);

- осциллирующие режимы оказываются существенно (на 10 – 20 %) эффективнее режимов сушки, рекомендованных РТМ [21] по продолжительности сушки.

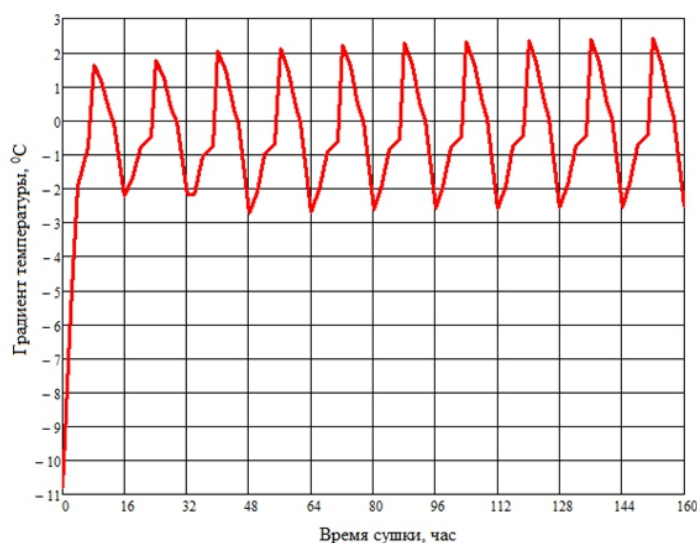


Рис. 4. Градиент температуры в древесине (осциллирующий режим) при среднем значении температуры среды: 70 °C

4. Проведены масштабные исследования в лабораторных и производственных условиях, которые позволили определить оптимальные значения параметров режима сушки.

4.1. Лабораторные исследования проводились в ОАО «УралНИИПДрев» на полупромышленной камере с естественной циркуляцией, имеющей объем разовой загрузки 2 м^3 (в условном пиломатериале при их длине 3 м) [8]. Выбранные в качестве управляющих факторов параметры режима сушки позволяют эффективно воздействовать на процесс сушки и изменять значения выходных параметров в весьма широких пределах. Применение рациональных значений параметров режимов сушки позволяет получить вполне приемлемые значения продолжительности процесса сушки пиломатериалов, неравномерности влажности, а также затрат энергии на сушку. Полученное значение времени сушки всего на 13% больше теоретически предельного и нормативного. Неравномерность влажности высушенных пиломатериалов соответствует требованиям I категории качества.

4.2. Внутренние напряжения во всех опытах реализованного плана соответствовали требованиям I – II категорий качества сушки. При этом требования I категории качества достигались при величине температуры охлаждения осциллирующего режима 70°C и ниже. Полученные рациональные значения параметров режима ($t_{0}^{**}=66^\circ\text{C}$) позволяют надеяться на выполнения требований I категории качества по внутренним напряжениям. Низкие значения внутренних напряжений объясняются, с одной стороны, весьма мягким режимом сушки, а с другой стороны, особенностью осциллирующего режима. Ведь, по сути дела, осциллирующий режим является цепью циклических термовлагообработок, которые постоянно снимают внутренние напряжения. Кроме того, данные режимы позволяют полностью избежать таких дефектов сушки, как трещины, выплавление смолы, выпадения сучков.

4.3. Производственные испытания проводились на промышленной камере с естественной циркуляцией конструкции ОАО «ВСППО-Ависма» (г. Верхняя Салда, Свердловской области (табл. 1).

Таблица 1 - Основные технические характеристики камеры

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1.	Габаритные размеры штабеля, мм	2000x1800x6000
2.	Емкость штабеля в условном пиломатериале, м^3	13,3
3.	Годовая производительность камеры в условном пиломатериале, $\text{м}^3/\text{год}$	970
4.	Теплоноситель	Пар
5.	Тепловая мощность калориферов, кВт	72,0
6.	Наличие системы автоматического контроля и управления	Да

Анализ результатов проведенных производственных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- проведенные производственные исследования полностью подтвердили эффективность предложенных осциллирующих режимов;
- в исследованном диапазоне изменения управляющих факторов (температуры нагрева и охлаждения) качество сушки пиломатериалов высокое, в основном соответствующее I категории качества;
- подтвердились результаты лабораторных исследований в части влияния температуры на внутренние напряжения. При этом I категория качества сушки достигается при температуре 62°C и ниже;
- качество сушки с точки зрения неравномерности влажности высокое, полностью соответствует I категории качества. Гарантированное качество сушки достигается при очень жестком соблюдении допуска на конечную влажность ($8 \pm 2\%$). Вероятность соблюдения этого допуска составляет 94 – 99 %.

Разработанная технология сушки после апробации внедрена на ООО «ВСППО-Ависма» (рис. 5).

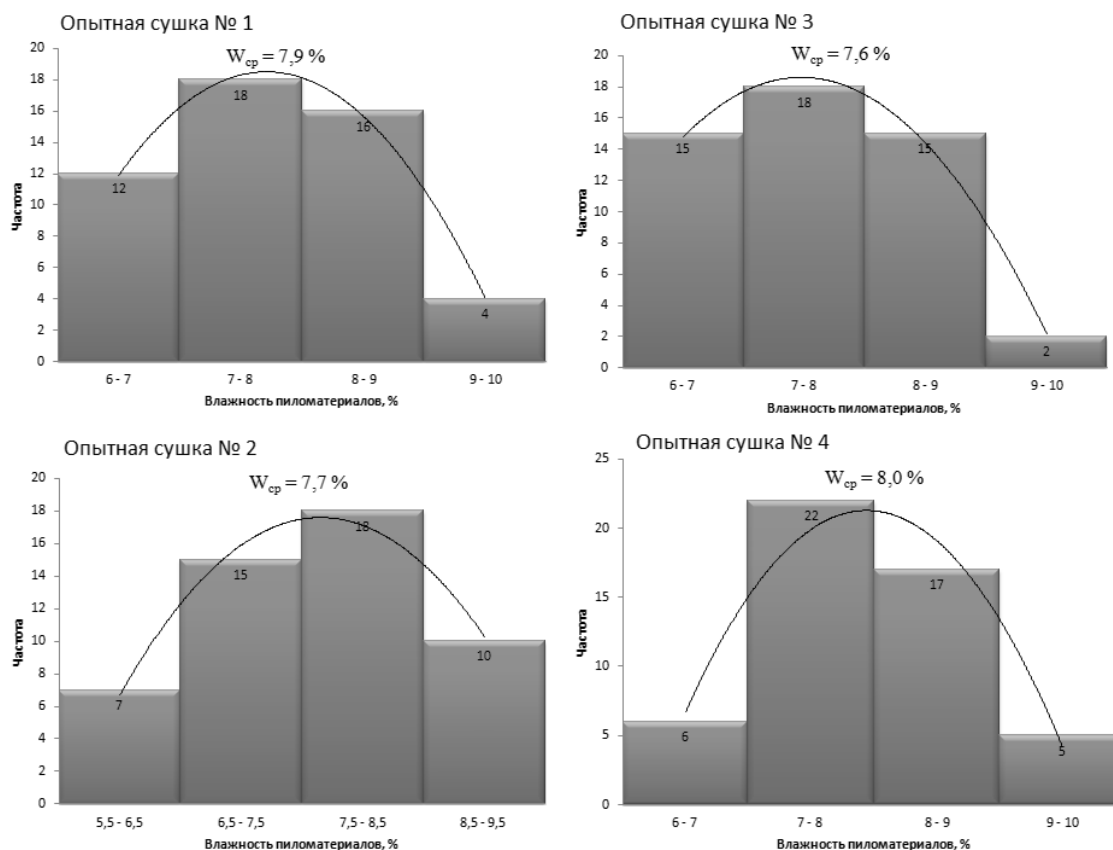


Рис. 5. Экспериментальное и теоретическое распределение конечной влажности пиломатериалов

5. Определен технико-экономический эффект внедренной технологии. Анализ результатов расчетов позволяет заключить, что стоимость затраченной энергии в случае сушки пиломатериалов в камере с естественной циркуляцией агента сушки в 3,9 раза меньше, чем при сушке в камере с принудительной циркуляцией [8].

Выводы

1. При современном соотношении цен на электрическую и тепловую энергию радикальным путем снижения энергозатрат и их стоимости на сушку пиломатериалов является применение камер с естественной циркуляцией агента сушки. К другим преимуществам камер этого типа можно отнести простоту конструкции и более низкую стоимость камеры, а также более низкие амортизационные и эксплуатационные затраты.

К недостаткам камер этого типа обычно относят большую продолжительность и неравномерность сушки пиломатериалов, и низкий коэффициент заполнения штабеля пиломатериалом.

2. Возможными путями преодоления недостатков камер с естественной циркуляцией являются следующие:

- повышение коэффициента заполнения штабеля пиломатериалом достигается применением, так называемой ребровой укладки или укладки на ребро в опорно-фиксирующую раму с уклоном. Кроме того, такая конструкция штабеля значительно снижает аэродинамическое сопротивление штабеля, что способствует существенному увеличению скорости циркуляции;

- снижение продолжительности сушки возможно за счет применения осциллирующих (ступенчатых, перемежающихся, цикловых) режимов сушки пиломатериалов, сущность которых заключается в периодическом нагреве-остывании древесины. В период охлаждения происходит бурное испарение влаги из древесины, причем в начальный период охлаждения интенсивность испарения влаги в 10 раз больше, чем при обычных методах сушки;

- экстремально низкая неравномерность сушки ($S = 0,2 - 0,3 \%$ при $W_{cp} = 10 \%$) достигается именно в камерах с естественной циркуляцией воздуха путем правильной организации процесса.

3. Аэродинамический анализ процессов в камере с естественной циркуляцией выявил две составляющие теплового напора: статическую и динамическую. Для расчета скорости циркуляции получено аналитическое выражение, связывающее все основные параметры камеры и штабеля пиломатериалов.

4. На скорость естественной циркуляции воздуха влияют главным образом две составляющие: линейная тепловая мощность нагревателя и конструкция штабеля.

Применение ребровой укладки при достаточной мощности нагревателя позволяет получить скорость циркуляции в пределах 0,7 – 1,0 м/с.

5. В результате теоретического анализа тепловых процессов (нагрева и охлаждения) в случае применения осциллирующих режимов построена эффективная структура режимов сушки пиломатериалов в камерах с естественной циркуляцией агента сушки.

6. Построены математические модели, представляющие собой зависимости качественных показателей сушки пиломатериалов в камере с естественной циркуляцией агента сушки от параметров режима.

7. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получены рациональные значения параметров режима сушки.

8. В производственных условиях подтверждена эффективность разработанной технологии при высоком качестве сушки пиломатериалов.

9. Внедрение разработанной технологии в производство позволило существенно снизить затраты непосредственно на сушку, эксплуатационные затраты, а также повысить качество суши ки.

Литература

1. Greenhill W.L. The effect of the rate of air circulation on the rate of drying of timber // Journal of the council of scientific and Industrial Research. Vol. IX. № 3. August, 1936.
2. Junkins J.H. Effect of rate of circulation of drying. Mitll, 1934. Wood Prod. Lab. of Canada.
3. Сергоровский П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952.
4. Geul H. Holzrocknung mit noken windgeschwindigkeit. Holz – Zentralblatt, 1952, Vg. 78, № 109, s. 1503, 1504, 1506.
5. Sturany H. Siromungsfragen beim Trocknen von Holz als Roh and Werkstoff. Holz – Zentralblatt, 1952. Vg. 10. № 5. S. 201-207.
6. Пухов А.К. Влияние скорости циркуляции агента сушки на продолжительность и качество сушки пиломатериалов // Деревообрабатывающая промышленность. 1965. № 8.
7. Мачулис С.И. Определение оптимальных скоростей воздуха в низкотемпературных камерах непрерывного действия при сушке мягкими режимами // Деревообрабатывающая промышленность. 1976. № 7.
8. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Лесосушильные камеры с естественной циркуляцией воздуха: Моногр. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. - 120 с.
9. Кречетов И.В. Сушка древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949.
10. Сушило многократного насыщения с естественной циркуляцией: заявка 74241 Рос. Федерация / Грум-Гржимайло В.Е. (СССР); заявл. 25.10.1920.
11. Селюгин Н.С. Сушка древесины. М.; Л.: Гослестехиздат, 1949.
12. Андропова Н.А. Сушка и сушила для дерева. М.: ОНТИ, 1936.
13. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 290 с.
14. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. – 40 с.
15. Бардин И.П., Грум-Гржимайло В.Е. Элементарная теория построения металлургических печей. М.; Л.: АН СССР, 1949.
16. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматиздат, 1960.
17. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с.
18. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.

19. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. Wood Science and Technology, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.

20. Устройство для сушки пиломатериалов: Пат. 37815 Рос. Федерация / Агапов В.П., Гороховский А.Г.; заявл. 10.05.2004.

21. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985.

© **Гороховский А.Г.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий, ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, goralegr@yandex.ru; **Шишкина Е.Е.** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры управления в технических системах и инновационных технологий, ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, elenashishkina@yandex.ru; **Мялицин А.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления в технических системах и инновационных технологий ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет, mialitsin@gmail.com.

UDC 674.047

INCREASING THE EFFICIENCY OF DRYERS WITH NATURAL AIR CIRCULATION

A.G. Gorohovsky, E.E. Shishkina, A.V. Mialitsin

Hardwood is a very valuable material for domestic woodworking. However, only high quality drying can make it suitable for machining, gluing, finishing, etc. The very specific structure of the wood of these species leads to the fact that one of the most important characteristics of wood from the point of view of drying, namely the coefficient of moisture conductivity, takes extremely low values. If we add to this the easily achieved collapse of the surface of the drying assortment, it becomes clear that the drying process of such a material becomes extremely long and rather difficult to implement. The article provides an overview of literary sources on the selection and practical application of drying modes for sawn hardwood. A retrospective of the development of this direction is given based on materials from domestic and foreign sources.

Keywords: lumber drying modes, mode structure, mode stage, stepless modes

References

1. Greenhill W.L. The effect of the rate of air circulation on the rate of drying of timber // Journal of the council of scientific and Industrial Research. Vol. IX. № 3. August, 1936.
2. Junkins J.H. Effect of rate of circulation of drying. Mitll, 1934. Wood Prod. Lab. of Canada.
3. Sergovsky P.S. Calculation of the processes of drying and moistening of wood. M.; L.: Goslesbumizdat, 1952.
4. Geul H. Holzrocknung mit noken windgeschwindigkeit. Holz – Zentralblat, 1952, Vg. 78, № 109, s. 1503, 1504, 1506.
5. Sturany H. Siromungsfragen beim Trocknen von Holz als Roh and Werkstoff. Holz – Zentralblat, 1952. Vg. 10. № 5. S. 201-207.
6. Pukhov A.K. Influence of the drying agent circulation rate on the duration and quality of lumber drying./ Woodworking industry, 1965. № 8.
7. Machulis S.I. Determination of optimal air velocities in low-temperature chambers of continuous action during drying with soft modes // Woodworking industry. 1976. No. 7.
8. Gorohovsky A.G., Shishkina E.E. Wood-drying chambers with natural air circulation: Monograph. - Yekaterinburg: Ural. state forest engineering un-t, 2007. - 120 p.
9. Krechetov I.V. Drying wood. M.; L.: Goslesbum-published, 1949.
10. Dryer of multiple saturation with natural circulation: application 74241 Ros. Federation / Grum-Grzhimailo V.E. (THE USSR); dec. 10/25/1920.
11. Selyugin N.S. Drying wood. M.; L.: Gosleste-khizdat, 1949.
12. Andronova N.A. Drying and drying for wood. M.: ONTI, 1936.

13. Gorokhovskiy A.G. Sawn Timber Drying Technology Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2008. 263 p.
14. Shishkina E.E. Energy-Saving Technology for Convective Drying of Sawn Timber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2016. 40 p.
15. Bardin I.P., Grum-Grzhimailo V.E. Elementary theory of construction of metallurgical furnaces. M.; L.: AN SSSR, 1949.
16. Abramovich G.N. Theory of turbulent jets. Moscow: Fizmatizdat, 1960.
17. Lykov A.V. Drying Theory. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.
18. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.
19. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. Wood Science and Technology, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
20. Device for drying lumber: Pat. 37815 Ros. Federation / Agapov V.P., Gorokhovskiy A.G.; for-yavl. May 10, 2004.
21. Guiding technical materials on the technology of chamber drying of wood. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1985.

©Gorokhovskiy A.G. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, Ural State Forestry University (USFU), e-mail: goralegr@yandex.ru; Shishkina E.E. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, USFU, e-mail: elenashishkina@yandex.ru; Mialitsin A.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Management in Technical Systems and Innovative Technologies, Ural State Forestry University, e-mail: mialitsin@gmail.com.

УДК 66.046

ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

А.В. Сафина, Е.Н. Ахметханова, Р.Р. Сафин, Л.Ю. Исмаилов, Е.И. Байгильдеева

Разработана математическая модель процесса экстракции ценных компонентов из растительного сырья, в частности березового гриба чаги. Описана методика проведения аналитических исследований процесса экстракции. Проанализировано влияние изменения коэффициента массопроводности на продолжительность процесса экстракции. Установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса. Были представлены профили изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени в процессе экстрагирования чаги. Выявлено, что активный процесс экстракции наблюдается в поверхностном слое в начале процесса и характеризуется достаточно быстрым падением концентрации в каждом последующем слое. Изучено влияние размера частиц на продолжительность процесса экстракции. Установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса. Результаты математического моделирования получены с использованием программной среды Visual Basic for Applications.

Ключевые слова: экстракция, растительное сырье, математическая модель, моделирование, березовый гриб чага.

Введение

Экстракция лекарственного растительного сырья является неотъемлемым и важным процессом в фитохимическом производстве. Теория и практика процесса экстракции интенсивно развиваются в

последние годы в связи с ростом технической оснащенности фармацевтического производства, а также решением проблем, возникающих при рассмотрении процессов экстракции в системе твердое тело-жидкость [1].

Оптимизация процессов экстракции растительного сырья требует знания соответствующих параметров равновесия и массопереноса, а также оптимальных условий работы экстракционного аппарата [2]. Параметры массопереноса и растворимости могут быть определены количественно путем применения адекватной математической модели, а математическое моделирование позволяет решать многие задачи, связанные с управлением технологическим процессом, прогнозированием оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок [3].

Общая схема моделирования любого технологического процесса включает в себя следующие этапы: разработка математической модели и ее анализ, проверка соответствия модели реальному процессу, отработка или корректировка модели, оптимизация режимных параметров процесса на основе разработанной модели и регулирование производственного процесса для получения оптимальных требуемых показателей выхода готовой продукции [4].

Анализ имеющегося информационного материала и литературных данных показывает, что для расчета и оптимизации процесса экстрагирования растительного сырья могут быть использованы три типа математических моделей процессов [5]:

- модели дифференциальных уравнений;
- модели критериальных уравнений;
- модели регрессионных уравнений.

Критериальные уравнения и уравнения регрессии, полученные методом экспериментального проектирования, подходят для описания процессов экстракции. Критериальные уравнения связывают между собой ряд факторов: тонкость сырья, поверхность массообмена, скорость экстрагента, другие гидродинамические условия процесса (пульсации, вибрации), время экстракции, концентрацию веществ в сырье, коэффициенты свободной и внутренней диффузии и другие факторы [6,7].

Также важным направлением в моделировании является проведение экспериментальных исследований в условиях промышленного производства. Большинство критериальных уравнений не учитывают критерии геометрического подобия и не подходят для производственных условий [8].

Суть регрессионного анализа заключается в нахождении наиболее важных факторов, которые влияют на зависимую переменную. При этом важным является установление в исходных эмпирических данных некой закономерности и ее выражение в виде математической функции, которая наилучшим образом аппроксимирует имеющиеся данные [9]. Так, в работе авторов [10] экспериментальные данные водной экстракции фенольных соединений из семян джамун были проанализированы с помощью таких кинетических моделей, как модель первого порядка, модель второго порядка, модель Пелега и модель Минчева и Минкова. Методом нелинейного регрессионного анализа установлено, что, наиболее подходящей для описания кинетики извлечения полифенолов из семян джамуна является модель первого порядка.

Оптимизация процесса водно-этанольной экстракции этаноллигнина из древесины лиственницы сибирской проведена посредством построения двухпараметрической математической модели [11]. В качестве независимых факторов для построения математической модели были выбраны температура экстракции и концентрация водного раствора этанола. Установлено, что основным фактором, влияющим на выход этаноллигнина, является концентрация этанола. Следующим по значимости фактором является температура экстракции.

Как и в случае корреляционного анализа, любая регрессионная модель позволяет обнаружить только количественные зависимости, которые не всегда отражают влияние одного фактора на другой.

Явления, происходящие при экстракции растительного сырья, связаны с динамическими процессами массопереноса, поэтому для математического описания актуальны модели на основе дифференциального интегрирования баланса массы [12]. По сравнению с эмпирическими моделями, модели дифференциальных уравнений требуют определения многочисленных коэффициентов. Однако эти модели описывают непосредственно тенденции и механизмы массопереноса в жидкой и твердой фазах в процессах экстракции.

Целью настоящей работы является разработка математической модели экстракции растительного сырья, проверка ее адекватности реальным физическим процессам и последующее математическое моделирование процесса с целью выбора оптимальных режимных параметров.

Методы и материалы

Математическое описание процесса экстракции растительного сырья предполагает нахождение нестационарного поля концентрации целевого компонента по сечению материала на основе решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C - концентрация целевого компонента в материале, кг/см³; a_m - коэффициент массопроводности сырьевой матрицы, являющийся коэффициентом внутренней диффузии, м²/с; x - текущая координата частицы, м.

Изменение концентрации на границе тела описывается уравнением:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \tau} \right|_{x=0} = \Delta j \cdot \frac{F_{\text{ч}}}{V_{\text{ч}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ч}}$ - поверхность частицы, м²; $V_{\text{ч}}$ - объем частицы, м³.

Движущей силой процесса экстракции является разность потоков целевых компонентов:

$$\Delta j = j_1 - j_2, \quad (3)$$

Поток целевых компонентов из центра частицы к ее поверхности описывается уравнением:

$$j_1 = P_0 \cdot \rho_{\text{ист}} \cdot a_m \cdot \frac{f_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}}}, \quad (4)$$

где P_0 - коэффициент пористости; $\rho_{\text{ист}}$ - истинная плотность вещества, кг/м³; $f_{\text{пор}}$ - суммарная поверхность пор в частице, м²; $V_{\text{пор}}$ - объем пор, м³.

Перенос целевых компонентов с поверхности частицы в экстрагент описывается уравнением массоотдачи:

$$j_2 = \beta \cdot (C_{\text{пов}} - C_{\text{экстр}}), \quad (5)$$

где β - коэффициент массоотдачи, м/с; $C_{\text{пов}}$ - концентрация ценного компонента на поверхности частицы; $C_{\text{экстр}}$ - концентрация целевого компонента в экстракте.

Методом конечных разностей с использованием языка визуального и объектно-ориентированного программирования VBA была решена математическая модель.

Задачей моделирующего алгоритма является решение системы уравнений с целью определения режимных параметров технологического процесса извлечения биологически активных веществ из лиственницы.

На рисунке 1 представлена программа расчета процесса экстракции в программной среде Visual Basic for Applications (VBA) [13], позволяющей моделировать процесс целевых компонентов из растительного сырья.

Разработанная математическая модель была апробирована путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными данными, полученными при исследовании кинетики водно-вакуумного экстрагирования березового гриба чага [14].

Березовый гриб, относится к виду «трутовик скошенный» и представляет собой плодовое тело многолетнего паразитирующего гриба (чаще всего на березе) в виде наростов неправильной формы, чёрного цвета, с поверхностью, покрытой множеством трещин. По коллоидно-физическим свойствам гриб чага относится к группе капиллярно-пористых коллоидных тел, в которых формы связи влаги с твердым скелетом присущи как капиллярно-пористым, так и коллоидным телам.

В качестве экстрагента использовалась дистиллированная вода, которая обладает хорошей проницаемостью через клеточные стенки, доступна и хорошо растворяет многие лекарственные вещества.


```

Sub 1()
ic = 4:
kc = 15:
dx = 0.001
dt = 7200
P = 0.731
r = 1489
f = 4.233
b = 120 * 10 ^ (-7)
a = 2 * 10 ^ (-11)
V = 0.002
Cn = 26
Cpov = 26
Co = 26
d = 0
While Co > 10
While ic <= 7
Cm = Cells(ic - 1, kc - 1)
Ct = Cells(ic, kc - 1)
Cp = Cells(ic + 1, kc - 1)
Cells(8, kc - 1) = Cells(6, kc - 1)
ci = Ct + (a * ((Cm - 2 * Ct + Cp) / (dx ^ 2))) * dt
If ci < 0 Then ci = 0
Cells(ic, kc) = ci
ic = ic + 1
Co = Cells(7, kc)
Wend
Ctp = Cells(3, kc - 1)
Ct2 = Cells(4, kc)
i1 = P * r * a * f
Cells(11, kc) = i1
i2 = b * Ctp
Cells(12, kc) = i2
di = i1 - i2
Cells(13, kc) = di
dc = di * (f / V) * dt
Cells(14, kc) = dc
Cpov = Ctp + dc
If Cpov < 0 Then Cpov = 0
Cells(3, kc) = Cpov
Cells(2, kc) = d
d = d + 2
ic = 4
kc = kc + 1
Wend
End Sub

```

Рис. 1. Программа расчета процесса экстракции в программной среде Visual Basic for Applications (VBA)

Параметры процесса водно-вакуумной экстракции варьировались в следующих пределах. Периодическое понижение давление в системе осуществлялось до разрежения до 0,1 атм.; температура процесса 60 °С; соотношение чага:экстрагент (гидро модуль процесса) 1:10; размер частиц чаги 1-10мм, форма сфера. Начальная концентрация экстрактивных веществ чаге (в среднем по сечению гриба) – 26 кг/м³; конечная концентрация – 10 кг/м³. В исследованиях учитывались параметры, зависящие от различных зон гриба: внутренней, контактирующей со стволом дерева, основного плодового тела и поверхностной или краевой зоны [15].

Для последующего математического моделирования было исследовано влияние массопроводных характеристик чаги при извлечении из нее экстрактивных веществ относительно различных зон.

Математическое моделирование сводилось к определению продолжительности экстракции ценных компонентов из растительного сырья при вариации следующих параметров:

- радиуса частиц и, соответственно, различного диаметра (от 1 до 10 мм);
- в зависимости от изменения коэффициента массопроводности относительно различных зон гриба;
- в зависимости от изменения коэффициента массоотдачи так же относительно различных зон чаги.

Исходные данные и кинетические характеристики для математического моделирования процесса экстракции березового гриба чага представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

№ слоя	Истинная плотность, кг/м ³ <i>P_{ист}</i>	Коэффициент пористости <i>Π_o</i>	Суммарная поверхность пор, м ² /кг <i>f/m</i>	Коэффициент массопроводности, м ² /с <i>a_m·10⁻¹¹</i>	Коэффициент массоотдачи, м/с <i>β</i>
Внутренний слой, (у дерева)	1489	0,731	4,233	2,81	40·10 ⁻⁷
Плодовое тело (сердцевина)		0,754	4,825	3,47	80·10 ⁻⁷
Наружный слой (край)		0,599	3,742	4,79	120·10 ⁻⁷

Удельная поверхность пор в зависимости от слоевого состава образцов чаги определялась методом адсорбционной пирометрии. Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального

исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Результаты

На рисунке 2 представлены профили изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени в процессе экстрагирования чаги, полученные моделированием представленных математических описаний. Результаты расчетов по изменению локального содержания целевых компонентов по слоям (с шагом 1 мм) представлены для частицы диаметром 10 мм. Первый слой представляет собой поверхность частицы. Слой с максимальным номером является центральным, поскольку рассматривается симметричная частица.

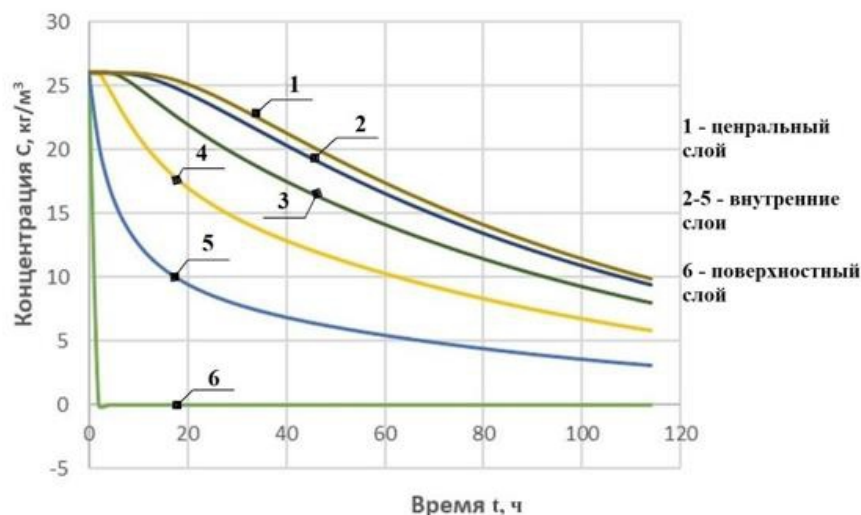


Рис. 2. Изменение локального содержания целевых компонентов по слоям (с шагом 1 мм) для частицы диаметром 10 мм

Как видно из графика, в поверхностном слое наблюдается активный процесс экстракции с максимально быстрым падением концентрации. Каждый последующий слой характеризуется достаточно интенсивным понижением концентрации в начале процесса, которое с течением времени замедляется.

Размеры сырьевой чаги в значительной степени влияют на процесс извлечения экстрактивных веществ из сырьевого материала. Последующие расчеты для частиц различных размеров позволили построить график зависимости продолжительности процесса экстрагирования от радиуса частиц (рис.3), определяемого количеством слоев. Результаты опытов и математического моделирования представлены в виде графических зависимостей. На графиках сплошными линиями изображены данные, полученные расчетным путем, точками – результаты экспериментов. Расчетные значения получены моделированием системы уравнений (1) – (5).

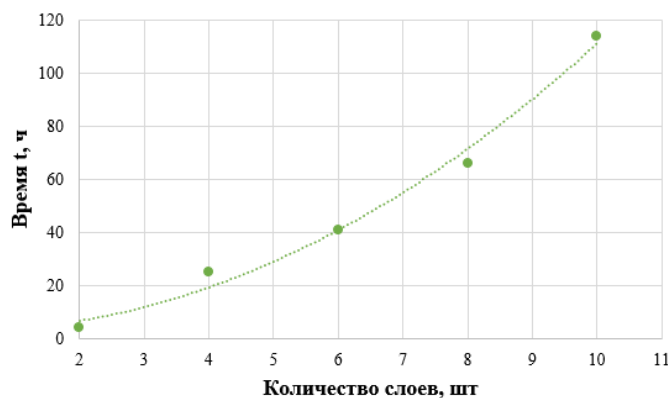


Рис. 3. Зависимость продолжительности процесса экстрагирования от количества слоев частицы

Как видно из графика, время экстракции увеличивается экспоненциально с увеличением размера экстрагируемых частиц. Причем оптимальными для экстрагирования являются частицы с количеством слоев 2, что соответствует диаметру частицы 4 мм, поскольку рассматривается симметричная частица.

Для этого размера частицы наблюдается высокая скорость извлечения ценных компонентов. Для более крупных частиц увеличивается продолжительность процесса экстракции.

Обработка данных методами математической статистики показала, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 12 %. Удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных подтверждает адекватность разработанного математического описания реальному процессу экстракции растительных материалов.

Далее проанализировано влияние изменения коэффициента массопроводности на продолжительность процесса экстракции (рис. 4).

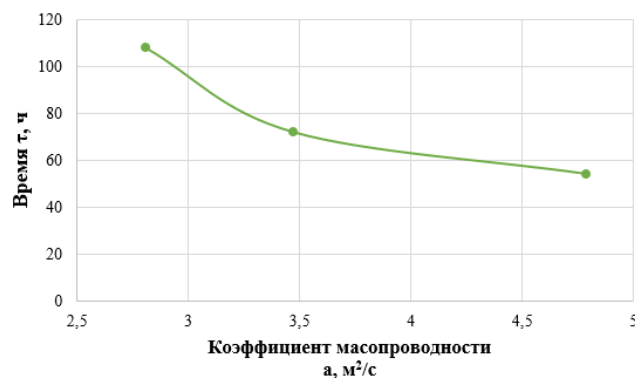


Рис. 4. Зависимость продолжительности экстракции от коэффициента массопроводности

Установлено, что различным зонам чаги, отличающихся максимальным содержанием экстрактивных веществ, соответствуют различные значения коэффициента массопроводности. С увеличением коэффициента a_m повышается эффективность диффузионного процесса и сокращается продолжительность процесса экстракции, что иллюстрируется логарифмической зависимостью и определяет характер кривой, представленной на графике. Исследованиями установлено, что наибольшее количество экстрактивных веществ содержится в краевом слое [16]. Таким образом, с практической точки зрения наибольшее значение для максимального извлечения ценных компонентов имеют наружный слой и плодовое тело чаги.

В результате математического моделирования установлено, что изменение коэффициента массоотдачи не влияет на скорость процесса извлечения целевых компонентов из растительного материала. Продолжительность процесса экстракции, таким образом, не зависит от значения коэффициента массоотдачи и, соответственно, от зон гриба. Это объясняется тем, что отток целевых компонентов с поверхности частицы достаточно велик и процесс массоотдачи значительно превышает массопроводность любой из рассматриваемых зон чаги. Таким образом, процесс экстракции лимитируется процессом массопроводности.

Заключение

Разработана математическая модель экстракции растительного сырья и получены результаты математического моделирования с использованием программной среды Visual Basic for Applications. Адекватность математического описания пробирована на данных экспериментальных исследований березового гриба чага относительно различных его зон (наружной, внутренней и внутренней)

Моделирование изменения концентрации экстрактивных веществ по сечению частицы с течением времени показало, что активный процесс экстракции наблюдается в поверхностном слое в начале процесса и характеризуется достаточно быстрым падением концентрации в каждом последующем слое, интенсивность которого ослабевает с течением времени.

Изучено влияние размера частиц на продолжительность процесса экстракции. Установлено, с увеличением размера экстрагируемых частиц увеличивается и время экстракции. В результате математического моделирования установлен оптимальный размер частиц чаги, при котором обеспечивается высокая скорость извлечения ценных компонентов при рациональной продолжительности процесса.

С целью оптимизации процесса экстракции растительного сырья рассмотрено влияние параметров массопереноса целевых компонентов. Установлено, что с увеличением коэффициента массопроводности,

характерного для наружного слоя и плодового тела чаги, эффективность процесса экстракции существенно возрастает. Анализ влияния коэффициента массоотдачи на продолжительность процесса извлечения ценных компонентов не оказывает влияния на скорость переноса массы, поскольку его значение значительно превышает массопроводность каждой из зон гриба. Проведенное математическое моделирование на примере березового гриба чага позволило исследовать и определить соответствующие параметры массопереноса с целью интенсификации процесса экстракции растительного сырья.

Полученные данные позволяют выработать технические решения, связанные с управлением технологическим процессом и прогнозировании оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок.

Литература

1. Grosso C., J.P. Coelho, F.L.P. Pessoa, J.M.N.A. Fareleira, J.G. Barroso, J.S. Urieta, A.F. Palavra, H. Sovová, Mathematical modeling of supercritical CO₂ extraction of volatile oils from aromatic plants, Chemical Engineering Science, Vol. 65, Issue 11, 2010, P. 3579-3590, ISSN 0009-2509.
2. Amit Rai, Kumargaurao D. Punase, Bikash Mohanty, Ravindra Bhargava, Evaluation of models for supercritical fluid extraction, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 72, 2014, P. 274-287, ISSN 0017-9310.
3. Нагорнов С. А. Математическое моделирование процесса экстракции растительного сырья / С. А. Нагорнов, В. А. Лузгачев, Ю. В. Мещерякова, А. Г. Мещеряков // Наука в центральной России. – 2015. – № 6(18). – С. 40-48.
4. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник / В. П. Тарасик. — Минск: Новое знание, 2013. — 584 с.
5. Ашихмин В.Н. Введение в математическое моделирование / В.Н. Ашихмин, М.Б. Гитман, К.Э. Келлер и др - Москва: Логос, 2004, С. - 440 с
6. Jelena Vlastic, Zoran Zekovic, Stela Jokic, Sandra Svilovic, Strahinja Kovacevic, Senka Vidovic, Winter Chaber: Supercritical Carbon Dioxide Extraction and Mathematical Modeling of Extraction Process, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 117, 2016, P. 89-97, ISSN 0896-8446
7. Мухаммадиев Б.Т. Параметрический анализ CO₂ экстракции растительных ингредиентов/ Б.Т. Мухаммадиев., Л.Р. Джураева // Universum: Химия и биология: электрон. научн. журн. 2020. - № 2(68).
8. Özkal S.G. Yener M.E. Bayındırlı L. Modeling of mass transfer in apricot kernel oil extraction by supercritical carbon dioxide, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 35, Issue 2, 2005, P. 119-127, ISSN 0896-8446.
9. Солова Е.Л. Скорость экстракции растительного масла со сверхкритическим CO₂ — I. Моделирование кривых экстракции // Химико-технические науки. – 1994. – № 14 – С.409-414.
10. Милевская В.В. Кинетика извлечения биологически активных веществ из лекарственного сырья разными способами экстракции // Вестник Московского Университета. – 2017. – № 13 – С. 281-289.
11. Матвеев Е. В / Проблемы современной аграрной науки: материалы международной заочной научной конференции // Матвеев Е. В, Величко Н. А. Ушанов С. В. Аешина Е. Н. Красноярск, 2014 года / Ответственные за выпуск: Г.И. Цугленок, Ж.Н. Шмелева. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 10. 2015. – С. 169-174.
12. Букеева А. Б. Обзор современных методов выделения биоактивных веществ из растений / А.Б. Букеева, С.Ж. Кудайбергенова // Вестник ЕНУ им. . – 2012. - № 2. - С. 192-197.
13. Осетрова И.С., Н. А. Осипов Microsoft Visual Basic for Application - СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 120 с.
14. Губернаторов В.В. Оптимизация процесса водно-вакуумной экстракции березового гриба чага путем подбора режимных параметров / В.В. Губернаторов, А.В. Сафина, Ш.Р. Мухаметзянов // Актуальные проблемы лесного комплекса. Брянск. – 2021. – № 60. – С. 221-225.
15. Сафина, А.В. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем периодического понижения давления среды / А.В. Сафина, В.В. Губернаторов, В.В. Гараев, Е.Ю. Разумов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2017. – № 2. – С. 50-53.
16. Губернаторов В.В. Определение продолжительности отдельных стадий водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus*/ В.В. Губернаторов, А.В. Сафина, Р.Р. Сафин// Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 41-48.

©Сафина А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail:

alb_saf@mail.ru; **Ахметханова Е.Н.** – магистрант кафедры «Переработки древесных материалов» ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: sfornvi@gmail.com; **Сафин Р.Р.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru; **Исмаилов Л.Ю.** – аспирант кафедры «Архитектуры и дизайна изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: lenar-2015@mail.ru; **Байгильдеева Е.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: bai48@rambler.ru.

UDC 66.061

SOFTWARE MODELING OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF VALUABLE COMPONENTS FROM PLANT RAW MATERIALS

A.V. Safina, E.N. Akhmetkhanova, R.R. Safin, L.Yu Ismailov, E.I. Baigildeeva

A mathematical model of the process of extraction of valuable components from plant raw materials, in particular birch mushroom chaga, has been developed. The method of analytical studies of the extraction process is described. The influence of changes in the mass conductivity coefficient on the duration of the extraction process has been analyzed. The optimum particle size of chaga, which provides a high rate of extraction of valuable components with a rational duration of the process was established. Profiles of changes in the concentration of extractive substances over the cross section of the particle with the passage of time in the process of extraction of chaga have been presented. It was found that the active extraction process is observed in the surface layer at the beginning of the process and is characterized by a fairly rapid drop in concentration in each subsequent layer. The influence of the particle size on the duration of the extraction process was studied. The optimum size of the chaga particles, which provides a high rate of extraction of valuable components at a reasonable duration of the process is established. Results of mathematical modeling were obtained using Visual Basic for Applications.

Keywords: mathematical model, modeling, extraction, plant raw materials, chaga birch mushroom.

References

1. Grosso C., J.P. Coelho, F.L.P. Pessoa, J.M.N.A. Fareleira, J.G. Barroso, J.S. Urieta, A.F. Palavra, H. Sovová, Mathematical modeling of supercritical CO₂ extraction of volatile oils from aromatic plants, Chemical Engineering Science, Vol. 65, Issue 11, 2010, P. 3579-3590, ISSN 0009-2509.
2. Amit Rai, Kumargaurao D. Punase, Bikash Mohanty, Ravindra Bhargava, Evaluation of models for supercritical fluid extraction, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 72, 2014, P. 274-287, ISSN 0017-9310.
3. Nagornov S. A. Mathematical modeling of plant raw material extraction process / S. A. Nagornov, V. A. Luzgachev, V. V. Mescheryakova, A. G. Mescheryakov // Science in Central Russia. - 2015. – Vol. 6 (18). - P. 40-48.
4. Tarasik V. P. Mathematical modeling of technical systems: a textbook / V. P. Tarasik. - Minsk: Novoyeznanie, 2013. - 584 с.
5. Ashhimin, V.N. Introduction to Mathematical Modeling / V.N. Ashhimin, M.B. Gitman, C.E. Keller et al; ed. by V.P. Trusov. - Moscow: Logos, 2004. – P. 440.
6. Jelena Vlastic, Zoran Zekovic, Stela Jokic, Sandra Svilovic, Strahinja Kovacevic, Senka Vidovic, Winter Chaber: Supercritical Carbon Dioxide Extraction and Mathematical Modeling of Extraction Process, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 117, 2016, P.89-97, ISSN 0896-8446
7. Mukhammadiev B.T. Parametric analysis of CO₂ extraction of plant ingredients / B.T. Mukhammadiev, L.R. Dzhuraeva // Universum: Chemistry and Biology: electronic scientific journal. - № 2(68).
8. Özkal S.G. M.E. Yener, L. Bayındırlı, Modeling of mass transfer in apricot kernel oil extraction by supercritical carbon dioxide, Journal of Supercritical Fluids, Vol. 35, Issue 2, 2005, P. 119-127, ISSN 0896-8446
9. Sovova, H. "Extraction rate of vegetable oil with supercritical CO₂ - I. Modeling extraction curves." Chemical and Technical Sciences Vol. 49 (1994): P. 409-414.
10. Kinetics of extraction of biologically active substances of medicinal raw materials by different methods of extraction V.V. Milevskaya et al. Bulletin of the Moscow University, 2017. - 281-289.
11. Matveenkov E. V. Problems of modern agrarian science: proceedings of international extramural scientific conference / Matveenkov E. V. N. A. Velichko, S. V. Ushanov, E. N. Aeshina Krasnoyarsk, 2014 // responsible

for the issue: G. I. Tsuglenok, Zh. N. Shmeleva. - Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, Vol. 10. 2015. - P. 169-174.

12. Bukeyeva A.B. Review of modern methods of isolation of bioactive substances from plants / A.B. Bukeyeva, S.Zh. Kudaibergenova // Bulletin of ENU. - 2012. - № 2. - С. 192-197..

13. Osetrova I.S., Osipov N.A. Microsoft Visual Basic for Application - SPb: NRU ITMO, 2013. - 120 с.

14. Gubernatorov, V.V. Optimization of the process of water-vacuum extraction of birch chaga mushroom by selecting mode parameters / V.V. Gubernatorov, AV Safina, Sh. R. Mukhametzyanov // Actual problems of forestry complex. Bryansk. - 2021. – Vol. 60. - P. 221-225

15. Safina, A.V. Intensification of the process of water extraction of chaga by periodic lowering of the medium pressure / A.V. Safina, V.V. Gubernatorov, V.V. Garaev, E.Yu. Razumov // Woodworking industry. - 2017. - № 2. - С. 50-53

16. Gubernatorov V.V.. Determination of the duration of the individual stages of water-vacuum extraction Inonotus obliquus / V.V. Gubernatorov, AV Safina, R.R. Safin // Woodworking Industry. - 2021. - № 3. - С. 41-48.

©**Safina A.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: alb_saf@mail.ru; **Akhmethanova E.N.** - master's student, educational master, processing of wood materials, KNRTU, e-mail: sfornvi@gmail.com; **Safin R.R.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: cfaby@mail.ru; **Ismailov L.Yu.** – postgraduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: lenar-2015@mail.ru; **Baigildeeva E.I.** - PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: bai48@rambler.ru.

УДК 674.02

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ОБРАБОТКОЙ ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

К.В. Саерова, Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Хасаншин

На сегодняшний день особое внимание уделяется разработке композиционных материалов на основе дешевых отходов растительного и древесного происхождения, а также экологических связующих веществ, так как в связи с ужесточением экологических требований применение древесно-композитных материалов, содержащих в своем составе вредные связующие, ограничено. Эту нишу успешно занимают древесно-полимерные композиты. Однако, долговечность и конструкционные характеристики древесно-полимерного композита зависят от технических свойств связующего и древесного наполнителя, а эксплуатация композитов во влажной среде может приводить к потере прочности и биоповреждениям. В статье исследована технология высокочастотной (ВЧ) плазменной обработки предварительно термомодифицированной древесной муки с последующим изготовлением древесно-полимерного композита повышенной прочности и гигроскопичности. Проведенные ранее исследования по термомодифицированию древесины, позволили получить необходимые свойства материала, а именно снижение гигроскопичности и давления набухания. Второй ступенью исследования было проведение ВЧ-плазменной поверхностной обработки материала, позволившей улучшить механические свойства древесного наполнителя к полимерному связующему в ДПК на 20-23%.

Ключевые слова: древесная мука, полиэтилен, композит, твёрдость, прочность.

Введение

В настоящее время древесина является ценным строительным материалом. Ни одна область строительства не обходится без древесных материалов, при этом, к сожалению, материалы из древесины

используются не в полном объёме, это связано с гидрофильностью материала, вследствие чего он подвергается разбуханию и скоротечному гниению.

Аналитический обзор существующих методов обработки древесины показал, что придание гидрофобных свойств вызывает большой интерес у зарубежных и отечественных учёных [1]. Для этого за последние годы было предложено множество методов химической и термической обработки поверхности древесины.

Так, Birinci E. и др. исследовали влияние термической обработки на свойства древесины. Было установлено, что увеличение температуры и продолжительности термообработки древесины способствует снижению водопоглощения и набухания материала. Но при этом наблюдалось снижение показателей прочности на растяжение, сжатие и изгиб [4].

Ayılmiş N. и др. исследовали влияние предварительной термообработки обработки древесного сырья на свойства МДФ. Результаты исследований свидетельствуют о снижении толщины разбухания композита и некотором снижении механических свойств в пределах, отвечающих требованиям стандарта для МДФ [5].

В работе Yang H. и др. приведено исследование эффективности использования в качестве наполнителя термомодифицированных древесных частиц с целью улучшения физико-механических свойств и характеристик композитов на основе полиэтилена высокой плотности. Результаты показали, что у композитов с термообработанными древесными частицами значительно снизилось содержание влаги, водопоглощение и набухание, в то время как улучшения прочностных свойств при изгибе и растяжении не наблюдалось [6, 8].

Исследования Сафина Р.Р. и др. [3] показали, что технология термической обработки древесины обеспечивает получение материала с прогнозируемыми потребительскими свойствами, важнейшие из которых – продление срока эксплуатации, стабильность геометрических размеров, богатая цветовая гамма, высокая биостойкость, что ведет к расширению областей применения изделий из древесины. Однако исследователи указывают на значительное снижение адгезии клееных составов к термодревесине, что осложняет создание клееных конструкций высокой прочности.

В работе Хасаншина Р.Р. и др. было изучено воздействие плазмы на поверхность древесных материалов с целью повышения адгезии связующих к древесине. Представлена технология проведения процесса низкотемпературной плазменной обработки. Выявлено, что при увеличении мощности и продолжительности плазменной обработки адгезия между наполнителями увеличилась [1].

Собственный опыт исследований и детальное изучение существующих работ позволили сделать вывод о том, что термомодифицирование древесного наполнителя в композитах позволяет добиться таких важных параметров как снижение гигроскопичности и давления набухания в материале, тем самым предотвращая образование микротрещин и увеличивая эксплуатационные характеристики изделия [1]. Однако, процесс термической модификации имеет и негативную сторону, он снижает адгезионные свойства древесного материала [2].

С целью решения данной проблемы предлагается двухступенчатый способ обработки древесного наполнителя, а именно объёмная (термическая) обработка, которая снижает уровень гигроскопичности и давления набухания и последующая поверхностная ВЧ-плазменная обработка, которая вызывает повышение смачиваемости и адгезии между наполнителем и матрицей, а также механических свойств.

Методы и материалы

Для производства образцов древеснополимерного композита использовались следующие составляющие: полиэтилен низкого давления, древесная мука смешанных пород марки 400, специальные добавки – антиоксидант IRGANOX 1010 (для защиты от термоокислительной деструкции).

При этом древесная мука была трёх видов: 1) в натуральном виде; 2) термически обработанная при температурах 220 и 240 °С; 3) прошедшая термическую и ВЧ-плазменную обработку.

Первым этапом исследования влияния двухступенчатой обработки на качество древесно-полимерного композита была термическая обработка измельченной древесины, с целью снижения её гигроскопичности и давления набухания. Для проведения процесса высокотемпературной обработки древесной муки была разработана экспериментальная установка, схема и общий вид которой представлен на рисунке 1.

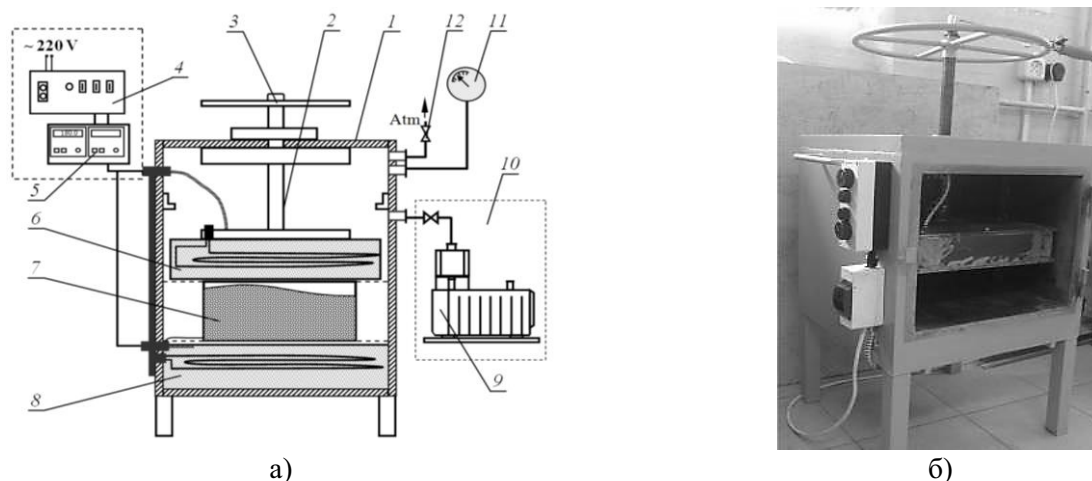


Рис 1. Схема (а) и общий (б) вид экспериментальной установки по термической обработке древесного наполнителя

Термомодифицирование древесного сырья проводилось на экспериментальной установке вакуумно-контактным способом. Для этого древесную муку загружали в металлический контейнер, который помещался в камеру высокотемпературной обработки. Выбор данного способа модифицирования материала связан с тем, что при контактном теплоподводе можно добиться высокого качества термообработки и точного достижения требуемой степени термомодифицирования [10].

Установка состоит из камеры термической обработки 1, сообщенной с линией вакуумирования 10 с вакуумным насосом 9. Подвод тепловой энергии к обрабатываемому сырью, находящемуся в металлическом контейнере 7, осуществляется с помощью двух нагревательных плит: подвижной сверху 6 и неподвижной снизу 8, заключенных в металлический корпус с двойными стенками.

Металлический контейнер 7 с измельченным сырьем помещается между плитами 6 и 8. Для нагрева плит используются встроенные в нее теплоэлектронагреватели. Температура нагрева регулируется контрольно-измерительным прибором 5. Экспериментальная установка снабжена устройством защитного отключения 4.

Термическая обработка древесной муки осуществлялась при температурах 220 и 240 С в течение 2 часов, остаточное давление в камере составляло 20 кПа.

Высокочастотная плазменная обработка наполнителя проводилась в специальной климатической камере, снабженной высокочастотным генератором. Установка плазменной обработки (рис. 2) включает вакуумную камеру 2, высокочастотный генератор 3, баллон со сжатым плазмообразующим газом 4, вакуумный насос 5, плазмотрон 6, в котором установлены электроды 7, соединенные электрическим кабелем 8 с высокочастотным генератором 3. Баллон с рабочим газом 4 сообщен с вакуумной камерой 2 через регулирующий вентиль 9, ротаметр 10, вентили 11, 12 и плазмотрон 6.

Вакуумная камера 2 снабжена контрольно-измерительным прибором 13 (вакуумметром).

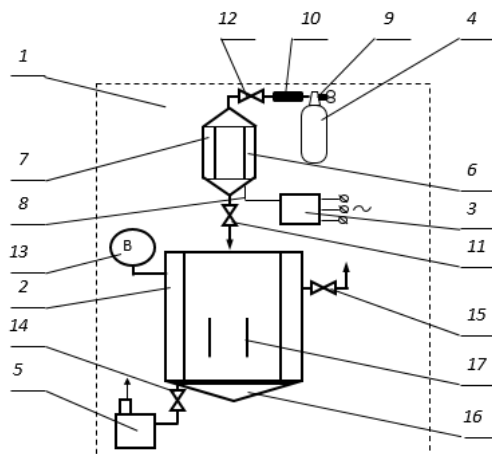


Рис. 2. Принципиальная схема высокочастотной плазменной установки

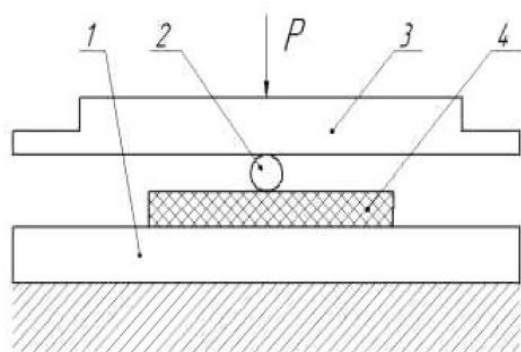
Древесное сырье обрабатывалось в плазме высокочастотного индукционного разряда с выходными параметрами: частота генерации 14 МГц, продолжительность обработки образцов до 15 минут, расход плазмообразующего газа $G=0,04$ г/с, рабочее напряжение на аноде $U_a = 1,5-7,5$ кВ, сила тока на аноде $I_a = 0,3-0,8$ А. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон.

Далее древесный наполнитель, прошедший двухступенчатую обработку, был использован для получения древесно-полимерного композита в одношнековом лабораторном экструдере. Соотношение древесной муки и полимера составило (%): 40/60. Концентрация специальных добавок в композиции задавалась согласно рекомендациям в литературных источниках и составляла 2-3% [9].

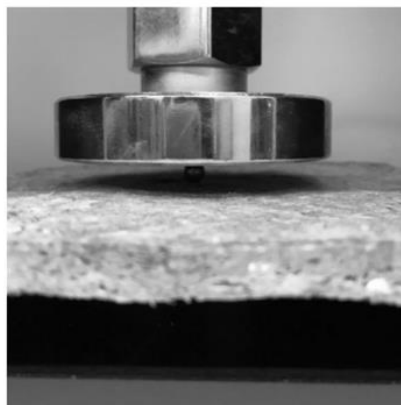
Следующий этап исследований – определение физико-механических характеристик древесно-полимерных композитов.

Твердость поверхности для древесно-полимерных композитов, особенно террасной доски является важной характеристикой, поскольку она определяет способность материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела. Твердость образцов определялась по Бринелю ISO 2039-1. Стальной шарик вдавливался в поверхность испытуемого материала толщиной 20 мм (рис. 3). Диаметр шарика составлял 10 мм. Через 30 с после приложения нагрузки измерялась глубина вдавливания. Твердость при вдавливании шарика рассчитывается как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка (Н/мм^2).

Для большей точности измерения проводились 5 раз в разных местах поверхности каждого материала, после чего определялось среднее значение.



а)



б)

Рис. 3. Схема (а) и фото (б) устройства для определения твердости материалов: 1 – плита; 2 – металлический шар; 3 – вдавливающая (подвижная) плита; 4 – образец



Рис. 4. Механические испытания образцов композита при определении предела прочности на разрыв

Исследование композитов по определению прочности на разрыв проводилось на многофункциональной разрывной машине РЭМ 10. Испытуемые образцы композита стандартизированных размеров (ГОСТ 11262–80) растягивались с постоянной скоростью деформирования, равной 30-40 мм/мин до момента их разрыва. В течение всего процесса испытания измерялась нагрузка, прикладываемая к материалу.

Результаты

Влияние термомодифицирования с последующей ВЧ-плазменной обработкой наполнителя на физико-механические свойства древесно-полимерного композита представлены на рис. 5-6.

На рис. 5 приведены результаты испытаний на твердость древесно-полимерных композитов, изготовленных на основе модифицированной древесной муки.

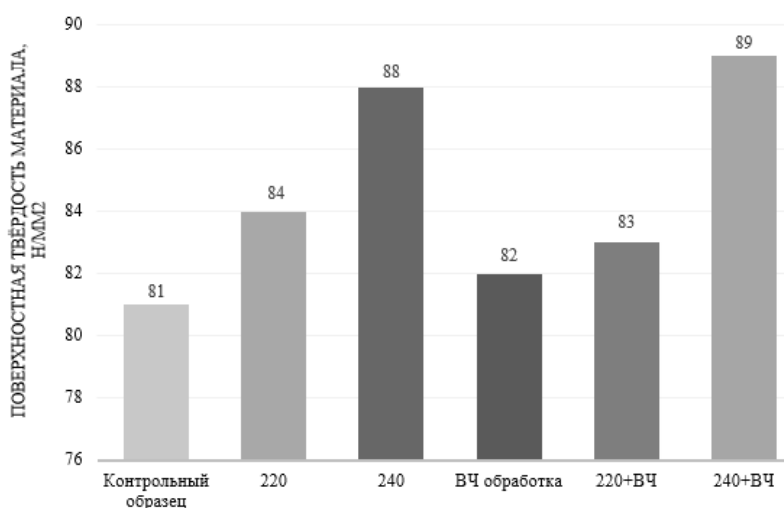


Рис. 5. Твердость поверхностных слоев древесно-полимерного композита в зависимости от обработки наполнителя

Из рисунка 5 можно сделать вывод, что на показатель твердости древесно-полимерного композита значительное влияние оказывает только термомодифицирование. ВЧ-плазменная обработка не показала каких-либо изменений, это можно объяснить тем, что одним из преимуществ термической модификации является придание твердости древесине на определенной степени термообработки.

На рисунке 6 представлены технические характеристики ДПК на основе термически модифицированной древесины с последующей плазменной обработкой: прочность образцов к разрыву.

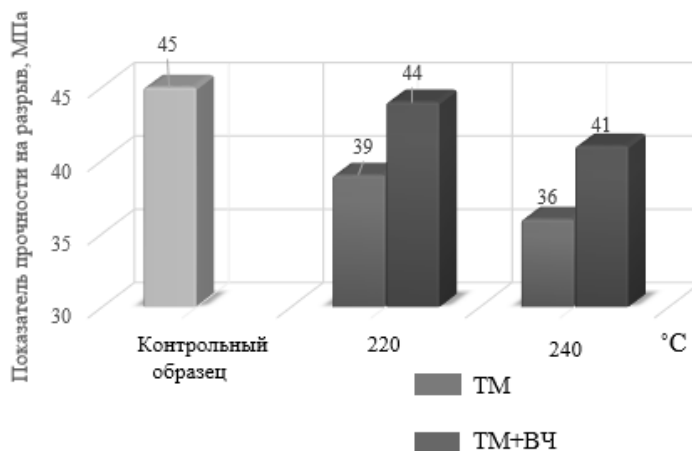


Рис. 6. Прочность на разрыв

Из графика, приведённого на рисунке 6 видно, что термически модифицированные образцы значительно уступают по прочности образцам, подверженным двухступенчатой обработке. При

увеличении температуры обработки наполнителя происходит снижение предела прочности на разрыв, в этом можно убедиться, сравнивая образцы, обработанные при 220 и 240 °С с контрольным образцом. При этом предел прочности обработанной двухступенчатым способом древесины достигает 44 МПа для измельчённой древесины, предварительно обработанной при 220 °С, и при повышении температуры обработки до 240 °С – 41 МПа. Подобное изменение свойств материала связано с изменениями микроструктуры поверхностных слоев под действием ВЧ-плазменной обработки. Происходит изменение плотности укладки коллагеновых фибрилл, первичных и вторичных волокон, как следствие, изменяется пористость поверхностных слоев материала.

Эффект плазменного и термического воздействия на древесину проверяли сравнением термомодифицированных образцов с образцами, прошедшими двухступенчатую обработку, электронно-микроскопическим способом.

Проведённое электронно-микроскопическое исследование образцов древесины свидетельствуют об изменении их волокнистой микроструктуры (рис. 7). Плазменная обработка влияет на капиллярно-пористую структуру древесины.

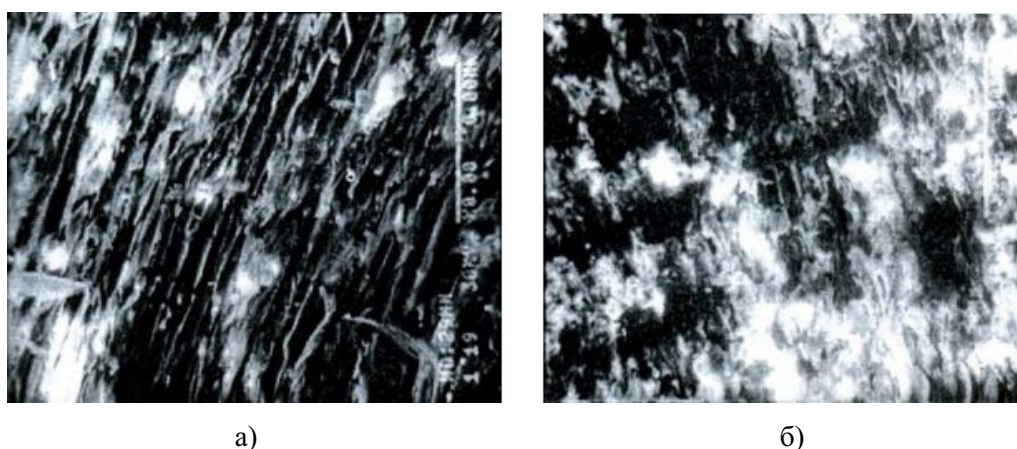


Рис. 7. Микрофотографии образцов древесины: а) образцы, прошедшие только термическую обработку; образцы, прошедшие двухступенчатую обработку б)

Заключение

В ходе проведения исследований удалось достичь поставленной цели, а именно повысить прочностные свойства композита, рассчитать предел прочности обработанной и необработанной древесины, а также определить твёрдость поверхности ДПК в зависимости от вида обработки.

Представленные данные свидетельствуют о наличии общих принципов при физической ВЧ-плазменной модификации натуральных волокнисто-пористых материалов, таких как древесина, что позволит целенаправленно изменять технические и эксплуатационные свойства материалов. В основе двухступенчатой модификации лежит преобразование микроструктуры за счет реализации поверхностной и объемной обработки.

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 075-15- 2021-699.

Литература

1. Применение низкотемпературной плазменной обработки для повышения механических показателей клееных конструкций Хасаншин Р.Р., Саерова К.В., Галяветдинов Н.Р., Салимгараева Р.В., Мухаметзянов Ш.Р., Сафин Р.Р. Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 4. С. 67-74.
2. Сафин Р.Р. Галяветдинов Н.Р., Гараева А.Ф. Влияние высокотемпературной обработки на химический состав древесного наполнителя // Деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 1. С. 50-55.
3. Safin R.R., Shaikhutdinova A.R., Khasanshin R., Mukhametzyanov S., Safina A. [Increasing the strength of the glue line in the production of thermally modified wood paneling] Coatings. 2021. T. 11. № 2. P. 1-13.

4. Birinci, E. [Effect of heat-treatment on some properties of wood plastic composites] / E. Birinci, A. Kaymakci, T. Dundar, N. Ayrimis // Conference: International Forestry Symposium. - 2016. - № 1. - P. 832-838.
5. Ayrimis, N. [Properties of Biocomposite Films From PLA and Thermally Treated Wood Modified with Silver Nanoparticles Using Leaf Extracts of Oriental Sweetgum] N. Ayrimis, E. Yuttas, A. Durmus, F. Ozdemir // Journal of Polymers and the Environment. – 2021. – № 29. – P. 1-12.
6. Yang H., Hazen R.M., Finger L.W., Prewitt C.T. [Compressibility and crystal structure of sillimanite, Al₂SiO₅, at high pressure] // Phys. Chem. Minerals. 1997. V. 25. P. 39-47.
7. B.S. Aliya, A. Mubarak, A. Khan, A.I. Mustafa, [Modification of plywood surface with epoxy acrylate by photo-curing] Polymer-Plastics Technology and Engineering. 42(1) (2003) 123-138.
8. Y. Zhang, L. Ding, J. Gu, [Preparation and properties of a starch-based wood adhesive with high bonding strength and water resistance] J. Carbohydr. Polym. 115 (2015) 32-57.
9. N.R. Galyavetdinov, R.R. Khasanshin, R.R. Safin, R.G. Safin, E.Y. Razumov, [The usage of wood wastes in the manufacture of composite materials], International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM, Bulgaria, 2015, pp. 779-786.
10. R.R. Safin, R.R. Khasanshin, S.R. Mukhametzyanov, [Influence of technical parameters of disk-shaped reactor on productivity of heat treatment of crushed wood] IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Tomsk, 327(4), 2018, pp. 042095.

©Саерова К.В. – аспирант кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: senya97@inbox.ru; Мухаметзянов Ш.Р. – канд.техн.наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: joker444@yandex.ru; Хасаншин Р.Р. – д-р техн.наук, профессор кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: rusl2881@mail.ru.

UDC 674.02

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A POLYMER COMPOSITE OBTAINED BY TWO-STAGE PROCESSING OF WOOD FILLER

K.V. Saerova, Sh.R. Mukhametzyanov, R.R. Khasanshin

To date, special attention is paid to the development of composite materials based on cheap waste of plant and wood origin, as well as environmentally friendly binders, since due to stricter environmental requirements, the use of wood-composite materials containing harmful binders is limited. This niche is successfully occupied by wood-polymer composites. However, the durability and structural characteristics of a wood-polymer composite depend on the technical properties of the binder and wood filler, and the operation of composites in a humid environment can lead to loss of strength and bio-damage. The article investigates the technology of high-frequency (HF) plasma treatment of pre-thermomodified wood flour with subsequent production of a wood-polymer composite of increased strength and hygroscopicity. Previously conducted studies on the thermomodification of wood, allowed us to obtain the necessary properties of the material, namely, a decrease in hygroscopicity and swelling pressure. The second stage of the study was the RF plasma surface treatment of the material, which allowed to improve the mechanical properties of the wood filler to the polymer binder in the WPC by 20-23%.

Keywords: wood flour, polyethylene, composite, hardness, strength.

References

1. Application of low-temperature plasma treatment to improve the mechanical performance of glued structures Khasanshin R.R., Saerova K.V., Galyavetdinov N.R., Salimgaraeva R.V., Mukhametzyanov S.R., Safin R.R. Woodworking industry. 2021. No. 4. pp. 67-74.
2. Safin R.R. Galyavetdinov N.R., Garaeva A.F. The effect of high-temperature treatment on the chemical composition of wood filler // Woodworking industry. 2016. No. 1. pp. 50-55.

3. Safin R.R., Shaykhutdinova A.R., Khasanshin R., Mukhametzyanov S., Safina A. [Increasing the strength of the adhesive line in the production of thermally modified wooden panels] Coatings. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 1-13.
4. Birinchi, E. [The effect of heat treatment on some properties of wood-plastic composites] / E. Birinchi, A. Kaymakchi, T. Dundar, N. Ayrimis // Conference: International Symposium on Forestry. - 2016. - No. 1. - pp. 832-838.
5. Ayrimis, N. [Properties of biocomposite films from PLA and heat-treated wood modified with silver nanoparticles using extracts of Oriental oregano leaves] N. Ayrimis, E. Yuttas, A. Durmus, F. Ozdemir // Journal of Polymers and the Environment. – 2021. – No. 29. – pp. 1-12.
6. Yang H., Hazen R.M., Finger L.U., Pruitt K.T. [Compressibility and crystal structure of sillimanite, Al₂SiO₅, at high pressure] // Physics. Chem.. Minerals. 1997. Vol. 25. pp. 39-47.
7. B.S. Aliya, A. Mubarak, A. Khan, A.I. Mustafa, [Modification of plywood surface with epoxy acrylate by photo-curing] Technology and design of polymer plastics. 42(1) (2003) 123-138.
8. Yu. Zhang, L. Ding, J. Gu, [Preparation and properties of starch-based wood glue with high bonding strength and water resistance] J. Hydrocarbon. Polym. 115 (2015) 32-57.
9. N.R. Galyavetdinov, R.R. Khasanshin, R.R. Safin, R.G. Safin, E.Y. Razumov, [The use of wood waste in the production of composite materials], International Interdisciplinary Scientific Geoconference on Geodetic Geology and Management of Mountain ecology SGEM, Bulgaria, 2015, pp. 779-786.
10. R.R. Safin, R.R. Khasanshin, S.R. Mukhametzyanov, [Influence of technical parameters of a disk-shaped reactor on the performance of heat treatment of crushed wood] IOP Conference Series: Materials Science and Technology, Toms, 327(4), 2018, p. 042095.

©**Saerova K.V.** – postgraduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: senya97@inbox.ru; **Mukhametzyanov Sh.R.** – PhD of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and design of wood products, KNRTU, e-mail: joker775.87@mail.ru; **Khasanshin R.R.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of Department of Architecture and design of wood products, KNRTU, e-mail: rusl2881@mail.ru.

УДК 674 (620.1)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРЕССОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

О.Н. Бурмистрова, В.В. Побединский, И.Н. Кручинин, М.А. Михеевская, Е.А. Кунгурова

Рассмотрена проблема оценки физико-механических свойств прессованной древесины крупногабаритных изделий. Показано, что существующие нормативно-технические документы распространяются только на древесину, полученную термохимическим путем и при этом для малогабаритных деталей, т.е. с ненарушенной структурой, поэтому методы оценки свойств для такой древесины будет некорректно использовать для древесины прессованной. Такое положение делает актуальным направление создание новых методов оценки параметров прессованной древесины. Целью исследований была разработка методов определения физико-механических параметров крупногабаритных изделий на примере шпала из прессованной древесины березы. В работе рассматривались следующие задачи: 1) разработка требований к системе контроля качества крупногабаритных изделий из прессованной древесины; 2) разработка методики испытаний прессованной древесины; 3) выполнение экспериментов; 4) интерпретация результатов экспериментов. В качестве результатов получены методика определения неравномерности степени прессования образцов, уложенных по высоте в пресс-форме; методика для определения послойных показателей механических свойств (статическая твердость, сжатие вдоль волокон, местное смятие поперек волокон) прессованной древесины; выявлено, что статическая твердость прессованной древесины в крупногабаритных изделиях отличается до 3,8% в зависимости от расположения по длине ствола, а расхождение таких значений для не прессованной древесины значительно выше и достигает 16,2 %; предложенные методы более глубоко учитывают специфику процесса прессования

крупногабаритных изделий и позволяют точнее оценивать их физико-механические характеристики, поэтому могут быть рекомендованы для использования в практике подобных технологий деревообработки.

Ключевые слова: *прессованная древесина; физико-механические параметры прессованной древесины; методика оценки параметров прессованной древесины.*

Введение

В настоящее время все актуальнее становится проблема вовлечения в производство лиственных пород древесины [1]. Например, принципиально древесина березы может использоваться не только для производства шпона, но и в качестве крупногабаритных пиломатериалов [2]. Но если рассматривать для примера шпалы железнодорожного полотна, то возникает еще одна проблема — это отсутствие метода оценки физико-механических параметров такого типа материалов в случае прессованной древесины [3]. Известные исследования в этой области сосредоточены на разработках методов измерения ненарушенной структуры древесины [4,5], поэтому для прессованной древесины их использование будет некорректно. Известная нормативно-техническая документация на прессованную древесину, полученную термохимическим путем, предусматривает методы их оценки только для малогабаритных изделий, следовательно априори структура рассматривается как однородная, что не соответствует крупномерным изделиям [6]. Для таких материалов в методах измерения параметров необходимо учитывать, что стандартные пиломатериалы имеют ряд таких особенностей, как неоднородность строения во всех направлениях относительно волокон в радиальном, тангентальном, торцевом, а также по сечению и длине ствола дерева наблюдается анизотропия, наличие различных пороков и другие неоднородности [7,8].

Практика получения крупногабаритных изделий из прессованной древесины показывает, что оценка их физико-механических свойств требует корректировки. Чаще всего это вызвано трудоемкостью измерения и значительной неоднородностью свойств по длине изделия. Этот фактор напрямую влияет на потребительские свойства прессованных изделий. Для осуществления контроля качества такой продукции необходим целый комплекс организационных и технических мероприятий [9], в первую очередь, по методам измерения физико-механических параметров, которые на сегодня не разработаны.

Таким образом совершенствование и создание новых методов оценки физико-механических параметров изделий из прессованной древесины является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований была разработка методов определения физико-механических параметров крупногабаритных изделий на примере шпал из прессованной древесины березы.

В работе рассматривались следующие задачи:

1. Разработка требований к системе контроля качества крупногабаритных изделий из прессованной древесины.
2. Разработка методики испытаний прессованной древесины.
3. Выполнение экспериментов.
4. Интерпретация результатов экспериментов.

Методы и материалы

Методика и оборудование исследований в достаточной мере отражали реальные производственные условия процесса прессования. Испытание образцов на механические показатели прочности проводилось на испытательной машине, согласно ГОСТ 28840-90. В настоящих исследованиях в качестве основного средства измерения использовалась аттестованная разрывная машина марки РЭМ-50-А. Влажность образцов определялась весовым методом с помощью весов ВЛР-200 с относительной погрешностью измерений 0,025 %. Линейные размеры образцов измерялись штангенциркулем типа ШЦ-1 (ГОСТ 166-89) с погрешностью не более 0,02 %. Время выдержки под давлением контролировалось при помощи секундомера СОПР-3 (ГОСТ 5072-79 Е), относительная погрешность измерений составляет 0,17 %. Твердость измерялась по ГОСТ 9696-75 с относительной погрешностью 0,02 %. Масса измерялась путем взвешивания образцов на весах ВЛЗ-100 с относительной погрешностью измерения 0,05 %.

Экспериментальные исследования проводились в научной лаборатории УГТУ.

Результаты

Разработка требований к системе контроля качества крупногабаритных изделий из прессованной древесины

Оценка физико-механических свойств крупногабаритных прессованных изделия представляет значительную трудность как по толщине, так по длине изделия и без использования современных методов измерения, специализированного оборудования для измерений практически невозможно [10,11]. Поэтому предварительно потребовалось определить основные требования к системе контроля качества и параметрам измерений. Так, используемые в исследованиях контрольно-измерительные приборы по назначению и погрешностям должны соответствовать ГОСТ 10632-88. Для оценки основных эксплуатационных параметров крупногабаритных изделий из прессованной древесины, на примере шпал для железнодорожных путей необходимо провести комплекс процедур по оценке таких физико-механических показателей, как прочность, плотность, влажность, способность сопротивляться внешним нагрузкам. Наиболее важными параметрами, которые влияют на качество изделий из древесины, являются статическая твердость, сжатие вдоль волокон, местное смятия поперек волокон.

Также в испытаниях следует учитывать, что для крупногабаритных деталей необходимы значения указанных параметров не только на поверхности, но и в глубине древесины, как по сечению, так и по длине.

Разработка методики испытаний прессованной древесины

Такие параметры, как влажность, плотность и пористость прессованной древесины является достаточно сложным объектом для измерения. Чтобы определить возможные изменения параметров по толщине древесины, предложено раскраивать измеряемый образец послойно на пластины. В настоящих исследованиях каждый образец в виде бруса раскраивали по толщине на пластины, согласно схеме, представленной на рис. 1. Толщина пластин 1, 2, 3, 5, 6, 7 составляет 20 мм, толщина средней пластины № 4 – около 40 мм. Каждая пластина должна быть взвешена, определены её линейные размеры и плотность.

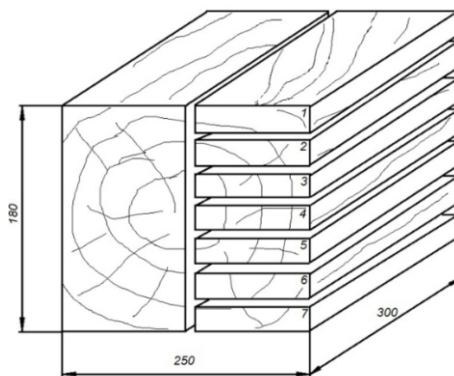


Рис. 1. Схема раскроя образца на пластины для определения физико-механических показателей по толщине: 1-7 – слои раскроя бруса по толщине

Из каждой пластины (1–7) необходимо выпилить образцы для определения физико-механических показателей, согласно схеме, представленной на рис. 2. Авторами определялось место и схема выпилки древесины из пластины материала. Испытание образцов на механические показатели прочности проводилось на испытательной машине, соответствующей ГОСТ 28840-90. При подготовке образцов линейные размеры измеряются штангенциркулем марки ШЦ-1 с погрешностью не более 0,02 %.

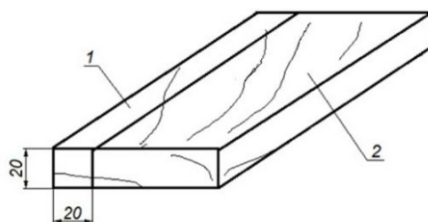


Рис. 2. Схема выпилки заготовки (1) из пластины (2) для изготовления экспериментальных образцов

После каждого вида испытания на механическую прочность выполняются измерения влажности образцов весовым методом, согласно ГОСТ 16483.7-71.

Исследования статической твердости древесины проводятся в соответствии с ГОСТ 16483.17-81 с применением испытательной машины. В качестве дополнительного приспособления используется пуансон с наконечником, имеющим полусферу радиусом $5,64 \pm 0,01$ мм. Для этого измерения из шпалы вырезается заготовка длиной 300 мм и поперечным сечением 180×250 мм, согласно схеме, показанной на рис. 1. В последующем из этой заготовки вырезается образец, длина и толщина которого соответствует размерам заготовки (см. рис. 2), шириной в 100 мм.

Для определения послойной твердости прессованной древесины, первоначально выполняется измерение статической твердости на поверхности образца в пяти точках. Места вдавливания пуансона показаны на рис. 3. После этой операции с верхней части заготовки срезается пластина толщиной 20 мм и на обратной стороне повторяются измерения в той же последовательности. Такие измерения статической твердости проводятся на трех пластинах.

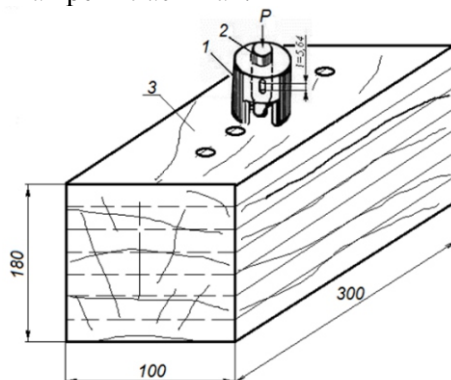


Рис. 3. Схема испытания прессованной древесины на статическую твердость: 1 – корпус; 2 – пуансон; 3 – заготовка

Статическая твердость древесины, H , вычисляется с погрешностью не более $0,1 \text{ Н/мм}^2$ по формуле

$$H = P / (\pi r^2)$$

где r – радиус полусферы пуансона, $r = 5,64$ мм;
 P – нагрузка на образец, Н.

Исследование предела прочности прессованной древесины при сжатии вдоль волокон выполняется в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 16483.10-73. При этом следует учитывать, что малые образцы должны иметь размеры $20 \times 20 \times 30$ мм, последний размер вдоль волокон. В соответствии с ГОСТ 16483.0-89 количество образцов для определения прочности на сжатие вдоль волокон должно составлять не менее 8 штук.

При испытаниях образцов на разрывной машине, необходимо контролировать скорость нагружения траверсы в пределах $25 \pm 0,5 \text{ кН/мин}$. Отсчёт нагрузки выполняется с точностью до 50 Н.

После испытаний на прочность делается отбор образцов длиной 30 мм с отпечатком пуансона и выполняется оценки влажности древесины. Полученные показатели прочности, τ_w , приводятся к нормализованной влажности, τ_{12} , по формуле

$$\tau_{12} = \tau_w [1 + \alpha(W - 12)],$$

где W – влажность образца в момент испытания, %;
 α – поправочный коэффициент на влажность.

Пересчёт статической твердости древесины на нормализованную влажность производится для образцов с влажностью $W = 5 \%$ с поправочным коэффициентом равным 1,215, при $W = 10 \%$ с коэффициентом равным 1,060, а при $W = 15 \%$ коэффициент принимается равным 0,910.

Выполнение экспериментов

Выполнение экспериментов проводились в научной лаборатории Ухтинского государственного технического университета. Перед проведением экспериментов с прессованной древесиной, нами были проведены исследования по оценке плотности и пористости древесины березы в ненарушенном

состоянии. Было выявлено, что плотность древесины в абсолютно сухом состоянии существенно изменяется по длине стволовой части. Установлено, что самая прочная древесина находится в комлевой части. Результаты исследования плотности древесины березы представлены в таблице 1. При анализе плотности древесины в поперечном сечении, можно видеть, что плотность древесины возрастает от центра к поверхности в среднем на 9,2 %. В таблице 2 приведены значения пористости древесины березы по длине стволовой части.

Анализируя данные таблицы 1 видно, что пористость древесины березы от комлевой части к вершине возрастает по длине ствола. По сечению пористость уменьшается от центра к поверхности. На рисунке 4 представлено изменение среднего значения пористости древесины березы.

Таблица 1 – Плотность древесины по сечению и длине стволовой части в абсолютно сухом состоянии (береза)

Расстояние от комлевой части $h, м$	Плотность $\rho_0, кг/м^3$			
	по длине стволовой части	по сечению ствола		
		на поверхности	0,5R (радиуса)	в центре
1	616,6	618,6	594,2	586,9
2	609,0	647,4	590,1	589,4
3	601,6	613,4	622,7	568,7
4	580,3	591,9	568,5	580,6
5	591,3	622,0	581,8	570,0
6	576,6	616,7	576,9	521,2
7	567,1	591,2	566,6	543,5
8	565,0	608,5	564,8	521,6
9	568,4	629,0	547,9	528,2

Таблица 2 – Пористость древесины по сечению и длине стволовой части в абсолютно сухом состоянии (береза)

Расстояние от комлевой части $h, м$	Пористость $\Pi, \%$			
	по длине стволовой части	по сечению ствола		
		на поверхности	0,5R (радиуса)	в центре
1	59,7	59,6	61,2	58,4
2	60,2	57,7	61,4	61,5
3	60,7	59,9	59,3	62,8
4	62,1	61,3	62,8	62,1
5	61,4	59,3	62,0	62,7
6	62,3	59,7	62,3	65,9
7	62,9	61,4	63,0	64,5
8	63,1	60,2	63,1	65,9
9	62,8	58,9	64,2	65,5



Рис. 4. Среднее значение пористости древесины березы по длине ствола

После выполнения измерений и статистической обработки результатов установлено, что средняя

статическая твердость в радиальном направлении изделия из прессованной древесины из средней части ствола составила 49,5 Н/мм². Из графика на рисунке 5 видно, что послойная статическая твердость со стороны приложения усилия прессования и средняя часть имеют одинаковую твердость, которая несколько выше по сравнению с твердостью слоев, примыкающих ко дну пресс-формы.

Средняя статическая твердость в радиальном направлении прессованной древесины из вершинной части ствола составила 48,2 Н/мм².

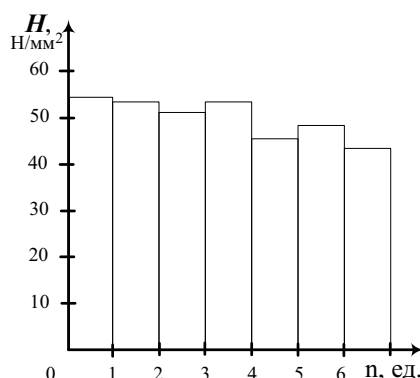


Рис. 5. Статическая твердость прессованной древесины из средней части по длине ствола при нормализованной влажности ($W=12\%$): n - количество слоев при раскрое бруса по толщине

В результате испытаний по указанной методике выявлено, что прессованная древесина из различных по длине ствола частей ствола дерева имеет практически одинаковую статическую твердость, разница не превышала 3,8 %. Не прессованная древесина брусков из различных частей ствола имела различную статическую твердость. Разница в статической твердости между комлевой и вершинной частью достигала 16,2 %.

Заключение

1. Предложена методика определения неравномерности степени прессования образцов, уложенных по высоте в пресс-форме.

2. Предложена оригинальная методика для определения послойных показателей механических свойств (статическая твердость, сжатие вдоль волокон, местное смятие поперек волокон) прессованной древесины.

3. Выявлено, что статическая твердость прессованной древесины в крупногабаритных изделиях отличается до 3,8% в зависимости от расположения по длине ствола. Расхождение таких значений для не прессованной древесины значительно выше и достигает 16,2 %.

4. Предложенные методы более глубоко учитывают специфику процесса прессования крупногабаритных изделий и позволяют точнее оценивать их физико-механические характеристики, поэтому могут быть рекомендованы для использования в практике подобных технологий деревообработки.

Литература

1. Курьянова Т.А. и др. Состояние вопроса производства и эксплуатации железнодорожных шпал из различных материалов / Т.К. Курьянова, А.Д. Платонов, М. А. Михеевская, Д.А. Паринков и др. // Лесотехнический журнал. – 2017. -Т.7. - № 4(28). – С. 157-166.

2. Платонов Д.А. и др. Получение шпал с заданными показателями качества из прессованной древесины березы / А. Д. Платонов, М.А. Михеевская, Т. К. Курьянова, С. Н. Снегирева и др. // Лесотехнический журнал. – 2018. -Т.8.-№ 4(32). – С. 187-193.

3. Курьянова Т.К. и др. Теоретические основы получения модифицированной древесины [Текст] / Т.К. Курьянова, А.Д. Платонов, М. А. Михеевская, С.Н. Снегирева и др. // Лесотехнический журнал. – 2018. -Т.8. - № 1(29). – С. 146-154. DOI:10.12737/article_5ab0dfc30d6f83.06547595.

4. Федюков В.И. и др. Основы обеспечения качества пилопродукции / В. И. Федюков, О. Г. Тарасова, М. В. Боярский; под общ. ред. В. И. Федюкова // Поволжский гос. технологический ун-т. Йошкар-Ола, 2012. – 163 с.

5. Шамаев В. А. и др. Модифицирование древесины / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, И. Н. Медведев.

– М.: ФЛИНТА: Наука, 2013. – 448 с.

6. Nikolic M, Lawther J.M, Sanadi A.R. Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review. Journal of Coatings Technology and Research. 2015 May;12(3):445-461. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9659-2>.

7. Platonov A. D., Kuryanova T.K., Mikheevskaya M.A., Snegireva S.N. Increasing the durability of sleepers made from of soft leaf-bearing species (2018). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. № 226 (2019) 012030 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/226/1/012030

8. Ren Li, Zhiqiang, Gao Shanghuan Feng, Jianmin Chang, Yanmei Wu, Rongfeng Huang (2018). Effects of preheating temperatures on the formation of sandwich compression and density distribution in the compressed wood. // Journal of Wood Science. pp. 1–7.

9. Shamaev V, Parinov D, Medvedev I. Wood modification by pressing-Wood // Science and Engineering studies, Issue 3(2), Vol.10, 2018, p.708-718.

10. Medvedev I.N., Shamayev V.A., Parinov D.A. Resource-saving production sleepers of modified wood / I.N. Medvedev, V.A. Shamayev, D.A. Parinov // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 11. С. 30-32.

11. Винник Н. И., Шамаев В. А. Некоторые физико-механические свойства модифицированной древесины различных марок / Н. И. Винник, В. А. Шамаев // Модифицирование, свойства древесины - Рига, «Зинатне», 1983. - С.74-77.

©Бурмистрова О.Н. – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГТУ»), e-mail: oburmistrova@ugtu.net; Побединский В.В. – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: robod@el.ru; Кручинин И.Н. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры транспорта и дорожного строительства, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: kinaa.k@yandex.ru; Михеевская М.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВО «УГТУ»), e-mail: mmiheevskaya@ugtu.net; Кунгурова Е.А. – магистр кафедры ландшафтного строительства, ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: kungurovaea@m.usfeu.ru.

UDC 674 (620.1)

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINING THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF LARGE-SIZED PRESSED WOOD PRODUCTS ELIABILITY PREDICTION OF FOREST MACHINE PARTS

O.N. Burmistrova, V.V. Pobedinskiy, I.N. Kruchinin, M.A. Mikheevskaya, E.A. Kungurova

The problem of evaluating the physical and mechanical properties of pressed wood of large-barite products is considered. It is shown that the existing regulatory and technical documents apply only to wood obtained thermochemically and at the same time for small-sized parts, i.e. with an intact structure, therefore, methods for assessing the properties of such wood will be incorrectly used for pressed wood. This situation makes the creation of new methods for evaluating the parameters of pressed wood an urgent direction. The purpose of the research was to develop methods for determining the physical and mechanical parameters of large-sized products on the example of sleepers made of pressed birch wood. The following tasks were considered in the work: 1) development of requirements for a quality control system for large-sized products made of pressed wood; 2) development of a test procedure for pressed wood; 3) execution of experiments; 4) interpretation of experimental results. As the results, the methodology for determining the unevenness of the degree of pressing of samples stacked in height in a mold is obtained; a method for determining the layered indicators of mechanical properties (static hardness, compression along the fibers, local crumpling across the fibers) of pressed wood; it was found that the static hardness of pressed wood in large-sized products differs by up to 3,8% depending on the location along the length of the trunk, and the discrepancy of such values for non-pressed wood is significantly higher 16,2 %; the proposed methods take into account the specifics of the pressing process of large-sized products more deeply and allow for a more accurate assessment of their physical and mechanical characteristics, therefore they can be recommended for use in the practice of such woodworking technologies.

Keywords: pressed wood; physical and mechanical parameters of pressed wood; methodology for estimating parameters of pressed wood.

References

1. Kuryanova T.A. et al. The state of the issue of production and operation of railway sleepers from various materials / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, M. A. Mikheevskaya, D.A. Parinov, etc. // Forestry Journal. – 2017. -Vol.7.- № 4(28). – Pp. 157-166.
 2. Platonov D.A. et al. Obtaining sleepers with specified quality indicators from pressed birch wood / A.D. Platonov, M.A. Mikheevskaya, T. K. Kuryanova, S. N. Snegireva, etc. // Lesotechnicheskiy zhurnal. – 2018. - T.8.-№ 4(32). – Pp. 187-193.
 3. Kuryanova T.K. et al. Theoretical foundations of obtaining modified wood [Text] / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, M. A. Mikheevskaya, S.N. Snegireva, etc. // Forestry Journal – 2018. -Vol.8.- № 1(29). – Pp. 146-154. DOI:10.12737/article_5ab0dfc30d6f83.06547595.
 4. Fedyukov V.I. et al. Fundamentals of quality assurance of sawn products / V. I. Fedyukov, O. G. Tarasova, M. V. Boyarsky; under the general editorship of V. I. Fedyukov // Volga State Technological University. Yoshkar-Ola, 2012. – 163 p.
 5. Shamaev V. A. et al. Wood modification / V. A. Shamaev, N. S. Nikulina, I. N. Medvedev. – M.: FLINT: Nauka, 2013. – 448 p.
 6. Nikolic M, Lawther J.M, Sanadi A.R. Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review. Journal of Coatings Technology and Research. 2015 May;12(3):445-461. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9659-2>.
 7. Platonov A. D., Kuryanova T.K., Mikheevskaya M.A., Snegireva S.N. Increasing the durability of sleepers made from soft leaf-bearing species (2018). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. № 226 (2019) 012030 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/226/1/012030
 8. Ren Li, Zhiqiang, Gao Shanghuan Feng, Jianmin Chang, Yanmei Wu, Rongfeng Huang (2018). Effects of preheating temperatures on the formation of sandwich compression and density distribution in the compressed wood. // Journal of Wood Science. pp. 1–7.
 9. Shamaev V, Parinov D, Medvedev I. Wood modification by pressing-Wood // Science and Engineering studies, Issue 3(2), Vol.10, 2018, p.708-718.
 10. Medvedev I.N., Shamayev V.A., Parinov D.A. Resource-saving production sleepers of modified wood / I.N. Medvedev, V.A. Shamayev, D.A. Parinov // Path and track economy. 2018. No. 11. pp. 30 -32.
 11. Vinnik N. I., Shamaev V. A. Some physico-mechanical properties of modified wood of various brands / N. I. Vinnik, V. A. Shamaev // Modification, properties of wood. - Riga, "Zinatne", 1983. - pp.74-77.
- ©**Burmistrova O.N.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, Ukhta State Technical University (USTU), e-mail: oburmistrova@ugtu.net; **Pobedinsky V.V.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Intelligent Systems, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: pobed@el.ru; **Kruchinin I.N.** – Grand PhD in Engineering Sciences, Professor of the Department of Transport and Road Construction, USFEU, e-mail: kinaa.k@yandex.ru; **Mikheevskaya M.A.** – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Technology and Transport and Technological Machines, USTU e-mail: mmiheevskaya@ugtu.net; **Kungurova E. A.** – Master of the Department of Landscape Construction, USFEU, e-mail: kungurovaea@m.usfeu.ru.

УДК 661.123

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВОДНО - ВАКУУМНОЙ ЭКСТРАКЦИИ INONOTUS OBLIQUUS

А.В. Сафина, В.В. Губернаторов

В статье представлена математическая модель водно-вакуумной экстракции Inonotus obliquus (березового гриба чага), описывающая взаимосвязанные процессы стадий предварительной дегазации материала и последовательно чередующихся стадий извлечения ценных компонентов при атмосферном давлении и в режиме вакуумирования. При этом происходящие физические явления рассмотрены через решение внешней задачи (теплообмена экстрагента с материалом и паровой фазой) и внутренней задачи - теплопереноса внутри материала. Решение внутренней задачи основано на диффузионном переносе целевого компонента через стенку капилляра в экстрагент и его молярном переносе под действием градиента давления внутри частицы чаги. Проведена проверка

адекватности разработанной математической модели водно-вакуумной экстракции чаги путем сопоставления расчетных данных с результатами экспериментальными исследованиями, расхождение между которыми составило 13 %. Последующее моделирование процесса экстракции позволило определить рациональные временные параметры отдельных стадий. Установлено, что стадию предварительной дегазации измельченного сырья целесообразно проводить в течение 4-5 минут, что способствует удалению воздуха и паров влаги из пор и капилляров растительной матрицы. Эффективная продолжительность стадии настаивания при атмосферном давлении составила 15-20 минут, а последующее вакуумирование системы и выдержку смеси при пониженном давлении целесообразно проводить в течение 10 минут. Общая продолжительность водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* составила чуть более 5 ч при проведении 11 циклов чередования стадий и достижения 30 % концентрации экстрактивных веществ в чаге.

Ключевые слова: экстракция, *Inonotus obliquus*, березовый гриб чага, математическое описание, моделирование, адекватность.

Введение

В настоящее время возрос интерес к природным сырьевым материалам, содержащим большое количество биологически активных веществ и имеющих высокую терапевтическую ценность. Широкая доступность и не высокая стоимость сырьевого материала повышает интерес производителей к получению доступных и эффективных препаратов. На фоне данной тенденции повысился интерес к березовому грибу чага *Inonotus obliquus*, который с давних времен славился своими иммуномодулирующими и противовоспалительными свойствами [1, 2].

Обзор современных научных исследований показал, что *Inonotus obliquus* содержит в себе широкий комплекс веществ, способных усиливать терапевтическую активность лекарственных препаратов и затормаживать развитие опухолей, ослабляя при этом симптоматику протекания болезни [3-5]. Благодаря высоким терапевтическим свойствам, экстракты чаги нашли свое применение в различных отраслях промышленности: в виде лекарственных средств в медицине, в виде противоаллергенных компонентов в фармацевтике и косметологии, в пищевой промышленности в виде добавок, повышающих иммунитет организма и улучшающих обмен веществ [6, 7].

Анализ существующих исследований в области извлечения биологически активных веществ из растительных материалов показал, что количественный выход и терапевтическая ценность получаемых экстрактов во многом зависит от применяемых способов экстрагирования [8-11]. В связи с этим, одним из направлений интенсификации процессов извлечения ценных компонентов из растительных материалов является внедрение разреженной среды, как на стадии подготовки сырья, так и при проведении самого процесса экстрагирования. Чередование стадий вакуумирования и создания атмосферного давления в аппарате положительно влияет на выход экстрактивных веществ, и способствует сокращению временных затрат, что подтверждено результатами исследований вакуумно-импульсной экстракции [12, 13].

Однако, сложность аппаратного оформления процесса вакуумно-импульсной экстракции, обусловленная необходимостью использования вакуумного ресивера с большим рабочим объемом, и не высокий перепад давлений на стадиях нагрева и вакуумирования не позволяют достичь необходимой степени разрыхления растительного сырья высокой плотности, соответственно, эффективного выхода целевых компонентов.

Решение указанных проблем возможно посредством экстрагирования в режиме чередования стадий настаивания при атмосферном давлении, последующего постепенного понижения давления и выдержки при постоянном пониженном давлении в циклическом режиме при реализации способа водно-вакуумной экстракции березового гриба чага. При этом внедрение стадии предварительного вакуумирования сырьевой чаги на стадии подготовки способствует облегчению процесса экстракции за счет удаления атмосферной влаги и воздуха из пор материала.

Теоретические и экспериментальные исследования водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага) подтвердили актуальность данного способа и его высокую эффективность [14,15], выражающуюся в повышении скорости экстракции и увеличения выхода экстрактивных веществ при сохранении их биологической активности. Целью настоящего исследования является разработка математической модели процесса водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага), позволяющей оценить влияние режимных параметров процесса на выход биологически активных

веществ и определить оптимальную продолжительность процесса, что может быть использовано при технологических расчетах осуществления предлагаемого способа экстракции на фармацевтических предприятиях.

Материалы и методы

Процесс водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* (березового гриба чага) основывается на известных положениях теории тепломассообменных процессов и диффузионных явлений, на законах равновесия между жидкостью и паром, а также существующих исследованиях в области извлечения биологически активных веществ из растительных материалов.

Анализ физической картины формализации происходящих процессов и явлений позволил разработать математическую модель водно-вакуумной экстракции чаги, которая представлена в виде взаимосвязанных математических описаний стадий предварительной дегазации материала и последовательно чередующихся стадий извлечения ценных компонентов в режимах «атмосферного давления» и «вакуумирования».

Пористое (несквозное) строение чаги обуславливает содержание в них воздуха и накопленной атмосферной влаги, которые затрудняют массообменные процессы экстракции. С целью интенсификации процесса извлечения ценных компонентов на первом этапе измельченную сырьевую чагу предварительно вакуумируют, т.е. осуществляется предварительная стадия – дегазация (рис. 1).

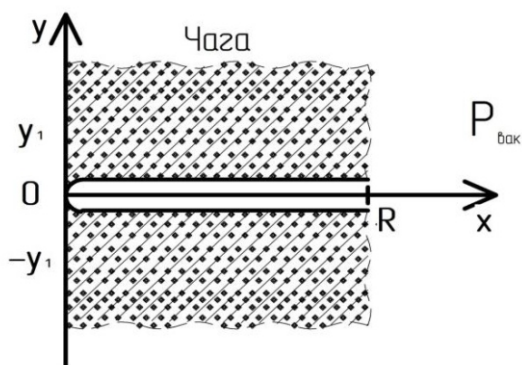
Данная стадия осуществляется однократно, а ее продолжительность определяется производительностью вакуумного насоса и предполагает удаление инертного газа из рабочей полости аппарата и понижение давления с барометрического до рабочего остаточного значения:

$$\tau_0 = \frac{V_{св}}{П_{вн}} \cdot \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}}, \quad (1)$$

где $V_{св}$ – свободный объем, м³; $П_{вн}$ – объемная производительность вакуумного насоса, м³/с; $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па; $P_{ост}$ – остаточное давление, Па.

Далее путем открытия вентиля под действием атмосферного давления в экстрактор подается предварительно нагретый до заданной температуры экстрагент – дистиллированная вода. Осуществляется

Рис. 1. Стадия предварительного вакуумирования сухого сырья



процесс пропитки до достижения материалом максимально возможного насыщения экстрагентом. За счет градиента концентраций происходит процесс миграции целевых компонентов через пористые клеточные стенки в экстрагент, находящийся в капиллярах чаги. Таким образом, в режиме «атмосферного давления» происходит пропитка матрицы (рисунок 2, а) – макроуровень и молекулярная диффузия целевых компонентов через стенки пор в экстрагент, находящийся в капилляре (рисунок 2, б) – микроуровень.

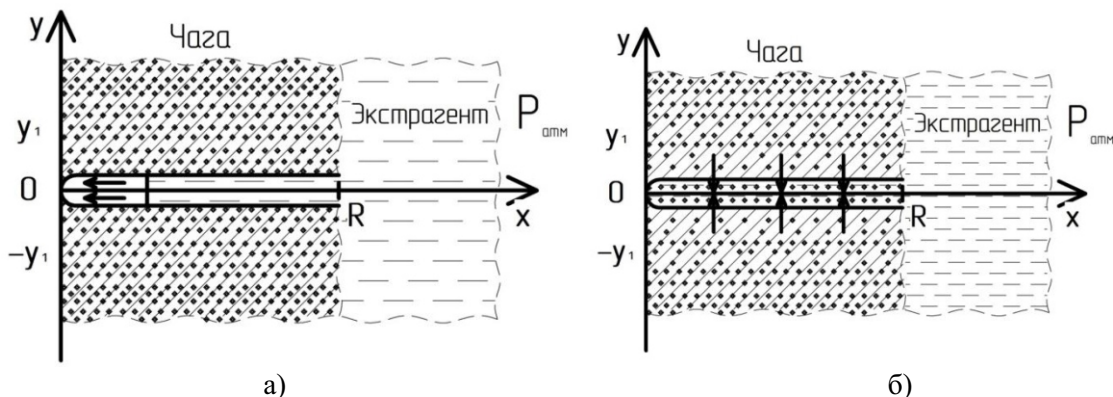


Рис. 2. Режим «атмосферного давления»: а) пропитка экстрагентом под действием атмосферного давления; б) молекулярная диффузия целевых компонентов через стенки пор в экстрагент

Математическое описание процесса экстрагирования в «режиме атмосферного давления» сводится к решению внутренней задачи как на макроуровне (стадия пропитки), так и на микроуровне (молекулярная диффузия целевых компонентов через стенки капилляров в экстрагент).

При математическом описании стадии пропитки материала экстрагентом (внутренняя задача, макроуровень) для нахождения нестационарных полей концентраций экстрагента в материале решается система дифференциальных уравнений переноса массы и тепла:

$$\frac{\partial C'_{ж}}{\partial \tau} = \frac{1}{x^{\Gamma}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (x^{\Gamma} \cdot w \cdot C'_{ж}), \quad (2)$$

$$c_{ч} \cdot \rho_{ч} \cdot \frac{\partial T_{ч}}{\partial \tau} = \frac{1}{x^{\Gamma}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{\Gamma} \cdot \lambda \cdot \frac{dT_{ч}}{dx} \right) + c_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot T_{ж} \cdot \frac{\partial C'_{ж}}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где $C'_{ж}$ – концентрация жидкости в чаге, долей единицы; x – координата, м; Γ – коэффициент формы; w – скорость массопереноса, м/с; $c_{ч}$ – удельная теплоемкость чаги, Дж/(кг·К); $\rho_{ч}$ – плотность чаги, кг/м³; $T_{ч}$ – температура чаги, °С; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $c_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $T_{ж}$ – температура жидкости, °С.

Движущей силой стадии пропитки экстрагентом является разность давлений в аппарате и внутри капилляра матрицы. Поэтому, согласно закону Пуазейля, скорость массопереноса пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости жидкости и может быть определена по уравнению:

$$w = - \frac{R_{\text{кап}}^2}{8 \cdot \eta_{ж}} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (4)$$

где $R_{\text{кап}}^2$ – радиус капилляра, мм; η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Граничные условия представлены уравнениями:

$$C'_{ж}|_{x=R} = \frac{(\rho_{\text{ист}} - \rho_{\text{ср}}) \cdot \rho_{ж}}{\rho_{\text{ист}} \cdot \rho_{\text{ср}}}, \quad (5)$$

$$T_{ч}|_{x=R} = T_{ж}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{ист}}$, $\rho_{\text{ср}}$, $\rho_{ж}$ – плотность истинная, средняя и жидкости, соответственно, кг/м³

Уравнение (5) характеризует условие, когда концентрация целевого компонента на поверхности материала равна максимально возможному значению при полном заполнении капилляра и определяется, соответственно, плотностью древесинного вещества (истинной плотностью) чаги, ее средней плотностью и плотностью жидкости (экстрагента).

Согласно граничному условию (7) для решения уравнения теплопереноса (3) температура на поверхности частицы чаги равна температуре жидкости (экстрагента). Изменение температуры жидкости находится из теплового баланса, где тепловая энергия, подведенная от калорифера, равна изменению внутренней энергии экстрагента в аппарате:

$$\frac{dT_{ж}}{d\tau} = \frac{K \cdot \Delta t \cdot F_{\text{кал}}}{\rho_{ж} \cdot V_{ж} \cdot c_{ж}}, \quad (7)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Δt – средний температурный напор, К; $F_{\text{кал}}$ – площадь калорифера, м²; $V_{ж}$ – объем жидкости, м³.

Для определения перепада давления в уравнении (4) зададим значение давления:

- в центре частицы

- на поверхности частицы

$$P|_{x=0} = P_{\text{ост}}, \quad (8)$$

$$P|_{x=R_{\text{кап}}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{ст.ж}}. \quad (9)$$

Согласно условиям (8) и (9), давление внутри капилляра равно остаточному давлению после вакуумирования, а давление на поверхности равно сумме атмосферного давления и давления столба жидкости.

Математическое описание массопереноса посредством молекулярной диффузии целевых компонентов через стенки капилляров (внутренней задачи, микроуровень) основано на использовании уравнения Фика:

$$J = -D_{\text{эфф}} \cdot \rho_{\text{ист}} \cdot \frac{dC_{\text{орг}}}{dy}, \quad (10)$$

где J – поток, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $D_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; $C''_{\text{орг}}$ – концентрация органических веществ в экстрагенте, долей единицы; y – координата, м .

Значение эффективного коэффициента диффузии для пористых материалов определяется по значению коэффициента свободной диффузии в жидкости и по параметру общей пористости материала, который является функцией коэффициента извилистости и коэффициента формы пор [16].

$$D_{\text{эфф}} = 0,9 \cdot D_{\text{св}} \cdot \xi_{\mu}^{4,3}, \quad (11)$$

где $D_{\text{св}}$ – свободный коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; ξ_{μ} – пористость материала, долей единицы.

Граничные условия для решений системы уравнений (2) – (11) задаются следующими выражениями:

Концентрация органических соединений в пропитывающей жидкости изменяется от 0 (в начале процесса) и далее на каждой итерации в зависимости от потока органических соединений на предыдущем шаге, таким образом, начальная концентрация органических веществ в экстрагенте равна нулю (12). В дальнейшем – по мере насыщения экстрагента – концентрация извлекаемого компонента в растворе определяется по уравнению (13).

$$C''_{\text{орг}}(y = 0; \tau = 0) = 0, \quad (12) \quad C''_{\text{орг}}(y = 0; \tau = \tau_{\text{диф}}) = \frac{J \cdot f_{\text{пор}} \cdot m_{\text{ч}}}{m_{\text{ж}}} \cdot \tau_{\text{диф}}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{диф}}$ – время диффузии, с ; $f_{\text{пор}}$ – удельная поверхность пор, $\text{м}^2/\text{кг}$; $m_{\text{ч}}$ – масса чаги, кг ; $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости, кг .

Концентрацию органических соединений в жидкой фазе стенок капилляров в начальный период процесса считаем равной максимально возможному равновесному значению:

$$C''_{\text{орг}}(y = y_1; \tau = 0) = C''_{\text{орг}}|_{\text{рав}}. \quad (14)$$

По мере истощения материала и соответствующего снижения концентрации органических веществ ниже максимально возможного равновесного значения расчет проводится по значению концентрации, определяемой как отношение величины целевого компонента, оставшегося в материале, к массе жидкости, находящейся в стенках капилляров:

$$C''_{\text{орг}}(y = y_1; \tau = \tau_{\text{диф}}) = \frac{m_{\text{орг}}|_{\tau=\tau_{\text{диф}}}}{C_{\text{ж}}' \cdot m_{\text{сух.в}}}, \quad (15)$$

где $m_{\text{орг}}|_{\tau=\tau_{\text{диф}}}$ – масса органических веществ, кг ; $m_{\text{сух.в}}$ – масса сухого вещества, кг .

Таким образом, система уравнений (2) – (15) описывает процесс экстрагирования в режиме «атмосферного давления».

При достижении концентрации раствора, находящегося в капиллярах, заданного значения, осуществляется переход к режиму вакуумирования.

Понижение давления в рабочем объеме обуславливает вскипание жидкости в капиллярах. Образующийся пар выталкивает экстрагент, способствуя молярному переносу экстрагента с растворенными веществами вдоль капилляра в растворитель. При этом происходит деформация и разрушение межфазного диффузионного пограничного слоя при общем перемешивании объема жидкости (рис. 3). Стадия продолжается до тех пор, пока система содержит необходимую энергию для поддержания процесса кипения.

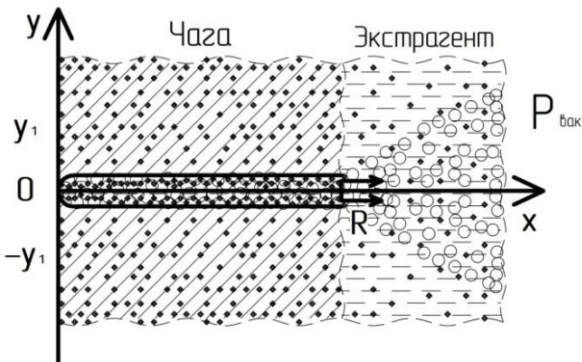


Рис. 3. Режим «вакуумирования»

Математическое описание процесса экстрагирования в режиме «вакуумирования» содержит расчет кинетики тепломассопереноса при изменении параметров паровой фазы в аппарате (внешняя задача) и расчет параметров внутреннего тепломассопереноса при вакуумном вскипании раствора в капиллярах и молярном переносе органических веществ в экстрагент.

Параметры парогазовой фазы определяются интенсивностью испарения жидкости с открытой поверхности и отводом паровоздушной смеси в вакуумную систему, а их изменение представлено дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dp_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{FR' \cdot T_{\text{пг}}}{V_{\text{св}}} j_{\text{п}} - p_{\text{п}} \left(\frac{P_{\text{сн}}}{V_{\text{св}}} - \frac{1}{T} \frac{dT_{\text{пг}}}{d\tau} \right), \quad (16) \quad \frac{dp_{\text{г}}}{d\tau} = -p_{\text{г}} \left(\frac{P_{\text{сн}}}{V_{\text{св}}} - \frac{1}{T} \frac{dT_{\text{пг}}}{d\tau} \right), \quad (17)$$

$$\frac{dT_{\text{пг}}}{d\tau} = \left[-\frac{P_{\text{сн}}}{V_{\text{св}}} + \frac{F \cdot R' \cdot T_{\text{ж}} \cdot j_{\text{п}} \cdot c_{\text{п}}}{V_{\text{св}} (p_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}} + p_{\text{п}} \cdot c_{\text{п}})} \right] \cdot T_{\text{пг}}, \quad (18)$$

где $p_{\text{г}}$, $p_{\text{п}}$ – давление газа и пара, соответственно, Па; $T_{\text{пг}}$ – температура парогазовой смеси, °С; F – площадь жидкости, м²; R' – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); $j_{\text{п}}$ – плотность потока испаряющейся жидкости, кг/(м²·с); $P_{\text{сн}}$ – производительность системы удаления парогазовой смеси, м³/с; $c_{\text{г}}$, $c_{\text{п}}$ – теплоемкость газа и пара, соответственно, Дж/(кг·К).

При достижении давления в аппарате равном значению, при котором начинается кипение жидкости, давление в аппарате будет определяться уравнением Антуана:

$$\ln P = A - \frac{B}{T_{\text{ж}} + C} \quad (19)$$

где A , B , C – константы уравнения Антуана.

Принимая во внимание, что кипящая жидкость моментально заполняет всё свободное пространство аппарата, изменение температуры жидкости будет прямо пропорционально производительности конденсатора и обратно пропорционально объему аппарата:

$$\frac{dT_{\text{ж}}}{d\tau} = -\frac{P_{\text{кон}}}{V_{\text{ап}}} \cdot T_{\text{ж}} \quad (20)$$

где $P_{\text{кон}}$ – объемная производительность конденсатора, м³/с.

При решении задачи внутреннего молярного переноса целевого компонента при вакуумном вскипании (внутренней задачи), который обусловлен плотностью экстрагента, его проницаемостью и динамической вязкостью используется уравнение массопереноса (2), где скорость движения жидкости по капилляру определяется уравнением Пуазейля (4). При этом давление внутри частицы определяется давлением в системе на стадии настаивания, т.е. равно атмосферному значению, а давление на поверхности частицы определяется по уравнению (20).

Далее давление в системе вновь поднимают до атмосферного и инициируют нагрев смеси. При переходе в область повышенного давления вскипание в капиллярах мгновенно прекращается. Пары влаги, находящиеся в капиллярах, конденсируются, создавая в них вновь разрежение. За счет создавшегося перепада давления новые порции растворителя заполняют поры и капилляры матрицы. Таким образом, повторяются стадии пропитки, молекулярной диффузии и молярного переноса. При этом насыщенный целевым компонентом раствор внутри капилляров периодически заменяется на менее концентрированный из общего объема смеси. Циклы повторяются до достижения необходимой степени извлечения целевого компонента.

Представленная система уравнений (1) – (20) описывает процесс водно-вакуумной экстракции чаги, характеризуя взаимосвязанные процессы вариации давления в аппарате и внутреннего тепломассопереноса.

Результаты

Для установления адекватности представленного математического описания реальной физической картине были сопоставлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования процесса.

Экспериментальные данные получены на лабораторном оборудовании при исследовании кинетики водно-вакуумной экстракции березового гриба чага в широком диапазоне изменения режимных параметров [17]. Экспериментальные данные по изменению показателей пористости и удельной поверхности пор относительно различных зон гриба получены методом адсорбционной пирометрии.

Данные математического моделирования получены на основе решения математической модели методом конечных разностей с использованием программного средства Visual Basic for Applications.

На рисунке 4 представлены результаты проверки адекватности физического и математического моделирования. На графиках сплошными линиями изображены данные, полученные расчетным путем, точками – результаты экспериментов.

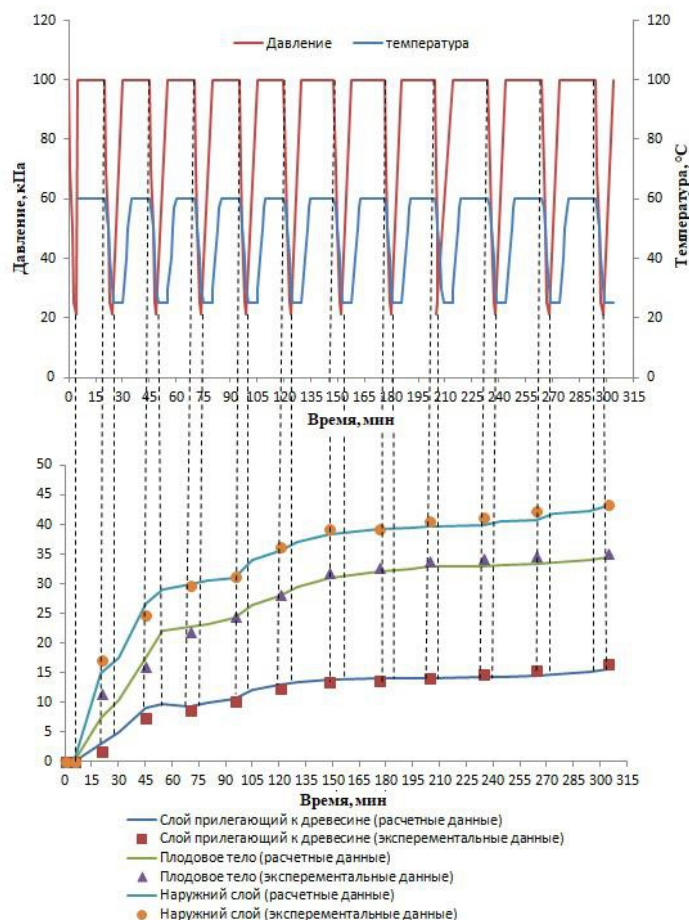


Рис. 4. Экспериментальное исследование и математическое моделирование водно-вакуумной экстракции

В результате математического моделирования установлено, что продолжительность стадии предварительного вакуумирования сухого сырья составляет 4-5 минут. Настаивание при атмосферном давлении оптимально осуществлять в течение 15-20 минут, а последующее вакуумирование – в течение 10 минут. Таким образом, продолжительность одного цикла «настаивание при атмосферном давлении-вакуумирование» составила 25-30 минут. Условием окончания процесса водно-вакуумной экстракции является вымывание целевого компонента в материале до заданного конечного значения. Установлено, что для достижения 30 % концентрации экстрактивных веществ в чаге необходимо провести 11 циклов чередования указанных стадий, включая начальную стадию предварительного вакуумирования в течение 5 минут. Общая продолжительность водно-вакуумной экстракции чаги составит 304 минуты или 5,06 часа.

Проверка на адекватность разработанной математической модели реальным процессам проводилась по известной методике путем статистической обработки опытных данных [18]. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 13 %.

Заключение

Анализ современных способов извлечения биологически активных веществ из растительного сырья и факторов интенсификации экстракционных процессов позволил установить, что одним из перспективных способов является водно-вакуумная экстракция *Inonotus obliquus* (березового гриба чага), заключающаяся в чередовании стадий настаивания при атмосферном давлении, последующего постепенного понижения давления и выдержки при постоянном пониженном давлении в циклическом режиме. В соответствии с физической картиной процесса разработана математическая модель процесса, представленная в виде взаимосвязанных математических описаний каждой стадии процесса и предполагающая решение внешней задачи (теплообмена экстрагента с материалом и паровой фазой) и внутренней задачи (теплопереноса внутри материала). Проверка адекватности

представленного математического описания осуществлялась посредством сопоставления расчетных данных с результатами экспериментальных исследований. Обработка данных методами математической статистики показала, что среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных не превышает 13 %. Удовлетворительная сходимость результатов физического и математического моделирования свидетельствует о том, что разработанная математическая модель адекватно описывает процесс водно-вакуумной экстракции чаги и может быть использована для отработки режимных параметров процесса. В результате последующего моделирования была определена продолжительность отдельных стадий и общая продолжительность процесса водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus*.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке и аппаратурном оформлении технологических процессов извлечения биологически активных веществ на лесозаготовительных и фармацевтических предприятиях.

Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Литература

1. Кароматов И.Д., Муродова М.М. Чага, березовый гриб // Биология и интегративная медицина. 2017. №2. С. 164-179.
2. Шариков А.М., Пашенова Н.В., Нешумаев Д.А., Новицкий Н.А. Исследование антибиотической активности гриба чаги в отношении возбудителя туляремии // Тихоокеанский медицинский журнал. 2010. №1. С. 64-65.
3. Корсун В.Ф., Краснопольская Л.М., Корсун Е.В., Авхукова М.А. Противоопухолевые свойства грибов // М.: Практическая медицина, 2012. - 210 с.
4. Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В. Химические и медико-биологические свойства чаги // Химико-фармацевтический журнал. 2006. Т. 40. № 10. С. 37-44.
5. Liuping Fan, Shaodong Ding, Lianzhong Ai, KequanDeng (2012) A water-soluble polysac-charide from chaga mushroom had potential as a natural antitumor agent with immunomodulatory activity. // CarbohydrPolym. 2012 Oct 1;90(2):870-4. Epub 2012 Jun 17. PMID: 22840014.
6. Губернаторов В.В., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Р. Применение чаги в медицине и биомедицинских технологиях // В сборнике: Молодежь и XXI век - 2017. материалы VII Международной молодежной научной конференции: в 4 томах. 2017. С. 296-298.
7. Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В. Чага, Чаговит, Чагалюкс в лечебной и профилактической практике // М.: Эдас. 2009. – 64 с.
8. Сафин Р.Г., Губернаторов В.В., Сафина А.В., Хузеев М.В. Обзор современных исследований в области извлечения биологически активных веществ из березового гриба чага для фармацевтических и пищевых отраслей промышленности // Деревообрабатывающая промышленность. 2019. № 3. С. 93-103.
9. Голованчиков А.Б., Грачева Н.В. Основные закономерности процесса экстрагирования чаги в электрическом поле // Вестник ТГТУ. 2011. №4. С. 950-957.
10. Рыбальченко А.С., Голицын В.П., Комарова Л.Ф. Исследование экстракции солодкового корня // Химия растительного сырья. – 2002. – №4. – С. 55-59.
11. Галяветдинов Н.Р., Воронин А.Е. Переработка древесной зелени с последующим получением полезных продуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 5. С. 138-140.
12. Гуськов А.А., Родионов Ю.В., Анохин С.А., Гливенко ва О.А., Плотникова С.В. Технология вакуумно-импульсного экстрагирования растворимых веществ из крапивы и хмеля // Инновационная техника и технология. 2018. № 2. С. 23-27.
13. Способ экстрагирования материалов: пат. № 2163827 РФ. заявл. 98113349/12, 06.07.1998; опубл. 10.03.2001.
14. Сафина А.В., Губернаторов В.В., Гараев Р.Р., Разумов Е.Ю. Интенсификация процесса водной экстракции чаги путем периодического понижения давления среды // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. № 2. С. 50-53.
15. Safin R.R., Mukhametzyanov S.R., Gubernatorov V.V. Water vacuum-oscillating extraction of chaga / В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019. 2019. С. 012086.

16. Тепляков Ю.А., Рудобашта С.П., Нечаев В.М., Климов А.М. Расчет кинетики процессов экстрагирования из твердых материалов с различной структурой // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 3. С. 553-560.

17. Сафина А.В., Губернаторов В.В., Сафин Р.Р. Определение продолжительности отдельных стадий водно-вакуумной экстракции *Inonotus obliquus* // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 3. С. 41-48.

18. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений // М.: Наука, 1971. – 576 с.

© Сафина А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: alb_saf@mail.ru; Губернаторов В.В. – старший преподаватель кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: valera_gub@mail.ru.

UDC 661.123

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS OF WATER - VACUUM EXTRACTION OF INONOTUS OBLIQUUS

A.V. Safina, V.V. Gubernatorov

The article presents a mathematical model of water-vacuum extraction of Inonotus obliquus (birch fungus chaga), describing the interrelated processes of the stages of preliminary degassing of the material and sequentially alternating stages of extraction of valuable components at atmospheric pressure and in the vacuum mode. At the same time, the occurring physical phenomena are considered through the solution of the external problem (heat and mass transfer of the extractant with the material and the vapor phase) and the internal problem - heat and mass transfer inside the material. The solution of the internal problem is based on the diffusion transfer of the target component through the capillary wall into the extractant and its molar transfer under the influence of a pressure gradient inside the chaga particle. The adequacy of the developed mathematical model of water-vacuum extraction of chaga was verified by comparing the calculated data with the results of experimental studies, the discrepancy between which was 13%. Subsequent modeling of the extraction process allowed us to determine the rational time parameters of individual stages. It has been established that it is advisable to carry out the stage of preliminary degassing of crushed raw materials for 4-5 minutes, which helps to remove air and moisture vapors from the pores and capillaries of the plant matrix. The effective duration of the infusion stage at atmospheric pressure was 15-20 minutes, and subsequent vacuuming of the system and holding the mixture at reduced pressure is advisable to carry out for 10 minutes. The total duration of water-vacuum extraction of Inonotus obliquus was slightly more than 5 hours during 11 cycles of alternating stages and achieving 30% concentration of extractive substances in the chaga.

Keywords: extraction, *Inonotus obliquus*, birch fungus chaga, mathematical description, modeling, adequacy.

References

1. Karamatov I.D., Muradova M.M. [Chaga, birch mushroom] *Biologiya i integrativnaya medicina* [Biology and integrative medicine] 2017. No.2. pp. 164-179. (In Russ.)
2. Sharikov A.M., Pashenova N.V., Neshumayev D.A., Novitsky N.A. [Investigation of the antibiotic activity of the fungus chaga against the causative agent of tularemia] *Tihookeanskij medicinskij zhurnal* [Pacific Medical Journal] 2010. No.1. pp. 64-65. (In Russ.)
3. Korsun V.F., Krasnopol'skaya L.M., Korsun E.V., Avkhukova M.A. [Antitumor properties of mushrooms] *Prakticheskaya medicina* [Practical medicine] 2012. - 210 p. (In Russ.)
4. Shashkina M.Ya., Shashkin P.N., Sergeev A.V. [Chemical and biomedical properties of chaga] *Himiko-farmaceuticheskij zhurnal* [Chemico-pharmaceutical journal] 2006. Vol. 40. No. 10. pp. 37-44. (In Russ.)
5. Liuping Fan, Shaodong Ding, Lianzhong Ai, Kequan Deng (2012) A water-soluble polysaccharide from chaga mushroom had potential as a natural antitumor agent with immunomodulatory activity. // *Carbohydr Polym.* 2012 Oct 1 ;90(2):870-4. Epub 2012 Jun 17. PMID: 22840014.
6. Governors V.V., Khasanshin R.R., Safin R.R. [Application of chaga in medicine and biomedical technologies] *V sbornike: Molodezh' i XXI vek - 2017. materialy VII Mezhdunarodnoj molodezhnoy nauchnoj konferencii: v 4 tomah* [In the collection: Youth and the XXI century - 2017. materials of the VII International Youth Scientific Conference: in 4 volumes] 2017. pp. 296-298. (In Russ.)

7. Shashkina M.Ya., Shashkin P.N., Sergeev A.V. [Chaga, Chagovit, Chagalyux in therapeutic and preventive practice] M.: Edas. [Moscow: Edas] 2009. – 64 p. (In Russ.)
8. Safin R.G., Gubernatorov V.V., Safina A.V., Khuzeev M.V. [Review of modern research in the field of extraction of biologically active substances from birch fungus chaga for pharmaceutical and food industries] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry] 2019. No. 3. pp. 93-103. (In Russ.)
9. Golovanchikov A.B., Gracheva N.V. [Basic laws of the process of extracting chaga in an electric field] *Vestnik TSTU*. 2011. No. 4. pp. 950-957. (In Russ.)
10. Rybalchenko A.S., Golitsyn V.P., Komarova L.F. [Investigation of licorice root extraction] *Himiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials] 2002. – No. 4. – pp. 55-59. (In Russ.)
11. Galyavetdinov N.R., Voronin A.E. [Processing of woody greens with the subsequent obtaining of useful products] *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University] 2014. V. 17. No. 5. S. 138-140. (In Russ.)
12. Guskov A.A., Rodionov Yu.V., Anokhin S.A., Glivenkova O.A., Plotnikova S.V. [Technology of vacuum-pulse extraction of soluble substances from nettles and hops] *Innovacionnaya tekhnika i tekhnologiya* [Innovative equipment and technology] 2018. No. 2. pp. 23-27. (In Russ.)
13. Method of extracting materials: patent No. 2163827 Russian Federation. declared 98113349/12, 06.07.1998; publ. 10.03.2001. (In Russ.)
14. Safina A.V., Gubernatorov V.V., Garaev R.R., Razumov E.Yu. [Intensification of the process of aqueous extraction of chaga by periodically lowering the pressure of the medium] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry] 2017. No. 2. pp. 50-53. (In Russ.)
15. Safin R.R., Mukhametzyanov S.R., Gubernatorov V.V. Water vacuum-oscillating extraction of chaga / In the Collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019. 2019. p. 012086. (In Russ.)
16. Teplyakov Yu.A., Rudobashta S.P., Nechaev V.M., Klimov A.M. [Calculation of the kinetics of extraction processes from solid materials with different structures] *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University] 2009. Vol. 15. No. 3. pp. 553 - 560. (In Russ.)
17. Safina A.V., Gubernatorov V.V., Safin R.R. [Determination of the duration of individual stages of water-vacuum extraction of *inonotus obliquus*] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry] 2021. No. 3. pp. 41-48. (In Russ.)
18. Mitropolsky A.K. [Technique of statistical computing] // Moscow: Nauka, 1971. – 576 p. (In Russ.)

©Safina A.V. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: alb_saf@mail.ru; Gubernatorov V.V. - Senior lecturer of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: Valera_gub@mail.ru.

УДК 691.175

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

Н.Р. Галяветдинов, Г.Ф. Илалова, К.В. Саерова, Я.Д. Погодина

В настоящее время все более актуальным становится выращивание однолетних, а также многолетних растений с закрытой корневой системой, ввиду хорошей укореняемости посадочного материала. Для этих целей широко применяют пластиковые контейнеры, которые после пересадки растений обычно выбрасывается, создавая при этом экологическую нагрузку на окружающую среду. В то же время, существует технология применения одноразовых бумажных (картонных) контейнеров. Однако использование данных методов для выращивания растений также имеет недостатки, одним из которых является низкая прочность при воздействии на нее воды. Хорошей альтернативой вышеописанных видов контейнеров является контейнеры из биоразлагаемых материалов, которые лишены всех перечисленных недостатков. По этой причине в статье представлены исследования, направленные на получение биоразлагаемого композитного материала для контейнера на основе полигидроксibuтирата и лигнина.

В статье описана технология получения биоразлагаемых композитов, приведены результаты исследований на определение плотности материала, твердости, прочности при растяжении и определение ударной вязкости. В результате анализа полученных результатов был сделан вывод о том, что оптимальным содержанием древесного наполнителя для создания биоразлагаемого контейнера является – 40-50%. Поскольку в данном интервале композитный материал обладает наиболее высокими физико-механическими характеристиками.

Ключевые слова: биоразлагаемый композит, полигидроксibuтират (ПГБ), закрытая корневая система, посадочный материал, технология лесовыращивания.

Введение

В последние годы на рынке посадочного материала активно развивается технология выращивания растений с закрытой корневой системой. Сущность метода выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой заключается в том, что саженцы выращивают в специальном субстрате в емкостях. Это способствует сокращению сроков выращивания растений в питомниках, увеличивает всхожесть и приживаемость посадочного материала, так как при посадке и перевозке не нарушается целостность корней, повышению качества посадочного материала, так как они имеют запас питательных веществ в собственном субстрате и уменьшают трудозатраты при извлечении выращенных растений из контейнера. Выращивание данным методом осуществляется в специальных контейнерах: торфяных брикетах, бумажных, целлюлозных или картонных ячейках, пластиковых контейнерах. Несмотря на то, что торфяные стаканчики и бумажные ячейки разлагаются под воздействием воды и почвенных микроорганизмов, недостатком использования данных контейнеров является быстрая степень деструкции и невозможность использования в технологиях лесовыращивания. В этих случаях используются пластиковые контейнеры, которые не разрушаются в процессе использования. Однако недостатком данных контейнеров является необходимость извлечения посадочного материала из контейнера перед высадкой. Что зачастую приводит к деформации и повреждению корней, поломке растения, кроме того недостатком использования пластиковых контейнеров является ухудшение экологической обстановки, в связи с тем, что материал используемый для их производства является неразлагаемым. Кроме того, сложностью является невозможность вторичной переработки пластикового контейнера.

Исходя из вышесказанного, для замещения производства пластиковых контейнеров, целесообразно использовать биоразлагаемые полимеры. Главным преимуществом использования биоразлагаемых контейнеров является возможность посадки растений вместе с контейнером, без извлечения растения из емкости, благодаря этому значительно упрощается процесс посадки и решается проблема повреждения корней растения. Для этого были рассмотрены существующие биоразлагаемые полимерные составы, которые деструктируют под действием микроорганизмов на воду, углекислый газ и на растительные составляющие, которые впоследствии становятся естественным удобрением для растений и почвы [1].

Полный обзор существующих современных биоразрушаемых полимеров, используемых в композитных составах, рассмотрен в работе [2]. Авторами было установлено, что на свойства композитного материала влияют вид полимера, применяемого в качестве связующего, содержание и режим обработки древесного наполнителя. Также в работах [3-8] изучено современное состояние практики биodeградируемых полимеров, их физико-механические свойства и способность разложения, проектирование и перспективы их применения.

Исследование влияния различных биоразлагаемых пластиков на почву проведено обществом биоразлагаемых пластиков [9]. Пять видов биопластика: поли-(3-гидроксibuтилвалерат) (PHB/V), поликапролактон (PCL), полибутиленсукцинат PBS, полибутиленсукцинат и адипинат (PBSA), и полилактид (PLA), синтезируемые различным путем, испытывали на биоразложение в полевых условиях. Образцы в виде тонкой гантелевидной пленки располагали на 19 участках острова Хонсю в Японии, 2 из которых располагали на почве в теплице с удобрением. В результате были выявлено следующее: образцы, которые располагались в тепличных условиях, разложились в течение 9 месяцев полностью, а на других участках разложение происходило медленнее, однако все биопластики разлагались. Вид почвы не оказывал существенного влияния на биоразложение образцов, также не наблюдалось корреляции в зависимости от степени кислотности почвы.

На сегодняшний день наиболее перспективным полимером для создания биоразлагаемых композитов является полигидроксibuтират (ПГБ) – это наиболее распространенный представитель

класса биоразрушаемых термопластов полигидроксиалкаонат (ПГА), который уже сейчас активно применяется за рубежом для получения продукции и материалов, представляющих интерес не только с позиций охраны окружающей среды, но и применения в медицине, упаковочной и пищевой промышленности, а также в сельском хозяйстве и в быту.

Полигидроксibuтират получают путем культивирования в специализированных условиях микробиологическим путем на углеводном сырье. В качестве углеводного сырья для синтеза могут быть использованы сахара, полученные из отходов сельскохозяйственной (свекловичный жом, пшеничные, ржаные отруби, стержни початков кукурузы) и деревообрабатывающей производств (с тружка, опилки, щепа, кора) [10-14].

Однако стоимость продукции из ПГА на сегодняшний день остается достаточно высокой, что является сдерживающим фактором для развития соответствующей биоиндустрии. В этой связи для снижения стоимости производства биоразлагаемых контейнеров на основе ПГБ предложена технология его наполнения древесным сырьем. Используя для этой цели древесные отходы, решается еще одна проблема – эффективная переработка отходов деревообрабатывающих и лесозаготовительных производств [15 - 18].

Методы и материалы

В качестве объекта исследования была использована мелкодисперсная измельченная древесина, подвергавшаяся процессу гидролиза с использованием сернистой кислоты в качестве гидролизующего агента. Процесс гидролиза проводился на лабораторной установке для исследования высокотемпературного гидролиза растительного сырья при температуре 170 °C в течение 30 минут с концентрацией сернистой кислоты 4%.

Предварительно, в результате химического анализа продуктов гидролиза, было установлено, что при использовании сосновой древесины в качестве сырья и при соблюдении данных режимных параметров и концентрации гидролизующего агента в 4% - процесс гидролиза характеризуется наибольший выходом лигнина и редуцирующих веществ [19, 20]. Под редуцирующими веществами понимается массовая доля восстанавливающих сахаров в гидролизате. Процесс гидролиза проходил в два этапа, так как при двустадийном гидролизе происходит увеличение редуцирующих веществ.

Полученный жидкий гидролизат использовался для образования полигидроксibuтирата, получаемого путем культивирования штамма *Cupriavidus nicator* в специальной среде. Подробная кинетика роста микроорганизмов в жидких гидролизатах древесного сырья и образования полигидроксibuтирата показана в статье [21].

Гидролизный лигнин, оставшийся после процесса гидролиза, оставляли в сушильном шкафу «Memmert VO400» для удаления влаги при постоянной температуре 100±5 °C до постоянной массы и измельчали до порошкообразного состояния для использования в качестве наполнителя в композитном материале.

Образцы композитного материала получали путем смешивания гидролизного лигнина с полигидроксibuтиратом, полученном при культивировании микроорганизмов и, в камере «Measuring Mixer 350E» смесительного оборудования Brabender «PLAsti-Corder® Lab-Station» при температуре 175 °C и скорости вращения роторов 40 об/мин в течение 7 минут. Полученную смесь подвергали вальцеванию через лабораторные вальцы UBL-6175 A с зазором 4 мм (рис. 1, рис. 2).



Рис. 1. Общий вид смесителя Brabender «PLAsti-Corder® Lab-Station»

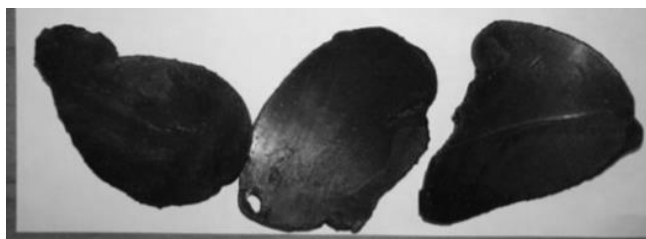


Рис. 2. Композитная масса на основе ПГБ и лигнина, полученная на смесителе Brabender

Физико-механические свойства композитного материала были исследованы на стандартных образцах в виде лопаток и брусков, полученных методом литья под давлением. Для получения образцов измельченный материал загружался в литьевую машину при температуре 160 °С и давлении впрыска 8 бар. Далее отбирались образцы, при визуальном осмотре имеющие гладкую поверхность без дефектов (рис. 3, рис. 4).



Рис. 3. Инжекционная литьевая машина для пробоподготовки

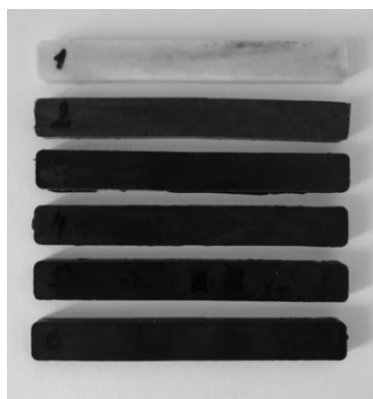


Рис. 4. Полученные на инжекционной литьевой машине образцы композитного материала в виде брусков ПГБ с различным содержанием лигнина

В результате были получены 7 образцов композитного материала с различной массовой концентрацией компонентов, представленной в таблице 1.

Таблица 1 - Состав биоразлагаемого композитного материала

№	Содержание	
	ПГБ, %	Наполнитель, %
1	100	0
2	80	20
3	70	30
4	60	40
5	50	50
6	40	60
7	30	70

Была проведена серия испытаний по определению физико-механических свойств композитного материала: определение плотности материала, определение твердости, определение прочности при растяжении, определение ударной вязкости.

Для определения плотности были использованы образцы композитного материала в виде брусков. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ Р 57713-2017, по методике которого образцы взвешивались на воздухе и в воде на микроаналитических весах ВМ-22. [22]

Исследование твердости материала является важной составляющей, так как она определяет способность материала оказывать сопротивление проникновению в него другого предмета. Экспериментальные исследования проводились согласно ГОСТ 24621-2015 на дюрометре Test Stand OS-300-2-ОО [23]. В трех различных местах испытуемого образца производилось мгновенное измерение и измерение через 15 секунд, после чего высчитывалось среднее арифметическое значение.

Определение прочности при растяжении образцов композитного материала производилось в соответствии с ГОСТ 11262-2017 [24]. Испытуемые образцы в виде лопаток растягивались вдоль продольной оси на разрывной машине при комнатной температуре с постоянной скоростью деформирования 50 мм/мин до момента разрушения образца.

Испытания на определение ударной вязкости по Изоду проходили по методу, указанному в ГОСТ 19109-2017, в соответствии с которым образцы подвергались разрушению ударом маятника на определенном расстоянии от места закрепления [25].

Результаты и обсуждение

В ходе проведения исследований был получен ряд графиков. Так как при 30%-ом содержании лигнина отлить образцы не удалось, поскольку содержание связующего полимера оказалось недостаточным для формирования образца и композитный материал крошился, то дальнейшие испытания с данным образцом не производились.

Результаты определения плотности в зависимости от содержания лигнина показаны на рисунке 5. Как показывает график, плотность образцов увеличивается с повышением содержания лигнина в композиционном материале, что объясняется большей плотностью наполнителя по сравнению с ПГБ.

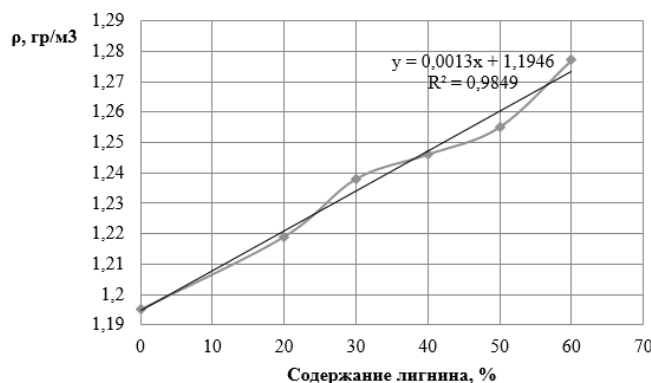


Рис. 5. Зависимость плотности композитного материала от содержания сухого гидролизного наполнителя

На рисунке 6 показаны результаты исследования образцов на твердость по Шору D. Для определения твердости были сделаны мгновенное измерение и измерение через 15 секунд после приложения нагрузки.

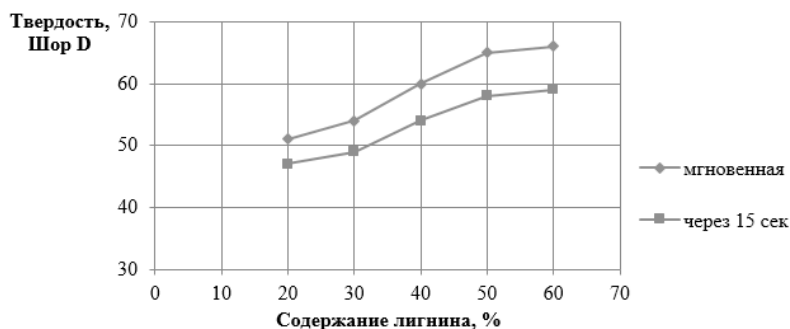


Рис. 6. Влияние содержания наполнителя на твердость по Шору D

Исходя из графика, можно сделать вывод, что твердость возрастает как при мгновенном измерении, так и при измерении спустя 15 секунд равномерно, с увеличением содержания наполнителя. Это связано с тем, что твердость лигнина выше, чем у ПГБ. При этом заметно, что при увеличении содержания лигнина в композитном материале от 20 до 40% наблюдается возрастание твердости на 30 %, в то время как при увеличении содержания лигнина от 50% до 60% изменения не столь значительны.

График влияния концентрации лигнина на предел прочности при растяжении показан на рисунке 7.

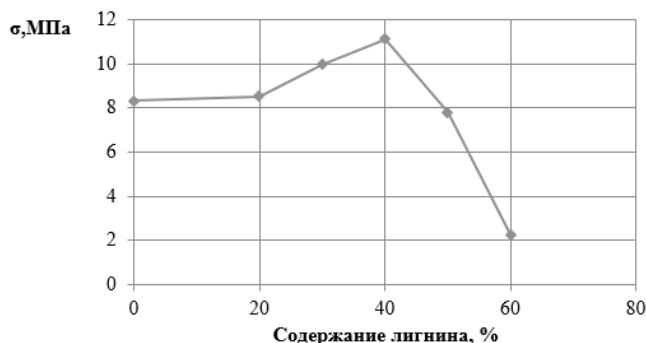


Рис. 7. Влияние содержания древесного наполнителя на предел прочности при растяжении

Испытания показали, что с увеличением концентрации лигнина происходит увеличение прочности до содержания наполнителя 40% с последующим значительным снижением, что связано с малым количеством связующей матрицы. Однако, при содержании наполнителя 50% прочность композитного материала практически сопоставима с прочностью чистого ПГБ.

На графике 8 приведены результаты исследований ударной вязкости по Шарпи. По графику наблюдается линейное уменьшение ударной вязкости при возрастании концентрации наполнителя.

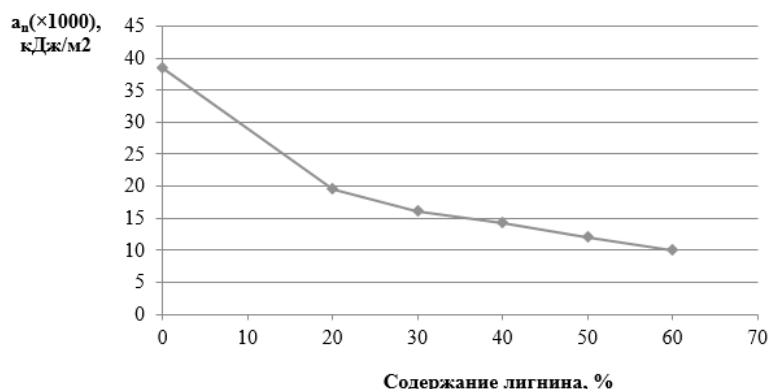


Рис. 8. Зависимость ударной вязкости композитного материала от содержания древесного наполнителя

Заключение

В зависимости от срока использования содержание лигнина в композитном материале при производстве биоразлагаемого контейнера может составлять до 50 %, при этом оптимальным по физико-механическим характеристикам является 40 %-ое содержание древесного наполнителя. Поэтому для создания биоразлагаемого контейнера для выращивания медленнорастущих саженцев с закрытой корневой системой, растущих от 1 до 3 лет, а также для транспортирования его на дальние расстояния, наиболее оптимальным является использование композитного материала с 40%-ым содержанием гидролизованного наполнителя, так как для таких условий необходима более высокая прочность контейнера и более медленное его разложение. Для посадочных материалов - однолеток, выдержка которых с закрытой корневой системой составляет до 1 года, для создания биоразлагаемого контейнера рекомендуется использовать композит с содержанием наполнителя 50%, так как в анаэробных условиях он разлагается быстрее, а его прочностные характеристики незначительно ниже, чем значение чистого ПГБ.

Благодарности

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 075-15- 2021-699.

Литература

1. Wróblewska-Krepsztul J., Rydzkowski T., Borowski G., Szczypiński M., Klepka T., Kumar Thakur V. Recent progress in biodegradable polymers and nanocomposite-based packaging materials for sustainable environment // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. - 2019. - С. 383-395.
2. Chan C.M., Vandi L.-J., Pratt S., Halley P., Richardson D., Werker A., Laycock B. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review // Polymer Reviews. - 2017. - С. 444-494.
3. Pillai C. K. S. Recent advances in biodegradable polymeric materials // Materials Science and Technology. - 2013. - С. 558-566.
4. Ахунова Л.В., Гараева А.Ф. Исследование механических характеристик биоразлагаемого композита на основе древесного наполнителя // Деревообрабатывающая промышленность. - 2016. - № 2. - С. 41-45.
5. Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R. Study of the destructive properties of biodegradable wood-filled composite material // Materials Science Forum. - 2020. - С. 290-295.
6. Galyavetdinov N.R., Safin R.R., Voronin A.E. Analysis of physico-mechanical properties of composites based on polylactide and thermally modified wood fibers // Materials Science Forum. - 2016. - Т. 870. - С. 202-206.

7. Safin R.R., Nazipova F.V., Ziatdinov R.R., Shaikhutdinova A.R., Beliakova E.A., Kainov P.A., Barcik S. The effect of ultrasonic extraction of soluble sugars from the wood filler on the strength properties of the composite based on mineral binder // *Key Engineering Materials*. - 2016. - Т. 688. - С. 138-144.
8. Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р., Талипова Г.А., Петров В.И. Исследование физико-механических свойств древесно-наполненных композитов на основе полилактида с целью создания биоразлагаемых упаковок // *Деревообрабатывающая промышленность*. - 2018. - № 4. - С. 12-18.
9. Safin R.R., Talipova G.A., Galyavetdinov N.R., Nazipova F.V., Salimgaraeva R.V. The study of the destructive properties of wood-filled composites for the production of biodegradable packaging materials // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. - 2019. - № 19. - С. 541.
10. Hoshino A., Sawada H., Yokota M., Tsuji M., Fukuda K. and Kimura M. Influence of weather conditions and soil properties on degradation of biodegradable plastics in soil // *Soil Science and Plant Nutrition*. - 2001. - pp. 35-43.
11. Demirel F., Germec M., Turhan I. Fermentable sugars production from wheat bran and rye bran: response surface model optimization of dilute sulfuric acid hydrolysis // *Environmental Technology*. - 2021.
12. Katrib F. Al, Chambat G., Joseleau J.P. Effect of Pretreatment of Poplar Wood Upon Enzymatic Saccharification // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. - 1992. - pp. 355-366.
13. Suryawanshi S.S., Sarje S.S., Loni P.C., Bhujbal S., Kamble P.P. Bioconversion of Sugarcane Molasses into Bioplastic (Polyhydroxybutyrate) using *Bacillus cereus* 2156 under Statistically Optimized Culture Conditions // *Analytical Chemistry Letters*. - 2020. - pp. 80-92.
14. Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф., Иглепова Ю.В., Сафина А.В., Петров В.И. Обзор зарубежных исследований в области переработки отходов однолетних сельскохозяйственных культур // *Деревообрабатывающая промышленность*. - 2018. - № 4. - С. 53-60.
15. Илалова Г.Ф., Иглепова Ю.В., Илалова А.Ф., Шагеева А.И., Мухтарова А.Р. Исследование обработки однолетних сельскохозяйственных растений для получения биоугля // В сборнике: «Наука молодых - будущее России» сборник научных статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 6 томах. - 2018. - С. 285-288.
16. Safin R.R., Nazipova F.V., Mukhametzyanov Sh.R., Voronin A.E. Pre-treatment of vegetable waste in the production of composite materials // *Key Engineering Materials*. - 2017, pp. - 53-57.
17. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Обзор современных исследований в области ацелирования древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. - 2022. - №2. - С.106-114.
18. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // 15th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM. - 2015. - pp. 699-706.
19. Илалова Г.Ф., Саерова К.В., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Сафиуллина А.Х. Исследование высокотемпературного гидролиза соснового опила сернистой кислотой с целью увеличения выхода редуцирующих веществ // *Деревообрабатывающая промышленность*. - 2020. - № 3. - С. 71-80.
20. Ilalova G., Safin R., Mukhametzyanov S., Gazizullina A. Hydrolysis as a basis for processing vegetable waste into bioplastics // *Energy Systems Environmental Impacts*. - ESEI 2020. - E3S Web of Conferences. - p. 03009.
21. Safin R., Galyavetdinov N., Salimgaraeva R., Ilalova G., Saerova K. Use of filled bioplastics in construction // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering. - STCCE - 2021. - E3S Web of Conferences. - p. 4013.
22. ГОСТ Р 57713-2017 Композиты полимерные. Методы определения плотности и относительной плотности по вытесненному объему жидкости. - М.: Стандартинформ. - 2017. - 15с.
23. ГОСТ 24621-2015 Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). - М.: Стандартинформ. - 2016. - 11с.
24. ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение. - М.: Стандартинформ. - 2018. - 20с.
25. ГОСТ 4647-2015 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи. - М.: Стандартинформ. - 2017.

©Галяветдинов Н.Р. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: pour777@mail.ru; Илалова Г.Ф. – аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: achtung.guzik@mail.ru; Саерова К.В. – аспирант кафедры архитектуры и дизайна изделий из

древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: senya97@inbox.ru; **Погодина Я.Д.** – магистрант кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: pogodinayana2000@mail.ru.

UDC 691.175

TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF BIODEGRADABLE COMPOSITES FOR AGRICULTURAL PURPOSES

N.R. Galyavetdinov, G.F. Ilalova, K.V. Saerova, Ya.D. Pogodina

At present, the cultivation of annuals, as well as perennials with a closed root system, is becoming more and more relevant, due to the good rooting of planting material. For these purposes, plastic containers are widely used, which, after transplanting plants, are usually thrown away, creating an environmental burden on the environment. At the same time, there is a technology for using disposable paper (cardboard) containers. However, the use of these methods for growing plants also has disadvantages, one of which is its low strength when exposed to water. A good alternative to the types of containers described above are containers made of biodegradable materials, which do not have all of the above disadvantages. For this reason, the article presents research aimed at the technology of creating a biodegradable composite material for a container based on polyhydroxybutyrate and lignin.

The article describes the technology for obtaining biodegradable composites, presents the results of studies to determine the density of the material, hardness, tensile strength and impact strength. As a result of the analysis of the results obtained, it was concluded that the optimal content of wood filler for creating a biodegradable container is 40% -50%. Since in this range the composite material has the highest physical and mechanical characteristics.

Keywords: biodegradable composite, polyhydroxybutyrate (PHB), closed root system, planting material, forest growing technology.

References

1. Wróblewska-Krepsztul J., Rydzkowski T., Borowski G., Szczypiński M., Klepka T., Kumar Thakur V. Recent progress in biodegradable polymers and nanocomposite-based packaging materials for sustainable environment // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. - 2019. - pp. 383-395.
2. Chan C.M., Vandi L.-J., Pratt S., Halley P., Richardson D., Werker A., Laycock B. Composites of Wood and Biodegradable Thermoplastics: A Review // Polymer Reviews. - 2017. - pp. 444-494.
3. Pillai C. K. S. Recent advances in biodegradable polymeric materials // Materials Science and Technology. - 2013. - pp. 558-566.
4. Akhunova L.V., Garaeva A.F. [Study of mechanical characteristics of a biodegradable composite based on wood filler] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. - 2016. - № 2. - pp. 41-45. (InRuss.)
5. Galyavetdinov N.R., Talipova G.A., Safin R.R. Study of the destructive properties of biodegradable wood-filled composite material // Materials Science Forum. - 2020. - pp. 290-295.
6. Galyavetdinov N.R., Safin R.R., Voronin A.E. Analysis of physico-mechanical properties of composites based on polylactide and thermally modified wood fibers // Materials Science Forum. - 2016. - V. 870. - pp. 202-206.
7. Safin R.R., Nazipova F.V., Ziatdinov R.R., Shaikhutdinova A.R., Beliakova E.A., Kainov P.A., Barcik S. The effect of ultrasonic extraction of soluble sugars from the wood filler on the strength properties of the composite based on mineral binder // Key Engineering Materials. - 2016. - V. 688. - pp. 138-144.
8. Galyavetdinov N.R., Safin R.R., Talipova G.A., Petrov V.I. [Study of the physical and mechanical properties of wood-filled composites based on polylactide in order to create biodegradable packaging] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. - 2018. - № 4. - pp. 12-18. (InRuss.)
9. Safin R.R., Talipova G.A., Galyavetdinov N.R., Nazipova F.V., Salimgaraeva R.V. The study of the destructive properties of wood-filled composites for the production of biodegradable packaging materials // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. - 2019. - № 19. - pp. 541.

10. Hoshino A., Sawada H., Yokota M., Tsuji M., Fukuda K. and Kimura M. Influence of weather conditions and soil properties on degradation of biodegradable plastics in soil // *Soil Science and Plant Nutrition*. – 2001. – pp. 35-43.
11. Demirel F., Germec M., Turhan I. Fermentable sugars production from wheat bran and rye bran: response surface model optimization of dilute sulfuric acid hydrolysis // *Environmental Technology*. – 2021.
12. Katrib F. Al, Chambat G., Joseleau J.P. Effect of Pretreatment of Poplar Wood Upon Enzymatic Saccharification // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. – 1992. – pp. 355-366.
13. Suryawanshi S.S., Sarje S.S., Loni P.C., Bhujbal S., Kamble P.P. Bioconversion of Sugarcane Molasses into Bioplastic (Polyhydroxybutyrate) using *Bacillus cereus* 2156 under Statistically Optimized Culture Conditions // *Analytical Chemistry Letters*. – 2020. – pp. 80-92.
14. Safin R.R., Ilalova G.F., Iglepova Yu.V., Safina A.V., Petrov V.I. [Review of foreign research in the field of waste processing of annual agricultural crops] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]*. – 2018. – № 4. – pp. 53-60. (In Russ.)
15. Ilalova G.F., Iglepova Yu.V., Ilalova A.F., Shageeva A.I., Mukhtarova A.R. [Research on the processing of annual agricultural plants for biochar production] // V sbornike: «Nauka molodyh - budushchee Rossii» sbornik nauchnyh statej 3-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh: v 6 tomah [In the collection: "Science of the young - the future of Russia" collection of scientific articles of the 3rd International scientific conference of promising developments of young scientists: in 6 volumes]. – 2018. – pp. 285-288. (In Russ.)
16. Safin R.R., Nazipova F.V., Mukhametzyanov Sh.R., Voronin A.E. Pre-treatment of vegetable waste in the production of composite materials // *Key Engineering Materials*. – 2017, pp. – 53-57.
17. Prokop'ev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. [Review of modern research in the field of wood acetylation] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]*. – 2022. – №2. – pp. 106-114.
18. Safin R.R., Voronin A.E., Shaikhutdinova A.R., Nazipova F.V., Kaynov P.A. Method of rational use of waste of timber industries // 15th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM. – 2015. – pp. 699–706.
19. Ilalova G.F., Saerova K.V., Safin R.R., Mukhametzyanov Sh.R., Safiullina A.Kh. [Study of high-temperature hydrolysis of pine sawdust with sulfuric acid in order to increase the yield of reducing substances] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]*. – 2020. – № 3. – pp. 71-80. (In Russ.)
20. Ilalova G., Safin R., Mukhametzyanov S., Gazizullina A. Hydrolysis as a basis for processing vegetable waste into bioplastics // *Energy Systems Environmental Impacts.- ESEI 2020. - E3S Web of Conferences*. – p. 03009.
21. Safin R., Galyavetdinov N., Salimgaraeva R., Ilalova G., Saerova K. Use of filled bioplastics in construction // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering. - STCCE – 2021. - E3S Web of Conferences. – p. 4013.
22. GOST P 57713-2017 [Polymer composites. Methods for determining density and relative density from the displaced volume of liquid]. – M.: Standartinform [Standartinform]. – 2017. – P. 15.
23. GOST 24621-2015 [Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness with a durometer (Shore hardness)]. – M.: Standartinform [Standartinform]. – 2016. – P. 11.
24. GOST 11262-2017 [Plastics. Tensile test method]. – M.: Standartinform [Standartinform]. – 2018. – P. 20.
25. GOST 4647-2015 [Plastics. Charpy impact strength method]. – M.: Standartinform [Standartinform]. – 2017.

© **Galyavetdinov N.R.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: nour777@mail.ru; **Ilalova G.F.** – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: achtung.guzik@mail.ru; **Saerova K.V.** – postgraduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: senya97@inbox.ru; **Pogodina Ya.D.** – student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: pogodinayana2000@mail.ru.

Химическая технология древесины

УДК 691.11

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ

Р.В. Салимгараева, Д.Г. Ефремов

В статье рассмотрены наиболее распространенные способы химической модификации древесины. Представлены результаты анализа зарубежных источников в области исследования процесса ацетилирования древесины, проанализированы свойства модифицированных материалов. Изучен способ химической модификации древесины фурфулированием, а также его влияние на окружающую среду. Проведен анализ модификации древесины методом этерификации, позволяющим улучшать свойства древесных материалов.

Ключевые слова: модификация, древесина, ацетилирование, фурфулирование, этерификация

Введение

Древесина является древесным строительным материалов, к достоинствам которой можно отнести высокую прочность по отношению к своему весу и удобство механической обработки для создания практически любых конструкций. К сожалению, наряду со всеми достоинствами, древесине свойственны и недостатки, к которым можно отнести огне- и биоразрушение, усушку и разбухание, коробление и растрескивание, неоднородность строения и т.п. Для устранения подобных явлений современная наука выработала различные методы обработки древесины.

Одним из способов обработки выступает модификация древесины. Модификация позволяет не только сохранить уже имеющиеся свойства материала, но и изменить их в лучшую сторону. Модифицированная древесина – это цельная древесина, в которой целенаправленно изменены основные механические и физические характеристики. Модификация открывает для древесины новые возможности и области применения. Изменение характеристик древесины посредством модификации позволяет использовать сам материал и изделия из него там, где ранее это было невозможно.

Химическая модификация древесины – это обработка высушенной древесины специальными химическими составами, которые воздействуют на материал на клеточном уровне, что и приводит к изменению некоторых характеристик материала.

Химическая модификация древесины может применяться для любой породы. Часто ее используют для обработки сосны, клена, ясеня, бука. Важным условием является эффективная пропитка, иначе модификация не окажет существенного влияния на свойства древесины.

Технология химической модификации древесины заключается в ее глубокой пропитке специальными реактивами. В ходе такой пропитки активные вещества в составе дерева вступают в реакцию с реактивом в результате чего происходит изменение свойств стенок клеток в структуре древесины.

К достоинствам химически модифицированной древесины можно отнести следующие свойства:

- высокая прочность - химическая обработка древесины существенно меняет показатели прочности материала в лучшую сторону, что выгодно отличает химическую модификацию от термической, где прочность древесины, наоборот, падает;
- влагостойкость - в ходе химической модификации в составе древесины уменьшается количество компонентов, которые способны поглощать влагу; химически модифицированная древесина отлично переносит постоянное воздействие влаги, перепады влажности в помещении, большое количество атмосферных осадков и т.д.; при этом она не покрывается плесенью и не гниет;
- формостабильность - химически модифицированная древесина не разбухает от воздействия влаги, не усыхает, сохраняя в ходе эксплуатации все свои параметры;
- устойчивость к ультрафиолетовым лучам - химическая модификация защищает древесину от разрушения под воздействием солнечного света.

Помимо этого, химическая модификация не оказывает негативного влияния на обработку древесины и повышает плотность материала.

Недостатков у химически модифицированной древесины гораздо меньше, чем достоинств, но они все же есть:

- высокая стоимость и сложность обработки - если для термической модификации не требуются дополнительные компоненты, то тут необходимы специальные химические реагенты, стоимость, которых существенно влияет на конечную стоимость изделия; кроме того, сама технология химической модификации достаточно сложная, результат сильно зависит от соблюдения всех процессов;

- изменение цвета древесины - как и при термической модификации, химически модифицированная древесина изменяет свой цвет в ходе обработки, который зависит от породы дерева, времени и интенсивности обработки, а также от используемого реагента;

- вредные вещества в составе - обработка древесины при химической модификации производится не натуральными, а синтетическими составами, которые могут вызывать аллергические реакции у человека.

В данной статье рассмотрены современные исследования в области химической модификации древесины: ацелирование, фурфулирование и этерификация.

Ацелирование древесины

Наиболее распространённым способом химической модификации древесины является ацелирование. Впервые систематические исследования химических превращений древесины, целлюлозы и лигнина в ее составе при ацелировании проведены немецким учёным Fuchs W. В работах [1-3] показано, что при ацелировании еловой древесной муки уксусным ангидридом в присутствии серной кислоты при 50-80°C получают продукты глубокой модификации с выходом до 150 %. Было установлено, что при ацелировании древесины в таких мягких условиях содержание метоксильных групп в её составе не уменьшается. Это объясняется автором тем, что в процессе ацелирования древесины лигнин не подвергается деструкции.

Fuchs W. показано, что при ацелировании древесины уксусным ангидридом в присутствии серной кислоты происходит ацелирование целлюлозы и лигнина, а гемицеллюлозы удаляются в ходе реакции вследствие растворения и сульфирования. Этим же автором были выделены ацетаты целлюлозы непосредственно из ацелированной древесины путём хлорирования по Кроссу и Бивену или экстракцией смесью хлороформ – метанол (9:1). Показано, что лигнин остаётся в твердом остатке, а эфир целлюлозы наиболее полно (на 90 %) извлекается хлороформом. Показатели растворимости ацелированной древесины оказались низкими (40-55 % в хлороформе и ацетоне). Превращения гемицеллюлозы изучены не были.

Многие ученые сегодня считают, что ацелирование древесины уменьшает количество гидроксильных групп (-ОН), которые могут поглощать влагу путем водородной связи, что в значительной степени снижает равновесное содержание влаги и точку насыщения волокон. Таким образом, стабилизация размеров древесины улучшается с увеличением прироста массы за счет реакции ацелирования [4-7]. Другие ученые отдают предпочтение другому механизму: модифицируя древесину уксусным ангидридом, можно наблюдать, что стабилизация размеров тесно связана с увеличением процентного веса (WPG) или наполнением клеточной стенки. Как следствие, степень ОН-замещения довольно незначительна [8-11].

Что касается биологической устойчивости, то было предложено несколько теорий, объясняющих высокую устойчивость ацелированной древесины к грибковым атакам. Одна из теорий, получившая широкое признание, заключается в том, что проникновение ферментов предотвращается физическим блокированием микропор клеточной стенки [8, 9, 12]. В согласии с вышеизложенным Highley T.L., Clausen C.A., Croan S.C., и др. [13] показали, что мельчайший фермент гриба бурой гнили слишком велик, чтобы проникнуть в клеточную стенку древесины.

В недавнем обзоре Rowell R.M. [14] была поддержана идея о том, что в случае атаки грибов бурой гнили пониженная влажность ацелированной древесины препятствует тому, чтобы грибок инициировал распад гемицеллюлозы как источника энергии.

В своей работе Mohebbi B., Militz H. [15] предположили следующий возможный механизм: некоторые крошечные области в клеточной стенке не ацелируются из-за размера самой ацетатной группы. В результате эти области становятся доступными для свободных радикалов, генерируемых

грибами. Поэтому наиболее вероятным механизмом высокой биологической стойкости ацетиливанной древесины считалось снижение содержания воды в клеточной стенке [12].

Borrega M., Karenlampi P.P. [16] ацетилировали древесину сосны, предварительно обработанную раствором сульфата аммония. Авторами показано, что степень ацетилирования 32-36% достигается за 1-2 ч от начала реакции. Продукты ацетилирования были растворимы в некоторых органических растворителях, но в дальнейшем не исследовались.

Использование ацетата натрия в качестве катализатора ацетилирования древесины описано в работах [17, 18]. В патенте [19] описан способ многократного ацетилирования древесных отходов при 150°C с предварительной пропиткой раствором катализатора ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$) и вакуумированием. После ацетилирования следует сушка вакуумом. Такое многократное ацетилирование приводит к степени ацетилирования 20-30%. Недостатки способа – длительность процесса, большой расход уксусного ангидрида и низкая степень ацетилирования, то есть поверхностный характер модификации.

При действии паров уксусного ангидрида на суспензию древесных опилок в уксусной кислоте [20], содержащей 10% ацетата натрия, происходит также поверхностное ацетилирование до степени ацетилирования 25 % за 8-10 ч.

В обзоре [21] показано, что повышение степени ацетилирования древесины при ее модификации жидким уксусным ангидридом наблюдается лишь после предварительной активации или в присутствии эффективных катализаторов. Наиболее эффективным оказалось совместное применение катализаторов и физико-химических воздействий. Совместное применение активации ВЧ-полем и присутствие перхлората магния в качестве катализатора описано в работах [22, 23]. Эффективность действия перхлората магния в качестве мягкого катализатора ацетилирования древесины оказалось очень высокой, даже в небольших количествах.

В работе [24] показано, что при ацетилировании древесных плит (досок) в ВЧ-поле происходит локальный разогрев поверхности и процесс ацетилирования протекает до степени ацетилирования 30% за 4 ч. Нагревание при 100°C древесных опилок в ВЧ-поле [25] позволяет повысить эффективность ацетилирования и достичь степени ацетилирования древесины 25-30% за 1 ч.

В работе [26] показано, что при ацетилировании древесины в виде опилок смесью уксусный ангидрид - уксусная кислота происходит снижение ползучести полученной модифицированной древесины. При высокотемпературном ацетилировании древесины при температурах 150°C и выше происходит также поверхностное ацетилирование, что приводит к стабилизации размеров древесных волокон при их набухании во влажной среде. Поверхностное ацетилирование древесины на 20-30% происходит при обработке древесных материалов уксусным ангидридом в паровой фазе.

В работах [27-29] исследованы некоторые механические свойства ацетиливанной древесины. Установлено, что при пропитке цельной древесины уксусным ангидридом и последующем ацетилировании при 120-125°C в течение 24 ч получают плиты с приростом массы 26-32%.

Испытания механических свойств ацетиливанной древесины в виде плит показали, что физико-механические показатели ацетиливанной древесины в целом лучше, чем необработанной. Так, в 1,5-2 раза повышаются показатели предельной прочности на изгиб и растяжение.

В работах [30, 31] изучены упругость ацетиливанной древесины и ее сопротивление истиранию в условиях повышенной влажности. Установлено, что динамические упругие показатели, а также сопротивление истиранию у ацетиливанной древесины высокой влажности выше, чем у натуральной древесины той же влажности. Ацетиливанная древесина очень хорошо поддается различной механической обработке.

Исследованию гидрофобных свойств продуктов ацетилирования древесины посвящен ряд работ [28-30]. Считается, что увеличение размеров древесины поперек волокон при их ацетилировании можно объяснить предполагая, что ОН группы компонентов древесины в результате химической реакции замещаются более крупными ацетильными группами, взаимно отделяющими субмикроскопические части клеточных стенок, которые создают препятствия набуханию во влажных условиях [31].

Это подтверждается и тем [32], что показатель изменения объема древесины при набухании в воде зависит не столько от числа замещенных гидроксильных групп, сколько от общего содержания ацетильных групп, введенных в состав древесины в результате ацетилирования.

В работе [33] показано, что влагопоглощение ацетиливанной древесины в 3 раза, а максимальное влагопоглощение (за 24 ч) в 2 раза меньше, чем неацетиливанной. Ацетилирование древесины

значительно улучшает гидрофобные свойства древесины, а процесс ацетилирования успешно применяют для стабилизации форм и размеров древесины.

Для лиственных пород древесины (березы и осины) это проявляется наиболее значительно [34]. Так, ацетилированная древесина осины, содержащая 22 % ацетильных групп, имеет значения водопоглощения и разбухания по толщине 6,5-10 и 2-4% соответственно.

Анализ литературных данных показывает, что процессы ацетилирования древесины, известные к настоящему времени, длительны и сложны, включают в себя множество технологических стадий, сопровождающихся высоким расходом и потерями уксусного ангидрида. Применение органических растворителей и низкая степень ацетилирования из-за поверхностного характера ацетилирования также существенно уменьшают эффективность процессов переработки химически модифицированной древесины.

Фурфулирование древесины

Немаловажным способом модификации является фурфулирование. Фурфуриловый спирт – это жидкость, получаемая из сельскохозяйственных отходов, таких как сахарный тростник и кукурузные початки. Фурфулирование осуществляется путем пропитки древесины смесью фурфурилового спирта и катализаторов, а затем нагревания ее до полимеризации. Целью фурфулирования является повышение устойчивости к биологической деградации и стабильности размеров путем применения нетоксичного, запатентованного полимера фурфурилового спирта.

Исследования, связанные с химической модификацией древесины фурфуриловым спиртом ($C_5H_6O_2$), были инициированы известными исследователями Stamm A.J. и Goldstein I. [23, 35]. Использование циклических карбоновых ангидридов в качестве ключевых катализаторов позволило Scheider M.H. [36] в Канаде получить фурфулированную древесину с превосходными свойствами по сравнению с полученными при помощи ранее разработанных систем. Новаторская исследовательская работа была также проведена Westin M. и его коллегами [37] в Швеции, что привело к созданию новой технологии.

Полимеризация фурфурилового спирта в древесине представляет собой сложную химическую реакцию. Даже сегодня вопрос о том, является ли фурфулирование особым процессом химической модификации, остается без ответа. Некоторые ученые считают, что он включает в себя процесс химической модификации, поскольку полимер фурфурилового спирта реагирует с собой и лигнином в клеточных стенках [37-40]. Таким образом, комплексы фурфурилового спирта преимущественно осаждаются в древесных полостях и клеточных стенках (рис. 1).

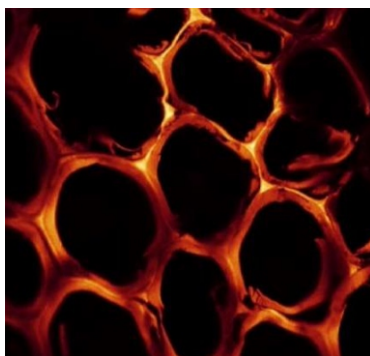


Рис. 1. Поперечное сечение радиальной древесины сосны с клеточными стенками, содержащими фурановый полимер (в красноватых областях)

Полимеризация происходит в микроскопических клеточных полостях и легко обнаруживается с помощью оптической микроскопии. Недавние наноиндентирующие исследования показали, что улучшение модуля вдавливания и твердости фурфулированных древесных клеток демонстрирует, что фурфуриловый спирт проникает в древесные клетки в процессе модификации [41]. Другое восприятие состоит в том, что фурфулирование приводит к постоянному “набуханию” клеточной стенки. Одно из возможных объяснений заключается в том, что полимер фурфурилового спирта внутри клеточной стенки занимает часть пространства, которое обычно заполняется молекулами воды при набухании во влажных условиях [42]. Различные ученые рассматривают фурфулирование древесины как процесс модификации

пропиткой, в котором свойства фурфулированного материала больше похожи на свойства заполненной полимером клеточной стенки [42, 43].

В настоящее время промышленное производство фурфулированной древесины осуществляется компанией Kebony AS (ранее Wood Polymer Technologies) в Норвегии. По данным Lande S. и др. [44], промышленный процесс фурфулирования древесины состоит из следующих этапов:

- Хранение и смешивание химических веществ: обрабатывающие растворы смешиваются в отдельном смесительном баке, куда добавляются различные химические вещества (фурфуриловый спирт, инициаторы/катализаторы, буферные агенты, поверхностно-активные вещества, вода). Смешанный раствор перекачивается в один из буферных резервуаров.

- Пропитка: древесный материал пропитывается обрабатывающим раствором с помощью полнокамерного процесса с вакуумной стадией, стадией давления и короткой поствакуумной стадией.

- Реакция и отверждение: на этом этапе происходит локальная полимеризация химических веществ и реакции присоединения с полимерными компонентами древесины. Камера отверждения нагревается прямым впрыском пара, а достигаемая температура зависит от используемого продукта.

- Сушка: окончательная сушка модифицированного древесного материала в печной сушилке необходима для минимизации выбросов и получения желаемого конечного содержания влаги.

- Очистка: выбросы в ходе технологического процесса регулируются путем очистки вентилируемых газов.

По данным литературы [40, 42, 43, 44, 45] процесс фурфулирования приводит к получению модифицированного древесного продукта, который имеет явно улучшенные свойства.

Биологическая прочность древесины повышается до «класса 1» [41]. Результаты испытаний стойкости к гниению в течение 9 лет показали, что фурфулированная древесина умеренной нагрузки (30-35% прироста по массе) обладает сопоставимой стойкостью с древесиной сосны, пропитанной арсенатом хрома меди.

Механические свойства древесины, за исключением ударопрочности, повышаются при обработке древесины фурфурил-спиртовым полимером. Фурфулированная древесина характеризуется большей твердостью, эластичностью и модулем разрыва по сравнению с необработанной древесиной [43].

Модифицированная древесина обладает высокой размерной стабильностью и устойчивостью к атмосферным воздействиям [45]. Кроме того, ее значения набухания и усадки водой более чем на 50% ниже, чем у необработанной древесины.

Недавние исследования, касающиеся экотоксикологии фурфулированной древесины и выщелачивании из фурфулированной древесины, не показали значительной экотоксичности, в то время как при ее сжигании не выделялись летучие органические соединения или полиароматические углеводороды выше нормальных уровней горения необработанной древесины [46].

Фурфулированная древесина – это «зеленый» древесный продукт, который имеет экологическую маркировку на скандинавском рынке под названием «Лебедь». Поэтому считается, что фурфулирование древесины является безопасным процессом для окружающей среды.

Этерификация древесины

В качестве методов, позволяющих добиться постоянной во времени водостойкости древесины, можно назвать этерификацию – блокировку гидроксильных валентно-химической связью и блокировку гидроксильных водородной связью. Данная технология только набирает обороты в деревообрабатывающей и химической промышленности. Этерификация древесины дает постоянную во времени водостойкость, но совершенно изменяет свойства древесины как материала.

Проведенные исследования по обработке древесины методом этерификации показали результаты реакции гидроксильных групп древесины с ангидридом, карбоновой кислотой, изоцианатом или сложноэфирной группой модификатора [41, 47]. Модификация приводит к улучшению стабильности размеров, повышению огнестойкости и атмосферостойкости, повышению гидрофобности и механической прочности [18, 48].

Исследование химических превращений в реакциях о-алкинирования и этерификации были изучены Базарновой Н.С. и соавторами [49, 50]. Ими была установлена основная закономерная реакция этерификации, сопровождающаяся выделением продуктов с такими свойствами как термопластичность, растворимость в воде или органических растворителях.

Этерификация различными кислотными хлоридами была проведена для различных материалов, таких как наполнители для полимерных композитов с целлюлозными волокнами [51], гетерогенные целлюлозно-жирнокислотные хлориды-пиридиновые системы, древесная мука и опилки, а также био-абсорбенты разливных масел, изготовленные из кокосовых рулонов. Результаты этерификации жирными кислотами (например, хлоридами гексаноила, деканоила и тетрадеканоила) твердой древесины были получены для тропической лиственной породы каучуковой древесины [52, 53]. После этерификации хлоридами жирных кислот материалы обычно демонстрируют улучшенную водоотталкивающую и термическую стабильность, а в случае с древесиной – лучшую размерную стабильность и фотостабильность. Недостатком является образование кислых побочных продуктов, таких как соляная кислота, которая иногда вызывает деградацию древесины из-за гидролиза голоцеллюлозы. Для решения этой проблемы может быть использован триэтиламин для улавливания хлористого водорода, образующегося при синтезе сложных эфиров из ацилхлоридов [53]. Таким образом, предотвращается разложение древесины, образуя гидрохлоридную соль триэтиламина.

В данном исследовании [54] образцы сосны *radiata* были модифицированы тремя хлоридами жирных кислот, названными гексаноилхлоридом (C6), додеканоилхлоридом (C12) и стеароилхлоридом (C18), в различных концентрациях. Этерификационные образцы были исследованы на смачиваемость, гигроскопические свойства и физико-химические изменения. Также были изучены термостойкость, фотостабильность и механические свойства, чтобы обеспечить всестороннюю характеристику этерифицированного материала и показать эффективность данной обработки.

Данное исследование [55] направлено на оценку влияния двухэтапной химической модификации на *Pinus radiata* с использованием диметилметилфосфоната с оксидом пропилена и малеиновым ангидридом. Образцы древесины были модифицированы в один этап с использованием пропиленоксида или малеинового ангидрида, а двухэтапная модификация включала сначала обработку давлением с помощью диметилметилфосфоната, а затем химическую модификацию с использованием пропиленоксида или малеинового ангидрида. Химическая модификация привела к лучшей термостойкости древесины по сравнению с контрольной древесиной. Среди обработок пропиленоксид показал наилучшие свойства огнестойкости с максимальной потерей веса при 367°C с остаточной массой 18,2%. Предварительное исследование показывает, что двухступенчатая модификация улучшила термические свойства, увеличив температуру для максимальной потери веса и остаточной массы, содержащей уголь.

Крафт-лигнины твердой древесины были этерифицированы янтарным ангидридом [56] и химически, термически и морфологически охарактеризованы по сравнению с их немодифицированными аналогами. Этерифицированные лигнины оказались пористыми, менее термически стабильными и несколько более гидрофильными, чем немодифицированные лигнины, поскольку этерификация ангидридом циклической кислоты сопровождается одновременным высвобождением карбоксильных групп. Панели из древесно-стружечной плиты были изготовлены методом прессования с использованием различных концентраций немодифицированного и этерифицированного крафт-лигнина в качестве единственного связующего вещества (10, 20 и 30%). Все механические свойства (ударная вязкость, модуль упругости и модуль разрыва) исследованных древесно-стружечных плит значительно повышались при добавлении этерифицированного и немодифицированного крафт-лигнинов.

В работе [57] 1-метилимидазол использовали в качестве каталитической среды для высокоэффективной этерификации отходов лигноцеллюлозной биомассы (древесины тополя, тутового дерева и пшеничной соломы) с фталевым ангидридом. После модификации древесные частицы были пластифицированы и отлиты методом литья под давлением. Анализ процентного привеса показал, что в тех же условиях древесина тополя, имеющая мягкую и рыхлую структуру, имеет наибольшую степень этерификации, тогда как древесина тутового дерева, имеющая плотную текстуру, имеет наименьшую степень этерификации. Для определения модуля упругости и коэффициента демпфирования этерифицированных продуктов использовали динамический механический анализ. Анализ морфологии материалов продемонстрировал различные композитные структуры пластиков на биологической основе, которые сыграли важную роль в их механических характеристиках.

Модификация поверхностей древесного волокна/муки [58] может улучшить их совместимость с гидрофобными пластиковыми матрицами и уменьшить водопоглощение композита. Древесные волокна этерифицируют октаноилхлоридом и пальмитоилхлоридом. Композиты C8-модифицированная древесная мука (60 мас.%) /полиэтилен показали меньшее водопоглощение после 24-часового и 216-часового погружения по сравнению с немодифицированными композитами древесная мука (60

мас.%) /полиэтилен. Этерифицированные композиты древесная мука/полиэтилен показали более низкую прочность на изгиб и модуль. Однако добавление малеинированного полипропилена к композитам древесная мука/полиэтилен улучшало механические характеристики композита.

Снижение гигроскопичности и улучшенная размерная стабильность ацетилированной древесины [59] зависят от этерификации доступных гемицеллюлоз в клеточной стенке, уменьшения водородных связей с водой и увеличения объема клеточной стенки до ее зеленого объема. Стабильность не равна 100%, так как молекула воды меньше ацетильной группы, поэтому вода может получить доступ к гидроксильным участкам, даже когда древесина полностью модифицирована. В модифицированной древесине содержание влаги в клеточных стенках слишком низкое, чтобы поддерживать грибковую атаку, поэтому первоначальной ферментативной атаки, запускающей колонизацию, не происходит. Прочностные свойства модифицированной древесины существенно не изменяются, а этерификация приводит к значительному повышению прочности и жесткости во влажном состоянии.

Заключение

В статье рассмотрены и описаны способы химической модификации древесины – ацетилирование, фурфулирование и этерификация. Эти технологии привели к появлению новых модифицированных продуктов с улучшенными физическими, механическими и биологическими свойствами. Это может постепенно изменить ошибочное представление потребителей о древесине как хрупком, неустойчивом и легко разрушающемся строительном материале.

Все эти технологии, достигающие полной или частичной степени химической модификации клеточной стенки древесины, обладают высоким потенциалом и «зеленым» характером, имеющим экологические преимущества. Для каждого из них, как раскрыто в обзоре данной статьи, во всем мире было проведено большое количество экспериментальных исследований, демонстрирующих технические преимущества и повышенную долговечность химически модифицированных лесоматериалов.

Литература

1. Fuchs W. Die Chemie des Lignins. – Berlin. – 1926. – p. 121-124.
2. Fuchs W. Hess K. Zur Kenntnis des genuinen Lignins. I. Die Acetylierung des Fichtenholzes. // Berichte. – 1921. – vol.54B. – №4. – p. 484-490.
3. Fuchs W. Zur Kenntnis des genuinen Lignins. II. Die Acetylierung des Fichtenholzes // Berichte. – 1928. – vol.63B. – №10. – p. 948-952.
4. Rowell R.M., Simonson R., Hess S., Plackett D.V., Cronshaw D., Dunningham E. (1994). Acetyl distribution in acetylated whole wood and reactivity of isolated wood cell wall components to acetic anhydride. *Wood and Fiber Science* 26 (1): 11-18.
5. Larsson-Brelid P. (2013). Benchmarking and state of the art report for modified wood. SP Report no. 54, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm, Sweden, pp. 1-31.
6. Rowell R.M., Ibach R.E., McSweeney J., Nilsson T. (2009). Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood. *Wood Material Science and Engineering* 4 (1-2): 14-22. DOI:10.1080/17480270903261339.
7. Rowell R.M. (2016). Dimensional stability and fungal durability of acetylated wood. *Drewno* 59 (197): 139-150. DOI:10.12841/wood.1644-3985.C14.04.
8. Callum A.S. Hill (2006). *Wood modification - chemical, thermal and other processes*. Wiley Series in Renewable Resources, Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 260.
9. Papadopoulos A.N., Callum A.S. Hill (2002). The biological effectiveness of wood modification with linear chain carboxylic acid anhydrides against *Coniophora puteana*. *European Journal of Wood and Wood Products* 60 (5): 329-332. DOI:10.1007/s00107-002-0327-8.
10. Jones D., Callum A.S. Hill (2007). Wood modification - a brief overview of the technology. In: *Proceedings of the “5th COST E34 International Workshop”* (Sernek M ed). Bled (Slovenia) 6-7 Sept 2007. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 1-9.
11. Papadopoulos A.N. (2010). Chemical modification of solid wood and wood raw material for composites production with linear chain carboxylic acid anhydrides: a brief review. *BioResources* 5 (1): 499-506.
12. Callum A.S. Hill (2009). Why does acetylation protect wood from microbiological attack? *Wood Material Science and Engineering* 4 (1-2): 37-45. DOI: 10.1080/17480270903249409.

13. Highley T.L., Clausen C.A., Croan S.C., Green F., Illman B.L., Micales J.A. (1994). Research on biodeterioration of wood: I. Decay mechanisms and biocontrol. Research Report FPL-RP-529, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA, pp. 22.
14. Rowell R.M. (2014). Acetylation of wood – a review. *International Journal of Lignocellulosic Products* 1 (1): 1-27.
15. Mohebbi B., Militz H. (2010). Microbial attack of acetylated wood in field soil trials. *International Biodeterioration and Biodegradation* 64: 41-50. DOI:10.1016/j.ibiod.2009.10.005.
16. Borrega M, Karenlampi PP (2008). Mechanical behaviour of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz als Roh- und Werkstoff* 66: 63-69. DOI:10.1007/s00107-007-0207-3.
17. Buro A (1954). Die Wirkung von Hitzebehandlung auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buchenholz [The influence of heat treatment on decay resistance of pine and beech wood]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 12 (8): 297-304. [in German].
18. Candelier K, Dumarçay S, Pétrissans A, Gerardin P, Pétrissans M (2014). Advantage of vacuum versus nitrogen to achieve inert atmosphere during softwood thermal modification. *ProLigno* 10 (4): 10-17.
19. Gérardin P (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood – a review. *Annals of Forest Science* 73: 559-570.
20. Giebler E (1983). Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung [Dimensional stability of wood by a moisture/heat/pressure treatment]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 41 (3): 87-94. [in German].
21. Gindl W, Zargar-Yaghubi F, Wimmer R (2003). Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresource Technology* 87: 325-330.
22. Kielmann BC, Adamopoulos S, Militz H, Mai C (2014). Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal complex dye. *International Biodeterioration and Biodegradation* 89: 110-114.
23. Goldstein I (1959). Impregnating solutions and method of impregnation therewith. US Patent 2.909.450, United States Patent and Trademark Office, Alexandria, VA, USA, pp. 4.
24. Hill C, Norton A (2014). The environmental impacts associated with wood modification balanced by the benefits of life extension. In: Proceedings of the “ECWM7 - European Wood Conference on Wood Modification” (Nunes L, Jones D, Hill C, Militz H eds). Lisboa (Portugal), 10-12 March 2014. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, pp. 83.
25. Hugues M, Hill C, Pfriem A (2015). The toughness of hygrothermally modified wood. *Holzforschung* 69 (7): 851-862.
26. Inoue M, Norimoto M, Otsuka Y, Yamada T (1990). Surface compression of coniferous wood lumber. I. A new technique to compress the surface layer. *Mokuzai Gakkaishi* 36 (11): 969-975.
27. Inoue M, Ogata S, Nishikawa M, Otsuka Y, Kawai S, Norimoto M (1993). Dimensional stability, mechanical properties and color changes of a low molecular weight melamine formaldehyde resin impregnated wood. *Mokuzai Gakkaishi* 39: 181-189.
28. International ThermoWood Association (2016). Production statistics 2016. International ThermoWood Association, Helsinki, Finland, pp. 7.
29. ISO-14040 (2006a). ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, pp. 20.
30. ISO-14040 (2006b). ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, pp. 46.
31. Jones D, Hill CAS (2007). Wood modification - a brief overview of the technology. In: Proceedings of the “5th COST E34 International Workshop” (Sernek M ed). Bled (Slovenia) 6-7 Sept 2007. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 1-9.
32. Kielmann BC, Militz H, Adamopoulos S (2012). Combined N-methylol melamine colouring agent modification of hardwoods to improve their performance under use-class 3. In: Proceeding of “ECWM6 - 6th European Conference on Wood Modification” (Jones D, Petrič M, Pačlič M eds). Ljubljana (Slovenia) 17-18 Sept 2012. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 437-446.
33. Kielmann BC, Adamopoulos S, Militz H, Mai C (2014). Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal complex dye. *International Biodeterioration and Biodegradation* 89: 110-114.

34. Mantanis G (2017). Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: a review of the present scaled-up technologies. *BioResources* 12 (3): 115-122.
35. Stamm AJ (1977). Dimensional stabilization of wood with furfuryl alcohol. In: "Wood technology: Chemical aspects" (Goldstein I ed). ACS Symposium Series, Vol. 43. American Chemical Society, Washington, DC, USA, pp. 141-149.
36. Scheider MH (1995). New cell wall and cell lumen wood polymer composites. *Wood Science and Technology* 29: 121-127.
37. Westin M, Nilsson T, Hadi, YS (1998). Field performance of furfuryl alcohol treated wood. In: Proceedings of the "4th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium" Bogor (Indonesia) 2-5 Nov 1998. Bogor Agricultural University, Bogor, West Indonesia, pp. 305-331.
38. Nordstierna L, Lande S, Westin M, Karlsson O, Furo I (2008). Towards novel wood-based materials: chemical bonds between lignin-like model molecules and poly (furfuryl alcohol) studied by NMR. *Holzforschung* 62 (6): 709-713.
39. Li W, Ren D, Zhang X, Wang H, Yu Y (2016). The furfurylation of wood: a nanomechanical study of modified wood cells. *BioResources* 11 (2): 3614-3625.
40. Lande S, Eikenes M, Westin M, Schneider M (2008). Furfurylation of wood: chemistry, properties and commercialization. In: "Development of Commercial Wood Preservatives" (Schultz TP, Militz H, Freeman MH, Nicholas DD eds). ACS Symposium Series 982: 337-355.
41. Gérardin P (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood - a review. *Annals of Forest Science* 73: 559-570.
42. Larsson-Brelid P (2013). Benchmarking and state-of-the-art report for modified wood. SP Report no. 54, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm, Sweden, pp. 1-31.
43. Rowell RM (2012). Handbook of wood chemistry and wood composites (2nd edn). CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp. 703.
44. Lande S, Westin M, Schneider M (2004). Properties of furfurylated wood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (5): 22-30.
45. Mantanis G, Lykidis C (2015). Evaluation of weathering of furfurylated wood decks after a 3-year outdoor exposure in Greece. *Drvna Industrija* 66 (2): 115-122.
46. Pilgård A, Treu A, Zeeland V, Gosselink JA, Westin M (2010). Toxic hazard and chemical analysis of leacheates from furfurylated wood. *Environmental Toxicology and Chemistry* 29: 1918-1924.
47. Dieste A, Krause A, Mai C, Sébe G, Grelher S, Militz H (2009). Modification of *Fagus sylvatica* L. with 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxy ethylene urea (DMDHEU). Part 2: Pore size distribution determined by differential scanning calorimetry. *Holzforschung* 63: 89-93.
48. Giebler E (1983). Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung [Dimensional stability of wood by a moisture/heat/pressure treatment]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 41 (3): 87-94. [in German].
49. Базарнова Н.Г., Катраков И.Б. и др. Изучение алкилирования и ацилирования лигноуглеводных материалов. // Труды Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. – М. – 1997. – вып.1. – с. 53-55.
50. Першина Л.А., Базарнова Н.Г., Ефанов М.В. Исследование превращений лигнина в процессе ацилирования механически активированной древесины осины. 1. Этерификация гидроксильных групп лигнина. // Химия растительного сырья. – 1999. – вып. 1 – с. 105-110.
51. Bolin CA, Smith ST (2011b). Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production* 19: 620-629.
52. Hillis WE (1975). The role of wood characteristics in high temperature drying. *Journal of the Institute of Wood Science* 7 (2): 60-67.
53. Homan WJ (2008). Acetylation of wood in lumber thickness. In: "Development of Commercial Wood Preservatives" (Schultz TP, Militz H, Freeman MH, Nicholas DD eds). ACS Symposium Series 982: 324-336.
54. Inoue M, Norimoto M, Otsuka Y, Yamada T (1990). Surface compression of coniferous wood lumber. I. A new technique to compress the surface layer. *Mokuzai Gakkaishi* 36 (11): 969-975.
55. Sanjeet Kumar Hom, Sauradipta Ganguly, Ajmal Samani, Sadhna Tripathi (2020). Improvement in fire retardancy with double-step chemical modification on *Pinus radiata* D. Don using dimethyl methylphosphonate with propylene oxide and maleic anhydride. *International Wood Products Journal*, 11 (3), p. 138-145.

56. D. Schorr, G. Komba Yoya, D. Rodrigue, P. Niokhor Diouf, T. Stevanovic (2015). Wood particleboards produced with unmodified and esterified Kraft lignins. *International Wood Products Journal*, 6 (3), p. 112-122.

57. Ying Guo, Jian-Qiang Chen, Meng Su, Jian-Guo Hong (2018). Bio-based Plastics with Highly Efficient Esterification of Lignocellulosic Biomass in 1-methylimidazole under Mild Conditions. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 38 (4), p. 338-349.

58. Yongcheng Zhang, Yibin Xue, Hossein Toghiani, Jilei Zhang, Charles U. Pittman (2009). Modification of Wood Flour Surfaces by Esterification with Acid Chlorides: Use in HDPE/Wood Flour Composites. *Composite Interfaces*, 16 (7-9), p. 671-686.

59. Roger M. Rowell, Rebecca E. Ibach, James McSweeney, Thomas Nilsson (2009). Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood. pp. 14-22.

© Салимгараева Р.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: reginka.danilova@mail.ru; Ефремов Д.Г. – аспирант кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: senya97@inbox.ru.

UDC 691.11

REVIEW OF RESEARCH IN THE FIELD OF CHEMICAL MODIFICATION OF WOOD

R.V. Salimgaraeva, D.G. Efremov

The article discusses the most common methods of chemical modification of wood. The results of the analysis of foreign sources in the field of studying the process of wood acetylation are presented, the properties of modified materials are analyzed. The method of chemical modification of wood by furfilling, as well as its impact on the environment, has been studied. An analysis of wood modification by the esterification method was carried out, which makes it possible to improve the properties of wood materials.

Keywords: modification, wood, acetylation, furfillation, esterification

References

1. Fuchs W. Die Chemie des Lignins. – Berlin. – 1926. – p. 121-124.
2. Fuchs W. Hess K. Zur Kenntnis des genuinen Lignins. I. Die Acetylierung des Fichtenholzes. // *Berichte*. – 1921. – vol.54B. – №4. – p. 484-490.
3. Fuchs W. Zur Kenntnis des genuinen Lignins. II. Die Acetylierung des Fichtenholzes // *Berichte*. – 1928. – vol.63B. – №10. – p. 948-952.
4. Rowell R.M., Simonson R., Hess S., Plackett D.V., Cronshaw D., Dunningham E. (1994). Acetyl distribution in acetylated whole wood and reactivity of isolated wood cell wall components to acetic anhydride. *Wood and Fiber Science* 26 (1): 11-18.
5. Larsson-Brelid P. (2013). Benchmarking and state of the art report for modified wood. SP Report no. 54, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm, Sweden, pp. 1-31.
6. Rowell R.M., Ibach R.E., McSweeney J., Nilsson T. (2009). Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood. *Wood Material Science and Engineering* 4 (1-2): 14-22. DOI:10.1080/17480270903261339.
7. Rowell R.M. (2016). Dimensional stability and fungal durability of acetylated wood. *Drewno* 59 (197): 139-150. DOI:10.12841/wood.1644-3985.C14.04.
8. Callum A.S. Hill (2006). *Wood modification - chemical, thermal and other processes*. Wiley Series in Renewable Resources, Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 260.
9. Papadopoulos A.N., Callum A.S. Hill (2002). The biological effectiveness of wood modification with linear chain carboxylic acid anhydrides against *Coniophora puteana*. *European Journal of Wood and Wood Products* 60 (5): 329-332. DOI:10.1007/s00107-002-0327-8.
10. Jones D., Callum A.S. Hill (2007). Wood modification - a brief overview of the technology. In: *Proceedings of the "5th COST E34 International Workshop"* (Sernek M ed). Bled (Slovenia) 6-7 Sept 2007. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 1-9.

11. Papadopoulos A.N. (2010). Chemical modification of solid wood and wood raw material for composites production with linear chain carboxylic acid anhydrides: a brief review. *BioResources* 5 (1): 499-506.
12. Callum A.S. Hill (2009). Why does acetylation protect wood from microbiological attack? *Wood Material Science and Engineering* 4 (1-2): 37-45. DOI: 10.1080/17480270903249409.
13. Highley T.L., Clausen C.A., Croan S.C., Green F., Illman B.L., Micales J.A. (1994). Research on biodeterioration of wood: I. Decay mechanisms and biocontrol. Research Report FPL-RP-529, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA, pp. 22.
14. Rowell R.M. (2014). Acetylation of wood – a review. *International Journal of Lignocellulosic Products* 1 (1): 1-27.
15. Mohebby B., Militz H. (2010). Microbial attack of acetylated wood in field soil trials. *International Biodeterioration and Biodegradation* 64: 41-50. DOI:10.1016/j.ibiod.2009.10.005.
16. Borrega M, Karenlampi PP (2008). Mechanical behaviour of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz als Roh- und Werkstoff* 66: 63-69. DOI:10.1007/s00107-007-0207-3.
17. Buro A (1954). Die Wirkung von Hitzebehandlung auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buchenholz [The influence of heat treatment on decay resistance of pine and beech wood]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 12 (8): 297-304. [in German].
18. Candelier K, Dumarçay S, Pétrissans A, Gerardin P, Pétrissans M (2014). Advantage of vacuum versus nitrogen to achieve inert atmosphere during softwood thermal modification. *ProLigno* 10 (4): 10-17.
19. Gérardin P (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood – a review. *Annals of Forest Science* 73: 559-570.
20. Giebler E (1983). Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung [Dimensional stability of wood by a moisture/heat/pressure treatment]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 41 (3): 87-94. [in German].
21. Gindl W, Zargar-Yaghubi F, Wimmer R (2003). Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresource Technology* 87: 325-330.
22. Kielmann BC, Adamopoulos S, Militz H, Mai C (2014). Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal complex dye. *International Biodeterioration and Biodegradation* 89: 110-114.
23. Goldstein I (1959). Impregnating solutions and method of impregnation therewith. US Patent 2.909.450, United States Patent and Trademark Office, Alexandria, VA, USA, pp. 4.
24. Hill C, Norton A (2014). The environmental impacts associated with wood modification balanced by the benefits of life extension. In: Proceedings of the “ECWM7 - European Wood Conference on Wood Modification” (Nunes L, Jones D, Hill C, Militz H eds). Lisboa (Portugal), 10-12 March 2014. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, pp. 83.
25. Huges M, Hill C, Pfriem A (2015). The toughness of hygrothermally modified wood. *Holzforschung* 69 (7): 851-862.
26. Inoue M, Norimoto M, Otsuka Y, Yamada T (1990). Surface compression of coniferous wood lumber. I. A new technique to compress the surface layer. *Mokuzai Gakkaishi* 36 (11): 969-975.
27. Inoue M, Ogata S, Nishikawa M, Otsuka Y, Kawai S, Norimoto M (1993). Dimensional stability, mechanical properties and color changes of a low molecular weight melamine formaldehyde resin impregnated wood. *Mokuzai Gakkaishi* 39: 181-189.
28. International ThermoWood Association (2016). Production statistics 2016. International ThermoWood Association, Helsinki, Finland, pp. 7.
29. ISO-14040 (2006a). ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, pp. 20.
30. ISO-14040 (2006b). ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, pp. 46.
31. Jones D, Hill CAS (2007). Wood modification - a brief overview of the technology. In: Proceedings of the “5th COST E34 International Workshop” (Sernek M ed). Bled (Slovenia) 6-7 Sept 2007. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 1-9.
32. Kielmann BC, Militz H, Adamopoulos S (2012). Combined N-methylol melamine colouring agent modification of hardwoods to improve their performance under use-class 3. In: Proceeding of “ECWM6 - 6th

European Conference on Wood Modification” (Jones D, Petrič M, Pačič M eds). Ljubljana (Slovenia) 17-18 Sept 2012. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 437-446.

33. Kielmann BC, Adamopoulos S, Militz H, Mai C (2014). Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal complex dye. *International Biodeterioration and Biodegradation* 89: 110-114.

34. Mantanis G (2017). Chemical modification of wood by acetylation or furfurylation: a review of the present scaled-up technologies. *BioResources* 12 (3): 115-122.

35. Stamm AJ (1977). Dimensional stabilization of wood with furfuryl alcohol. In: “Wood technology: Chemical aspects” (Goldstein I ed). ACS Symposium Series, Vol. 43. American Chemical Society, Washington, DC, USA, pp. 141-149.

36. Scheider MH (1995). New cell wall and cell lumen wood polymer composites. *Wood Science and Technology* 29: 121-127.

37. Westin M, Nilsson T, Hadi, YS (1998). Field performance of furfuryl alcohol treated wood. In: *Proceedings of the “4th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium”* Bogor (Indonesia) 2-5 Nov 1998. Bogor Agricultural University, Bogor, West Indonesia, pp. 305-331.

38. Nordstierna L, Lande S, Westin M, Karlsson O, Furo I (2008). Towards novel wood-based materials: chemical bonds between lignin-like model molecules and poly (furfuryl alcohol) studied by NMR. *Holzforschung* 62 (6): 709-713.

39. Li W, Ren D, Zhang X, Wang H, Yu Y (2016). The furfurylation of wood: a nanomechanical study of modified wood cells. *BioResources* 11 (2): 3614-3625.

40. Lande S, Eikenes M, Westin M, Schneider M (2008). Furfurylation of wood: chemistry, properties and commercialization. In: “Development of Commercial Wood Preservatives” (Schultz TP, Militz H, Freeman MH, Nicholas DD eds). ACS Symposium Series 982: 337-355.

41. Gérardin P (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood - a review. *Annals of Forest Science* 73: 559-570.

42. Larsson-Brelid P (2013). Benchmarking and state-of-the-art report for modified wood. SP Report no. 54, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm, Sweden, pp. 1-31.

43. Rowell RM (2012). *Handbook of wood chemistry and wood composites* (2nd edn). CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp. 703.

44. Lande S, Westin M, Schneider M (2004). Properties of furfurylated wood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (5): 22-30.

45. Mantanis G, Lykidis C (2015). Evaluation of weathering of furfurylated wood decks after a 3-year outdoor exposure in Greece. *Drvna Industrija* 66 (2): 115-122.

46. Pilgård A, Treu A, Zeeland V, Gosselink JA, Westin M (2010). Toxic hazard and chemical analysis of leacheates from furfurylated wood. *Environmental Toxicology Chemistry* 29: 1918-1924.

47. Dieste A, Krause A, Mai C, Sébe G, Grelier S, Militz H (2009). Modification of *Fagus sylvatica* L. with 1.3-dimethylol-4.5-dihydroxy ethylene urea (DMDHEU). Part 2: Pore size distribution determined by differential scanning calorimetry. *Holzforschung* 63: 89-93.

48. Giebler E (1983). Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung [Dimensional stability of wood by a moisture/heat/pressure treatment]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 41 (3): 87-94. [in German].

49. Базарнова Н.Г., Катраков И.Б. и др. Изучение алкилирования и ацилирования лигноуглеводных материалов. // Труды Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. – М. – 1997. – вып.1. – с. 53-55.

50. Першина Л.А., Базарнова Н.Г., Ефанов М.В. Исследование превращений лигнина в процессе ацилирования механически активированной древесины осины. 1. Этерификация гидроксильных групп лигнина. // Химия растительного сырья. – 1999. – вып. 1 – с. 105-110.

51. Bolin CA, Smith ST (2011b). Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production* 19: 620-629.

52. Hillis WE (1975). The role of wood characteristics in high temperature drying. *Journal of the Institute of Wood Science* 7 (2): 60-67.

53. Homan WJ (2008). Acetylation of wood in lumber thickness. In: “Development of Commercial Wood Preservatives” (Schultz TP, Militz H, Freeman MH, Nicholas DD eds). ACS Symposium Series 982: 324-336.

54. Inoue M, Norimoto M, Otsuka Y, Yamada T (1990). Surface compression of coniferous wood lumber. I. A new technique to compress the surface layer. *Mokuzai Gakkaishi* 36 (11): 969-975.
55. Sanjeet Kumar Hom, Sauradip Ganguly, Ajmal Samani, Sadhna Tripathi (2020). Improvement in fire retardancy with double-step chemical modification on *Pinus radiata* D. Don using dimethyl methylphosphonate with propylene oxide and maleic anhydride. *International Wood Products Journal*, 11 (3), p. 138-145.
56. D. Schorr, G. Komba Yoya, D. Rodrigue, P. Niokhor Diouf, T. Stevanovic (2015). Wood particleboards produced with unmodified and esterified Kraft lignins. *International Wood Products Journal*, 6 (3), p. 112-122.
57. Ying Guo, Jian-Qiang Chen, Meng Su, Jian-Guo Hong (2018). Bio-based Plastics with Highly Efficient Esterification of Lignocellulosic Biomass in 1-methylimidazole under Mild Conditions. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 38 (4), p. 338-349.
58. Yongcheng Zhang, Yibin Xue, Hossein Toghiani, Jilei Zhang, Charles U. Pittman (2009). Modification of Wood Flour Surfaces by Esterification with Acid Chlorides: Use in HDPE/Wood Flour Composites. *Composite Interfaces*, 16 (7-9), p. 671-686.
59. Roger M. Rowell, Rebecca E. Ibach, James McSweeney, Thomas Nilsson (2009). Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood. pp. 14-22.

© **Salimgaraeva R.V.** – PhD of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and design of wood products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: reginka.danilova@mail.ru; **Efremov D.G.** – postgraduate of the Department of Architecture and design of wood products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: senya97@inbox.ru.

УДК 678

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ

Д.Д. Чирков, А.Е. Шкуро, В.В. Глухих

Целью настоящего исследования являлась оценка влияния содержания лигнина и целлюлозы в наполнителях растительного происхождения на физико-механические свойства полимерных композиционных материалов с поливинилхлоридной полимерной матрицей. В качестве наполнителей в работе были использованы древесная мука марки 300, мука из шелухи овса марки 180, костра конопли технической, шлифовальная пыль березовой фанеры, шлифовальная пыль ДСтП, полученных из хвойных пород древесины и опилки бука. Для всех использованных в работе наполнителей были определены содержания в них лигнина и целлюлозы. Для пластификации поливинилхлорида использовался дибутиловый эфир ортофталевой кислоты (дибутилфталат). Смешение компонентов ПКМ осуществлялось методом вальцевания. Для полученных композитов были определены следующие физико-механические свойства: плотность, прочность при изгибе, твёрдость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, число упругости, пластичность, ударная вязкость, водопоглощение за 24 часа и 30 суток. Были определены физико-механические свойства и установлены экспериментально-статистические зависимости их показателей от содержания целлюлозы в составе наполнителя. Установлено, что увеличение доли целлюлозы в наполнителе приводит к росту показателей твердости по Бринеллю, модуля упругости при сжатии, а также водопоглощения за 24 часа и 30 суток. Число упругости материала возрастает с увеличением содержания целлюлозы в наполнителе, но после достижения 40 мас. % снижается. Для показателя пластичности характерна обратная тенденция. Функциональных связей между содержанием лигнина в наполнителе и показателями физико-механических свойств ПКМ не установлено.

Ключевые слова: композит, вальцевание, ПКМ, поливинилхлорид, наполнитель, лигнин, целлюлоза, физико-механические свойства

Введение

Все наполнители растительного происхождения, применяемые в производстве полимерных композиционных материалов (ПКМ), содержат целлюлозу, лигнин, гемицеллюлозы, экстрактивные и некоторые другие вещества. Соотношение этих компонентов может варьироваться в широком диапазоне. В тоже время не вызывает сомнения, что свойства как самих наполнителей, так и полимерных композиционных материалов на их основе зависят от компонентного и химического состава наполнителя.

В обзоре [1] приводятся результаты комплексного анализа влияния компонентов и их характеристик, многих других факторов на механические свойства и перспективы применения композитов с биополимерной матрицей. В качестве факторов, существенно влияющих на свойства таких композитов, указывается физико-химическое строение полимерной матрицы, наполнителей, пластификаторов и других компонентов ПКМ. Важными аспектами для получения композитов с заданными свойствами является поиск оптимальных параметров их получения: однородное распределение компонентов в полимерной матрице, оптимальное количество наполнителя, оптимальное межфазное соединение компонентов. Механические свойства ПКМ можно регулировать выбором соответствующей полимерной матрицы и специальных добавок. Межфазное взаимодействие улучшается за счет адаптации функциональных групп компонентов к прочным соединениям методами их физической и химической модификации.

Авторы обзора [2] отмечают, что лигнин считается более устойчивым полимером к гниению, чем крахмал и целлюлоза, из-за его сложной химической структуры. Скорость биodeградации лигнина в составе лигноцеллюлозных комплексов меньше, чем у свободного лигнина, получаемого в целлюлозно-бумажной промышленности. Многие физико-механические свойства композитов с полимерной матрицей лигнина, также, как и крахмала, уступают аналогичным свойствам композитов с целлюлозной матрицей.

В последнее время повысилась активность исследований методов модификации лигноцеллюлозных наполнителей (в том числе лигнина и целлюлозы) различными химическими и физическими методами [4-9].

В обзоре [4] приводится анализ результатов исследований ПКМ с полиуретановой полимерной фазой и функционализированным лигнином. Авторы отмечают, что использование некоторых продуктов химической модификации лигнина в качестве наполнителей для ПКМ приводит к значительному улучшению механических свойств материала.

В обзоре [5] анализируются результаты исследований применения наночастиц лигнина и продуктов их химической модификации в качестве наполнителя различных термопластичных полимеров. По мнению авторов, при использовании функционализированного нанолigniна в составе ПКМ с различной полимерной фазой у материала сохраняются антимикробные свойства, присущие обычному лигнину, а также повышаются эксплуатационные свойства. Авторы отмечают широкие перспективы применения нанолigniна в полимерной отрасли.

Побочным продуктом деятельности гидролизных производств является порошковый или гидролизный лигнин. Этот вид лигнина труднее всего подвергнуть утилизации, и за долгие годы работы гидролизных производств накоплены огромные объемы этого типа сырья. В работе [6] рассмотрены вопросы получения ПКМ с полимерной фазой полиэтилена низкого давления (ПЭНД) и гидролизным лигнином. Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение содержания гидролизного лигнина в составе композита приводит к падению показателей прочности при изгибе, прочности при растяжении, ударной вязкости. При этом наблюдается рост твердости и жесткости материала, а также водопоглощения за 24 часа и 30 суток выдержки.

Проведенные исследования свидетельствуют о значительном влиянии компонентного состава лигноцеллюлозного наполнителя на способность ПКМ к биоразложению. Установлено [7], что увеличении содержания лигнина в составе ПКМ приводит к снижению скорости биоразложения ПКМ с поливинилхлоридной полимерной матрицей. Снижение скорости биodeградации материалов может быть обусловлено высокими бактерицидными свойствами лигнина. Для получения композиционных материалов с высокой скоростью биоразложения рекомендуется применение наполнителей с низким содержанием лигнина.

Результаты последних исследований показывают существенное влияние содержания в наполнителях целлюлозы и лигнина на свойства ПКМ. Представляется перспективным проведение систематических исследований влияния компонентного состава лигноцеллюлозных наполнителей на свойства ПКМ с различными полимерными фазами. Целью настоящего исследования являлась оценка влияния

содержаний лигнина и целлюлозы в наполнителях растительного происхождения на физико-механические свойства полимерных композиционных материалов с поливинилхлоридной полимерной фазой.

Методы и материалы

Для получения композиционных материалов был использован суспензионный поливинилхлорид марки СИ-67 (ПВХ) и пластификатор дибутилфталат (ДБФ). В качестве наполнителей были применены древесная мука марки 300 (ООО «Юнайт», ГОСТ 16361-87), мука из шелухи овса марки 180 (ООО «Композит-Основа», ТУ 01.11.33-001-04058968-2017), костра конопли технической (ООО "Коноплекс", Пенза), пыль, образующаяся в качестве отходов при шлифовании березовой фанеры (шлифовальная пыль фанеры) и отходы шлифовальной пыли при шлифовании древесностружечных плит (шлифовальная пыль ДСтП), полученных из хвойных пород древесины (предоставлены ООО «Первая Лесопромышленная компания»), опилки бука. Для всех рассматриваемых наполнителей были определены содержания лигнина и целлюлозы согласно методикам, изложенным в учебном пособии [8]. Результаты определения содержания лигнина и целлюлозы в использованных наполнителях представлены в таблице 1.

В качестве лубриканта применяли стеарат кальция (ТУ 6-09-4233-76). Массовое соотношение между ПВХ и ДБФ во всех образцах композитов оставалось постоянным и составляло 91:9 м. ч. Рецептуры полимерных композиционных материалов с исследуемыми наполнителями представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Содержание лигнина и целлюлозы в использованных наполнителях

№	Наполнитель	Содержание компонента, мас. %	
		Целлюлоза	Лигнин
1	Древесная мука ДМ-300	44,8	25,5
2	Мука шелухи овса марки 180	28,2	20,2
3	Шлифовальная пыль фанера (береза)	41,6	18,3
4	Шлифовальная пыль ДСтП (хвойная)	38,6	23,2
5	Опилки бука	44,2	23,3
6	Костра конопли	37,2	16,9

Таблица 2 – Рецептуры образцов полученных композитов

Номер образца	Наполнитель	Содержание компонентов в образцах композитов, мас. %			
		ПВХ	Наполнитель	Лубрикант	ДБФ
1	Древесная мука ДМ-300	44,8	44,8	1,3	9
2	Мука шелухи овса марки 180	44,8	44,8	1,3	9
3	Шлифовальная пыль фанеры (береза)	44,8	44,8	1,3	9
4	Шлифовальная пыль ДСтП (хвойная)	44,8	44,8	1,3	9
5	Опил бука	44,8	44,8	1,3	9
6	Костра конопли	44,8	44,8	1,3	9

Смешение компонентов ПКМ производилось на лабораторных вальцах марки ПД-320-160/160 при температуре 150-160 °С. Стандартные образцы для испытаний физико-механических свойств были изготовлены методом горячего прессования.

Для полученных композитов были определены следующие физико-механические свойства: плотность, прочность при изгибе, твёрдость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, число упругости, пластичность, ударная вязкость, водопоглощение за 24 часа и 30 суток.

Результаты

Результаты испытаний физико-механических свойств образцов ПКМ с исследуемыми наполнителями представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний физико-механических свойств образцов ПКМ

Номер образца	Плотность, кг/м ³	Твердость, МПа	Число упругости, %	Пластичность, %	Модуль упругости при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Ударная вязкость кДж/м ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Водопоглощение за 30 суток, %
1	1354	93,8	68,2	31,8	1057	44,9	4,0	1,6	8,6
2	1292	44,0	47,8	52,2	388	13,2	3,0	5,0	19,2
3	1334	71,1	67,9	32,1	741	20,5	5,4	3,6	13,9
4	1345	82,7	66,0	34,0	900	43,8	3,4	2,4	12,7
5	1290	78,5	66,2	33,8	842	31,8	10,1	2,2	12,6
6	1332	91,2	71,6	28,4	1019	47,1	5,5	1,9	9,7

Наилучшими показателями физико-механических свойств среди полученных композитов обладают образцы, полученные с использованием в качестве наполнителей древесной муки марки 300, шлифовальной пыли ДСтП хвойных пород и костры конопли технической. Наименьшие значения физико-механических свойств демонстрируют образцы ПКМ с мукой шелухи овса, для которой характерно относительно низкое содержание целлюлозы (28,2 мас. %).

В результате математического анализа полученных экспериментальных данных не установлено функциональных связей между содержанием лигнина в наполнителе и показателями физико-механических свойств полученных композитов ((Y_i)). В тоже время содержание в наполнителе целлюлозы (x , мас. %) оказывает влияние на показатели твердости, модуля упругости при сжатии, числа упругости, пластичности и водопоглощения композитов. Очень высокий уровень достоверности влияния содержанием лигнина в наполнителе наблюдается для числа упругости и пластичности композитов. Экспериментально-статистические зависимости этих свойств ПКМ от содержания целлюлозы в используемом наполнителе представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментально-статистические модели свойств ПКМ от содержания целлюлозы в наполнителе

Свойство	Регрессионная зависимость Y_i	Статистические параметры зависимости Y_i для доверительной вероятности 0,90		
		Значение F	Коэффициент детерминации R^2	Стандартная ошибка
Твердость по Бринеллю, МПа (Y_1)	$Y_1 = 2,23x - 10,43$	0,08	0,57	13,3
Число упругости, % (Y_2)	$Y_2 = -0,14x^2 + 11,67x - 165,86$	0,02	0,92	3,0
Пластичность, % (Y_3)	$Y_3 = 0,14x^2 - 11,67x + 265,86$	0,02	0,92	3,0
Модуль упругости при сжатии, МПа (Y_4)	$Y_4 = 29,61x - 333,24$	0,09	0,56	181
Водопоглощение за 24 часа, % (Y_5)	$Y_5 = -0,16x + 9,04$	0,08	0,58	0,9
Водопоглощение за 30 суток, % (Y_6)	$Y_6 = -0,46x + 30,73$	0,08	0,57	2,7

Композит с кострой конопли наиболее близок к композиту с древесной мукой по показателю водопоглощения, по сравнению с другими композитами. . Возможно более низкое содержание целлюлозы (на 27-37 мас. %) по сравнению с остальными наполнителями в муке шелухи овса придаёт композитам с полимерной фазой ПВХ более низкие показатели механических свойств и водостойкости.

В соответствии с полученными экспериментально-статистическими моделями увеличение доли целлюлозы в наполнителе увеличивает у композитов твердость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии и уменьшает их водопоглощения за 24 часа и 30 суток. Число упругости композитов (рисунок 1) возрастает с увеличением содержания целлюлозы в наполнителе, но после достижения 40 мас. % снижается. Для показателя пластичности характерна обратная тенденция (рисунок 2).

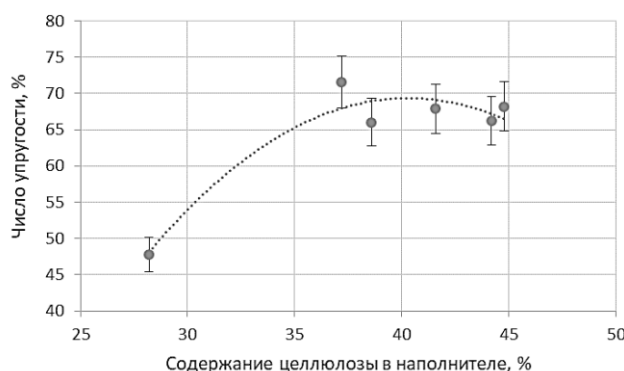


Рис. 1. Зависимость числа упругости композитов от содержания целлюлозы в наполнителе

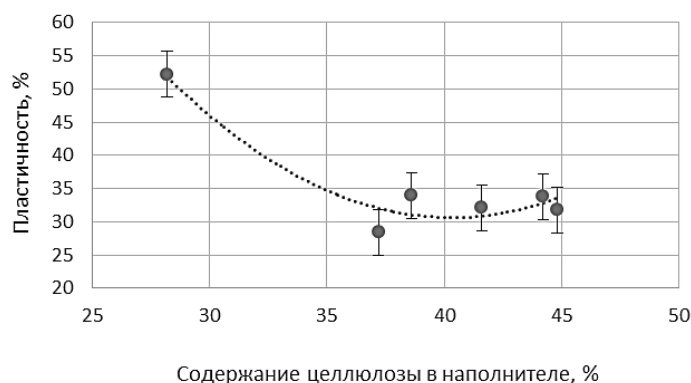


Рис. 2. Зависимость пластичности композитов от содержания целлюлозы в наполнителе

Заключение

В результате выполненных исследований были получены образцы ПКМ с полимерной фазой поливинилхлорида марки СИ-67 и образцами лигноцеллюлозных наполнителей растительного происхождения, отличающихся содержанием в них лигнина и целлюлозы. Для полученных образцов ПКМ были определены физико-механические свойства и установлены экспериментально-статистические зависимости их показателей от содержания целлюлозы в составе наполнителя. Установлено, что увеличение доли целлюлозы в наполнителе приводит к росту показателей твердости по Бринеллю, модуля упругости при сжатии, уменьшению водопоглощения за 24 часа и 30 суток. Число упругости материала возрастает с увеличением содержания целлюлозы в наполнителе, но после достижения 40 мас. % снижается. Для показателя пластичности характерна обратная тенденция. Функциональных связей между содержанием лигнина в наполнителе и показателями физико-механических свойств ПКМ установлено не было.

Полученные экспериментально-статистические модели свойств ПКМ с полимерной фазой ПВХ от содержания в составе наполнителя целлюлозы могут являться инструментом прогнозирования свойств материала при получении ПКМ, в том числе с модифицированными лигноцеллюлозными наполнителями, в частности при использовании метода частичной делигнификации наполнителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта "FEUG-2020-0013".

Литература

1. Vinod A. Review. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites / A. Vinod, M.R. Sanjay, S. Suchart, P. Jyotishkumar // Journal of Cleaner Production. – 2020, 258, 1-27. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120978.
2. Marczak D. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review / D. Marczak, K. Lejcus, J. Misiewicz // Journal of Cleaner Production. – 2020, 268.

3. Nassar M.M.A. Progress and challenges in sustainability, compatibility, and production of eco-composites: A state-of-art review / M.M.A. Nassar, K.I. Alzebeleh, T. Pervez, N. Al-Hinai, A. Munam // J Appl. Polym. Sci. – 2021; e51284.
4. Li H. Conversion of biomass lignin to high-value polyurethane: A review / H. Li, Y. Lianga, P. Li, C. He // Journal of Bioresources and Bioproducts. - 2020, 5(3), 163-179.
5. Parvathy G. Lignin based nano-composites: Synthesis and applications / Parvathy G, Sethulekshmi AS, Jitha S Jayan, Akhila Raman, Appukuttan Saritha // Process Safety and Environmental Protection. – 2021, 145, 395-410.
6. Ступак, Д.П. Получение и исследование свойств древесно-полимерных композитов с гидролизным лигнином / Д. П. Ступак, А. Е. Шкуро, А. В. Артемов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 1. – С. 72-80.
7. Захаров, П.С. Исследование влияния содержания лигнина и целлюлозы в составе наполнителя на скорость биоразложения древесно-полимерных композитов / П.С. Захаров, А.Е. Шкуро, В.В. Глухих // Кирпичниковские чтения: сборник тезисов докладов, Казань, 29 марта – 02 2021 года. – Казань: Без издательства, 2021
8. Вураско А.В. Химия растительного сырья: учеб. пособие. / А.В. Вураско, А.Р. Минакова, А.К. Жвирблите, И.А. Блинова. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2013. 90 с.

©**Чирков Д.Д.** – студент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: chirkovdd@m.usfeu.ru; **Шкуро А.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Глухих В.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru.

UDC 678

THE EFFECT OF THE FILLER CHEMICAL COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITES WITH A POLYVINYL CHLORIDE POLYMERIC MATRIX

D.D. Chirkov, A.E. Shkuro V.V. Glukhikh

The purpose of this study was to evaluate the effect of lignin and cellulose content in plant-derived fillers on the physical and mechanical properties of polymer composite materials with a polyvinyl chloride polymer matrix. Wood flour grade 300, oat husk flour grade 180, industrial hemp fire, birch plywood sanding dust, chipboard sanding dust obtained from coniferous wood, and beech sawdust were used as fillers. For all the fillers used in the work, the contents of lignin and cellulose in them were determined. For the plasticization of polyvinyl chloride, orthophthalic acid dibutyl ester (dibutyl phthalate) was used. The mixing of PCM components was carried out by rolling. For the resulting composites, the following physical and mechanical properties were determined: density, flexural strength, Brinell hardness, modulus of elasticity in compression, elasticity number, plasticity, impact strength, water absorption in 24 hours, and 30 days. Physical-mechanical properties were determined and experimental-statistical dependences of their parameters on the content of cellulose in the filler composition were established. It has been established that an increase in the proportion of cellulose in the filler leads to an increase in Brinell hardness, compressive modulus, and water absorption in 24 hours and 30 days. The elasticity number of the material increases with increasing cellulose content in the filler, but after reaching 40 wt. % decreases. The plasticity index is characterized by the opposite trend. Functional relationships between the content of lignin in the filler and indicators of the physical and mechanical properties of PCM have not been established.

Keywords: composite, rolling, PCM, polyvinyl chloride, interlining, wood flour, non-woven wallpaper waste.

References

1. Vinod A. Review. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites/A. Vinod, M.R. Sanjay, S. Suchart, P. Jyotishkumar//Journal of Cleaner Production. – 2020.258, 1-27. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120978.
2. Marczak D. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A

comprehensive review / D. Marczak, K. Lejcus, J. Misiewicz // Journal of Cleaner Production. – 2020, 268.

3. Nassar M.M.A. Progress and challenges in sustainability, compatibility, and production of eco-composites: A state-of-art review / M.M.A. Nassar, K.I. Alzebdeh, T. Pervez, N. Al-Hinai, A. Munam // J Appl. Polym. sci. – 2021; e51284.

4. Li H. Conversion of biomass lignin to high-value polyurethane: A review / H. Li, Y. Lianga, P. Li, C. He // Journal of Bioresources and Bioproducts. - 2020, 5(3), 163-179.

5. Parvathy G. Lignin based nano-composites: Synthesis and applications / Parvathy G, Sethulekshmi AS, Jitha S Jayan, Akhila Raman, Appukuttan Saritha // Process Safety and Environmental Protection. – 2021, 145, 395-410.

6. Stupak, D.P. Preparation and study of the properties of wood-polymer composites with hydrolytic lignin / D. P. Stupak, A. E. Shkuro, A. V. Artemov // Woodworking industry. - 2020. - No. 1. - S. 72-80.

7. Zakharov, P.S. Study of the influence of the content of lignin and cellulose in the composition of the filler on the rate of biodegradation of wood-polymer composites / P.S. Zakharov, A.E. Shkuro, V.V. Deaf // Kirpichnikov readings: a collection of abstracts, Kazan, March 29 - 02, 2021. – Kazan: Without publishing house, 2021

8. Vurasko A.V. Chemistry of plant raw materials: textbook. allowance. / A.V. Vurasko, A.R. Minakova, A.K. Zhvirblyte, I.A. Blinova. Yekaterinburg: Ural. state forest engineering un-t, 2013. 90 p.

©Chirkov D.D. – student of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, Ural State Forestry Engineering University (USFEU), e-mail: chirkovdd@m.usfeu.ru; Shkuro A.E. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; Glukhikh V.V. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru.

УДК 628.31

ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКЦИИ ФЕНТОНА И ОЗОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДОРАСТВОРИМОЙ ФРАКЦИИ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ БЫСТРОГО ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ

А.Н. Грачев, Г.М. Бикбулатова, В.Н. Башкиров, А.Р. Валеева, А.И. Валиуллина, О.В. Дряхлов

Существует проблема коммерциализации технологии пиролиза в связи с рядом нерешенных острых задач. При этом данная технология позволяет полностью перерабатывать отходы лигноцеллюлозного сырья в товарные продукты (бионефть и биоуголь). Одна из значимых задач является применение или удаление водорастворимой фракции бионефти, которая значительно ухудшает свойства бионефти как топлива, как фенолзамещающая фракция, в качестве красок, битумного вяжущего и т.д. Пути применения водорастворимой фракции достаточно узкие ввиду содержания до 95 % воды. Встает вопрос утилизации данного отхода. Слив в канализацию также невозможен в связи с большим содержанием органических веществ и для полной нейтрализации необходимо разбавление водой в более чем в 700 раз. На территории РФ запрещено разбавление отходов водой из центрального водоснабжения и тем самым возникает проблема очистки данного стока. Актуальным является разработка очистки данной сточной воды для утилизации ее в центральную канализацию. Большая эффективность 94% в ходе предварительных испытаний достигнута методом окисления в условиях реакции Фентона вследствие большего соответствия ее условиям относительно прочих методов кислая среда и наличие окисляющихся веществ в очищаемой сточной воде.

Ключевые слова: реакция Фентона, озонирование, сточные воды, пиролиз, водорастворимая фракция, отходы древесины.

Введение

Лигноцеллюлоза является самым распространённым компонентом биомассы, она содержится в сельскохозяйственных отходах, древесине, отходах целлюлозно-бумажной промышленности. Более того

она является возобновляемым сырьем. Использование лигноцеллюлозных материалов, особенно из сельскохозяйственного и лесного секторов, может помочь снизить чрезмерную зависимость от нефтехимических ресурсов, обеспечивая при этом устойчивую альтернативу управлению отходами. Существует огромное множество применения лигноцеллюлозной биомассы, такие как биопереработка для производства биотоплива и биохимии, биомедицинские, фармацевтические препараты, биопластики, multifunctional углеродные материалы и другие экологически чистые продукты [1, 2].

Одним из эффективных способов переработки лигноцеллюлозной биомассы является пиролиз, который позволяет вне зависимости от состава лигноцеллюлозной биомассы перерабатывать ее в жидкие продукты - бионефть, полученная в результате быстрого пиролиза набирает популярность во всем мире как замена ископаемого топлива. [3, 4]. Применение бионефти в качестве транспортного топлива помогает сократить выбросы парниковых газов и сохранить экологический баланс.

Бионефть имеет теплотворную способность почти половины дизельного топлива, т.е. 16–19 МДж/кг, но худшие свойства, такие как высокое содержание воды, высокая вязкость, низкий pH и плохая стабильность, препятствуют применению бионефти в качестве топлива. Наличие кислородосодержащих компонентов в бионефте и являются основным ухудшающим показателем для обширного использования бионефти. Процентное содержание воды в бионефте варьируется от 15 до 35% в зависимости от типа сырья и условий пиролиза [5]. Однако в связи с тем, что бионефть имеет разнообразный состав и связанную структуру выделить лишь воду не является возможным.

При каждом из методов модернизации бионефти неминуемо образуется сточная вода (древесный уксус), содержащая органические кислоты, фураны и фенолы (см. таблица 1). Выход древесного уксуса среди продуктов пиролиза составляет более 20%. Это означает, что при обработке 1000 кг сырья будет произведено более 200 кг СВ. Древесный уксус используется как сырье для выделения лесохимической уксусной кислоты, также имеются попытки его применения в качестве биостимулятора для семян или антисептик для древесины [6].

Одним из путей применения данной водорастворимой фракции, так называемой древесным уксусом является использование ее как органическая добавка в сельскохозяйственной промышленности. Применение древесного уксуса в качестве органической добавки упоминается достаточно давно [7-11]. Современные исследования по использованию древесного уксуса впервые были проведены в Японии в начале 1950-х годов. Сообщалось, что он эффективен против: розеткообразной или зеленой мозаики пшеницы, нематоды сладкого картофеля, табачной мозаики, мучнистой росы листовых овощей, листовой минирующей моли и других насекомых-вредителей. Однако из-за появления агрохимикатов и их мгновенного воздействия исследования древесного уксуса отошли на второй план.

Десять лет назад интерес к древесному уксусу возродился, поскольку эффективность и безопасность агрохимикатов были поставлены на первое место. В настоящее время он широко используется японскими фермерами, а также быстро набирает обороты на Тайване и в Корее. Однако в последние 2-3 года использование древесного уксуса для сельскохозяйственного назначения значительно увеличилось, чему свидетельствует большое количество публикаций [12-15]. По-видимому, это связано с перспективным использованием различных методов пиролиза для переработки отходов лигноцеллюлозного сырья. И встает вопрос о применении водорастворимой фракции, полученной при фракционировании бионефти.

Применение древесного уксуса и биоугля улучшает структуру почвы и облегчают поступление питательных веществ и воды, позволяя растениям расти быстрее и давать более высокие урожаи. Особенно при выращивании садовых растений, выращивании беспочвенных культур и производстве фруктов, поскольку применение древесного уксуса и биоугля способствует поглощению калия, чтобы растения имели сильную корневую систему, это помогает растениям расти более здоровыми, предотвращая болезни и повреждения, передающиеся через почву [15].

И это внедрение новых эффективных органических удобрений является весьма привлекательной и актуальной темой. А также симбиоз использования древесного уксуса вместе с биоуглем, также образующимся при пиролизе позволяет максимально приблизить к коммерциализации технологии пиролиза различного вида лигноцеллюлозного сырья [16, 17].

Древесный уксус обладает антиоксидантными, противомикробными и антитермитными свойствами и обычно используется в качестве добавки к корму для животных, средства для удаления запаха или противовоспалительного средства [18]. При применении в малых дозах древесный уксус можно использовать как некорневое или почвенное удобрение [19-21]. Низкая концентрация древесного уксуса (0,65–1,08 мл/л) может эффективно подавлять рост вредных водорослей. В высоких дозах древесный

уксус может вызывать фитотоксичность для растений [22], служащий потенциальным гербицидом. Данные свидетельствуют о том, что древесный уксус, полученный в результате пиролиза отходов обрезки, можно использовать в качестве несинтетического гербицида для борьбы с широколиственными сорняками [23].

Однако, нужно понимать, что такое большое количество древесного уксуса для применения в сельскохозяйственной промышленности невозможно и встает вопрос утилизации данного продукта как сточной воды.

В развивающихся странах одной из самых серьезных современных дилемм является управление промышленными сточными водами. В этих странах промышленные стоки сбрасываются непосредственно в естественную канализацию, канализационную систему, внутренний септик или на близлежащее поле. Некоторые из этих промышленных сточных вод очищаются недостаточно или не очищаются перед сбросом [24].

Таблица 1- Состав и свойства сточной воды, полученной при выделении фенольной фракции из жидких продуктов быстрого пиролиза древесины

<i>Химическое наименование</i>	<i>Массовая доля, %</i>	<i>CAS №</i>
Уксусная кислота	1.93 - 22	64-19-7
Пропионовая кислота	0.05 - 1.03	79-09-4
Бутановая кислота	0.14 - 0.45	107-92-6
Кроотоновая кислота	0.008 - 0.05	107-93-7
Фурфурол	0.43 - 2.52	98-01-1
Метоксифенолы (по 2-метоксифенолу)	1.63 - 5.78	90-05-1
Вода	75-94	7732-18-5

Анализ данных таблицы 1 показывает сложный химический состав сточной воды (СВ) пиролиза древесины, состоящей преимущественно из органических загрязняющих веществ, что подтверждается высоким значением общего химического потребления кислорода (ХПК) ≈ 120000 мг О/л. Кроме того, сток содержит эмульгированную углеводородную фазу и имеет низкое значение водородного показателя pH (≈ 2), что в совокупности обуславливает дополнительные сложности при очистке ввиду необходимости нейтрализации и деэмульгирования. Согласно результатам биотестирования летальная кратность разбавления рассматриваемого стока оставляет 714:1 раз, что характеризует его крайнюю токсичность. Входящий в состав стока фурфурол обладает канцерогенным и мутагенным действием, а метоксифенолы в представленном количестве вызывают раздражение органов дыхания. Таким образом, рассматриваемый отход представляет потенциальную опасность как для экосистемы в случае попадания в окружающую среду, так и для здоровья человека при непосредственном воздействии на него. На основании вышеизложенного показана высокая токсичность и сложность состава СВ пиролиза древесины, что требует всестороннего исследования рассматриваемой задачи.

Учеными Римского университета Ла Сапиенца, были проведены исследования по биологической очистке сточных вод пиролиза тополя, где оценивалось влияние концентрации органических веществ, pH и температуры [25]. В качестве микроорганизмов использовалась биомасса от очистки городских сточных вод. Результаты исследования показали эффективность снижения органических соединений от 49 до 62 %. Тем не менее ввиду необходимости поддержания постоянного нейтрального значения водородного показателя, низких концентраций загрязняющих веществ и оптимальной температуры для микроорганизмов метод биоокисления в случае нашей СВ является малоприменимым.

Имеются исследования по очистке сточных вод при пиролизе пластиковых отходов методами каталитического озонирования [26]. Исследования показали снижение уровня ХПК примерно на 32 и 38% после 1 часа обработки с использованием подходов каталитического озонирования в щелочной среде [27], что проблематично для кислого стока пиролизной жидкости. Еще один эффективный метод очистки сточных вод — это метод электрохимического окисления совместно с биологической обработкой. Данные исследования показали хорошие результаты по очистке фенольных соединений и высокую степень разложения фурфурола [28]. Более перспективным выглядит метод окисления пероксидом водорода в условиях реакции Фентона, предполагающей значение pH среды $\approx 2-3$, соответствующей нашему отходу [29].

Мембранные методы позволяют разделять смеси различного состава с помощью селективно проницаемой пористой перегородки – мембраны под воздействием движущих сил, что особенно актуально для многокомпонентных углеводородных отходов бионефти. Одним из наиболее распространённым мембранным процессом, осуществляемыми под воздействием давления, являются ультрафильтрация, предназначенная для отделения дисперсных примесей с размером частиц $\approx 2-100$ нм. Недостаток мембран заключается в их забиваемости, с чем борются большинство исследователей данной области путём модификации фильтров. Проведёнными исследованиями [30 - 32] показана эффективность разделения водомасляных эмульсий более 99%.

Исследователи [33] предположили о возможности очистки сточной воды мелкодисперсным углем, получаемым при технологии пиролиза, тем самым осуществляя дополнительную утилизацию отхода производства. Работа направлена на получение активированного угля из биоугля и применения его как сорбента при очистке сточных вод, образующихся при пиролизе древесины тополя. Доказана повышенная сорбционная способность в 2,5 раза активированного биоугля, полученного из пиролизной установки в отличии от покупного активированного угля. Недостатком метода является необходимость периодической регенерации адсорбента.

Также имеются исследования по очистке древесного уксуса с помощью микробной электролизной ячейки с анодом из различных биоуглей полученных при пиролизе. Результаты показали, что МЭК с биоуглем из скорлупы кокосового ореха оказали очевидный положительный эффект при обработке древесным уксусом, при этом удаление ХПК достигло 71,4% [34]. Однако данный метод не позволил очистить древесный уксус до необходимых параметров для слива в централизованную канализацию.

На основании проведенного анализа в качестве основных методов очистки СВ пиролиза древесины предложена совокупность методов, заключающихся в последовательном проведении стадий очистки в виде: окислении озоном и перекисью водорода.

Материалы и методы

Продукты пиролиза были получены на установке FPP-02, разработанной компанией Энерголеспром [35]. Пиролизную жидкость и биоуголь получали из измельченной древесины березы при температуре 500 ± 50 °C. Влажность древесины составляла $8 \pm 0,5\%$ (ASTM D4442-16); содержание золы составляло 0,3%, (ASTM D1102-84); размер щепы древесины составлял 0,5–5,0 мм при среднем размере 1,2 мм. В качестве модельной сточной воды использовался вакуумный дистиллят жидких продуктов быстрого пиролиза древесины. Вакуумная дистилляция осуществлялась при остаточном давлении 20 кПа и температуре 80 °C в реакторе с мешалкой [36]. Для возможности очистки сточной воды были исследованы ее состав и свойства (плотность стока $1,0-1,15$ г/см³, pH ≈ 2). Для исследования состава была проведена предварительная экстракция дистиллята диэтиловым эфиром (1:1), выдержка при комнатной температуре 15 мин. Диэтиловый эфир с экстрагированными органическими веществами был исследован методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС) с использованием прибора GCMS-QP2010 фирмы «Shimadzu» на колонке HP-1 MS. Состав органических веществ с вычетом диэтилового эфира представлен в таблице 1.

В практике промышленной и лабораторной очистки воды помимо основных технологических стадий используются вспомогательные процессы предварительной или последующей обработки стока для достижения необходимых характеристик. В качестве таковых в настоящем исследовании реализованы нейтрализация, отстаивание, фильтрование и коагуляция с флокуляцией.

Предварительно были проведены исследования по очистке стока сорбентом в виде биоугля полученного на установке FPP-02. Очистка проводилась в статическом и динамическом режимах. В первом случае сточная вода объёмом 100 мл с помощью мешалки перемешивалась с биоуглём массой 100 г в течении 3-х часов, после чего проба очищалась фильтрованием. Очистка в динамических условиях осуществлена на установке, с помощью которой сточная вода проходила через слой мелкодисперсного древесного угля, заполненного в делительную воронку объёмом 1 л. Пробы очищенной воды, отбирались с расходом 2 капли в секунду 4 порциями объёмом по 100 мл и отфильтровывались. Эффективность очистки в динамическом режиме составила 77%, в статическом 58%.

Нейтрализация СВ предназначена для повышения значения pH до нейтрального с помощью гидроксида натрия.

Отстаивание является самым простым и дешёвым способом отделения дисперсных примесей, эффективность которого снижается с увеличением агрегативной устойчивости загрязняющих веществ. Процесс осуществлялся в течение 2 ч с использованием делительной воронки объёмом 1 л.

Фильтрация в данном исследовании является альтернативой отстаиванию и выполнялась с помощью стеклянной воронки и фильтровальной бумаги марки Ф.

Коагуляция и флокуляция предназначены для удаления более мелких дисперсных частиц, не отделяемых отстаиванием и фильтрованием. Процесс проводился с предварительной нейтрализацией 20% раствором гидроокиси натрия до достижения $pH \approx 6,5$ и добавлением 50 мг/л 10% раствора оксихлорида алюминия в качестве коагулянта, перемешиванием, последующим введением 3 мг/л флокулянта 1% раствора полиакриламида марки 1150 и повторным перемешиванием. Далее образовывался осадок, который отделялся фильтрованием.

Озонирование производилось на установке-озонаторе (Озон-2к) рис. 1 расход озона 3 мг/л. Предварительно проба 50 мл отфильтровывалась через бумажный фильтр. Производительность озон-воздушной смеси 80 л/ч. Обработка озоном проводилась в течение 3 часов в мерной колбе при комнатной температуре. В начале озонирования образовывалась пена, суммарный объём которой вместе со стоком составлял 250 мл. Данное увеличение было циклическим, что обуславливается содержанием карбоксильных групп/кислот, придающих жидкости свойства поверхностно-активных веществ.



Компрессор



Озонатор



Мерная колба с образцом



Образец после озонирования



Образец отфильтрованный
через бумажный фильтр

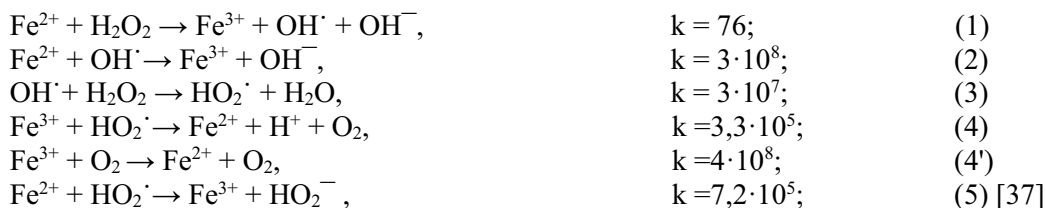


Исходный образец

Рис. 1. Озонирование сточной воды

Реакция Фентона. После предварительного отделения большей части эмульгированной фазы отстаиванием и частичной нейтрализацией до $pH \approx 2,5$ к 100 мл пробы СВ добавлялись 15 мл 30% раствора перекиси водорода и 0,1 мг сульфата железа (II) в качестве катализатора, после чего проба нейтрализовалась до $pH \approx 2,5$. Процесс окисления с последующей нейтрализацией осуществлён в 3

стадии. Далее у всех полученных образцов определяли рН и химическое потребление кислорода (ХПК). В настоящее время поведение системы Фентона описывается совокупностью последовательных стадий:



Определение ХПК

Определение ХПК проводили ускоренным методом обратного титрования. Предварительно измерялась холостая проба, которая состояла из 1 мл дистиллированной воды, 2,5 мл 0,25 н раствора бихромата калия и 7,5 мл концентрированной серной кислоты. В результате образовывался раствор светло-коричневого цвета. Далее к нему добавляли индикатор - раствор н-фенилантраниловой кислоты. После чего проводили титрование полученной смеси 0,25 н раствором соли Мора. Титрование прекращали после окрашивания раствора в светло-зеленый цвет. Средний расход раствора Мора составил для двух параллельных проб 2,35 мл.

После чего было проведено титрование исследуемых образцов, где вместо дистиллированной воды добавлялась анализируемая проба. Перед титрованием пробу сточной воды необходимо было разбавить в 100 раз дистиллированной водой в связи с высоким содержанием органических веществ. Вычисление ХПК проводили по формуле:

$$\text{ХПК} = \frac{(V_x - V) \cdot 0,25 \cdot 8 \cdot 1000}{V_{\text{п}}}$$

где V_x - объём титранта при титровании холостой пробы, V - объём титранта при титровании анализируемой пробы, 8 - кислородное число, 0,25 - нормальность раствора соли Мора, $V_{\text{п}}$ - объём пробы.

Определение рН выполнено потенциометрическим методом с использованием рН-метра марки КР-150 МИ.

Результаты и обсуждения

Результаты измерения образцов сточной воды после различных стадий очистки представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты исследования очистки сточной воды сорбентом

№	Наименование образца	ХПК, мг О/л	рН
0	Исходная сточная жидкость	120 000	2,17
1. Окисление			
1.1 Озонирование			
1.1	Фильтрация + озонирование	65 000	1,95
1.2 Окисление пероксидом водорода в условиях реакции Фентона			
1.2.1	Отстаивание	100 000	2,17
1.2.2	+ нейтрализация до рН $\approx 2,5$ + окисление пероксидом водорода (1 стадия)	60 000	1,87
1.2.3	+ нейтрализация до рН $\approx 2,5$ + окисление пероксидом водорода (2 стадия)	28 000	1,85
1.2.4	+ нейтрализация до рН $\approx 2,5$ + окисление пероксидом водорода (3 стадия)	6 000	3,22
1.2.5	+ адсорбция в статическом режиме	5 000	3,25

Данными таблицы 2 в процессе апробации озонирования ХПК очищаемого стока снизилось со 120000 до 65000 мгО/л, эффективность составила 45,8%. Как отмечено выше для озонизации более приемлемой является щелочная среда. В этой связи в качестве альтернативного реагента выбран пероксид водорода для реакции Фентона, предполагающей рН среды от 2 до 3, что актуально для кислого стока. В ходе предварительного отстаивания ХПК снизилось до 100000 мгО/л, эффективность составила 16,6%.

Дальнейшее подщелачивание до $\text{pH} \approx 2,5$, добавления перекиси водорода в качестве окислителя и сульфата железа (II) в качестве катализатора привело к снижению рассматриваемого параметра до 60000 мгО/л, а в результате последующих 2 и 3 стадии подщелачивания и окисления - до 28000 и 6000 мгО/л, соответственно. Таким образом суммарная эффективность процесса окисления в условия реакции Фентона составила 94%, что в рамках настоящего исследования является лучшим результатом.

Необходимо отметить, что дальнейшие попытки окисления на 4 и последующих стадиях не приводят к снижению содержания органических веществ. Конечное значение водородного показателя - 3,22. Дальнейшая попытка адсорбционной доочистки биоуглем в статическом режиме привела к незначительному снижению содержания загрязняющих веществ по ХПК до 5000 мгО/л, что говорит о необходимости дополнительной активации угля. Результаты очистки стока подставлены на рис. 2.



Рис.2. Результаты очистки водорастворимой фракции бионефти

Выводы

На основании результатов проведенных исследований показано, что каждый из апробированных методов способен производить очистку воды от продуктов пиролиза отходов древесины, эффективность которой будет зависеть от тщательности проработки соответствующего технологического решения.

Большая эффективность 94% в ходе предварительных испытаний достигнута методом окисления в условиях реакция Фентона вследствие большего соответствия её условиям относительно прочих методов - кислая среда и наличие окисляющихся веществ в очищаемой сточной воде.

В тоже время конечное значение ХПК = 6000 мгО/л не позволяет рекомендовать этот сток для сброса в центральную КНС на территорию РФ, где норматив по рассматриваемому параметру составляет 500 мгО/л. Таким образом, разрабатываемая технология требует окончательной доочистки, в качестве которой предполагается система обратного осмоса, либо использование биологической очистки. Также следует провести исследования по активации биоугля полученного при пиролизе древесины и использования его как сорбент для очистки СВ.

Литература

1. Okolie, J.A., Nanda, S., Dalai, A.K. et al. (2021) Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. Waste Biomass Valor 12, 2145–2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>.
2. Olatunji, Obafemi & Akinlabi, Stephen & Madushele, Nkosinathi (2020). Application of Lignocellulosic Biomass (LCB). 10.1007/978-3-030-38032-8_1.
3. Parakh D. Pranav, Nanda Sonil, Kozinski A. Janusz , Eco-friendly Transformation of Waste Biomass to Biofuels, Current Biochemical Engineering (Discontinued) 2020; 6(2). <https://dx.doi.org/10.2174/2212711906999200425235946>.
4. Nanda, S., Azargohar, R., Dalai, A.K., Kozinski, J.A.: An assessment on the sustainability of lignocellulosic biomass for biorefining. Renew. Sust. Energ. Rev. 50, 925–941 (2015);
5. Wang, Shurong & Gu, Yueling & Liu, Qian & Yao, Yan & Guo, Zuogang & Luo, Zhongyang & Cen, Kefa. (2009). Separation of bio-oil by molecular distillation. Fuel Processing Technology. 90. 738-745. 10.1016/j.fuproc.2009.02.005.
6. Ahmad M., Rajapaksha A., Lim, et al. (2013). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. Chemosphere. 99, 19-33.
7. Du, H.G., M. Ogawa, S. Ando, E. Tsuzuki and S. Murayama. 1997. Effect of mixture of charcoal with pyroligneous acid on sucrose content in netted melon (Cucumis melo L.var. reticulatus Naud) fruit. Jpn J Crop

Sci. 66(3): 369-373.

8. Sechie, H. A. Assessment of pyroligneous liquid as a potential organic fertilizer. Ecological agriculture and sustainable development. Center for Research in Rural and Industrial Development, v. 1, p. 591-595, 1998.

9. Ichikawa, T. and Y. Ota. 1982. Plant growth-regulating activity of pyroligneous acid. I- Effect of pyroligneous acid on the growth of rice seedlings. Jpn J Crop Sci. 51(1):14-17.

10. Shibayama, H. 1998. Effects of application of pyroligneous acid solution produced in Karatsu city and growth and free sugar contents of storage roots of sweet potatoes. Marine and Highland Bioscience Center Report 7:15-23.

11. Yoshimoto, T., 1994. Present status of wood vinegar studies in Japan for agricultural. usage, in Proceedings of the 7th International Congress of the Society for the Advancement of. Breeding Researches in Asia and Oceania (SABRAO): Taichung District Agricultural. Improvement Station, v. 3, p. 811 -820.

12. De Guzman, Ronel & Cababaro, Alben. (2021). Utilization of Wood Vinegar as Nutrient Availability Enhancer in Eggplant (*Solanum melongena* L.). 2. 485-492. 10.11594/ijmaber.02.06.04.

13. Theapparath, Y., Chandumpai, A., & Damrongsak Faroongsarng, D. (2018). Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. In P. Sudarshana, M. Nageswara - Rao, & J. R. Soneji (Eds.), Tropical Forests - New Edition. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77380>

14. Aguirre, J. L., Martín, M. T., González, S., & Peinado, M. (2021). Effects and Economic Sustainability of Biochar Application on Corn Production in a Mediterranean Climate. *Molecules* (Basel, Switzerland), 26(11), 3313. <https://doi.org/10.3390/molecules26113313>

15. Aguirre, Juan & Baena-González, Juan & Martín, María & Gonzalez-Egido, Sergio & Manjón, José & Peinado, Manuel. (2020). Herbicidal effects of wood vinegar on nitrophilous plant communities. *Food and Energy Security*. e253. 10.1002/fes3.253.

16. Oğuz, İlbilge & Oğuz, Halilibrahim. (2021). A research on the use of wood vinegar (pyrolysis acid) and biochar in the horticultural production. *Iksad publications 2021* In book: Recent headways in pomology (pp.129-150).

17. Pan, Xin & Zhang, Yipeng & Wang, Xiao & Liu, Guocheng. (2017). Effect of adding biochar with wood vinegar on the growth of cucumber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 61. 012149. 10.1088/1755-1315/61/1/012149

18. Benzon, Hiyasmin & Lee, Sang Chul. (2016). Potential of Wood Vinegar in Enhancing Fruit Yield and Antioxidant Capacity in Tomato. *Korean Journal of Plant Resources*. 29. 704-711. 10.7732/kjpr.2016.29.6.704.

19. Yang, Jyh-Feng, Cheng-Hong Yang, Ming-Tsai Liang, Zi-Jie Gao, Yuh-Wern Wu, and Li-Yeh Chuang. 2016. "Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Wood Vinegar from *Litchi chinensis*" *Molecules* 21, no. 9: 1150. <https://doi.org/10.3390/molecules21091150>

20. Sun, Haijun & Feng, Yanfang & Ji, Yang & Shi, Weiming & Yang, Linzhang & Xing, Baoshan. (2018). N₂O and CH₄ emissions from N-fertilized rice paddy soil can be mitigated by wood vinegar application at an appropriate rate. 185. 10.1016/j.atmosenv.2018.05.015.

21. Yugi, Ahadiyat & Hadi, sapto nugroho & Herliana, Okti. (2018). Application of wood vinegar coconut shell and NPK fertilizer to maintain sustainable agriculture of upland rice production. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 5. 1245-1250. 10.15243/jdmlm.2018.053.1245.

22. Aguirre, JL, Baena, J, Martín, MT, González, S, Manjón, JL, Peinado, M. Herbicidal effects of wood vinegar on nitrophilous plant communities. *Food Energy Secur.* 2020; 9:e253. <https://doi.org/10.1002/fes3.253>

23. Xinyou Liu, Yue Zhan, Xuehan Li, Ying Li, Xinhao Feng, Muthukumar Bagavathiannan, Chuanjie Zhang, Mingnan Qu, Jialin Yu, The use of wood vinegar as a non-synthetic herbicide for control of broadleaf weeds, *Industrial Crops and Products*, Volume 173, 2021, 114105, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114105>.

24. Ilyas, Muhammad & Ahmad, Waqas & Khan, Hizbullah & Yousaf, Saeeda & Yasir, Muhammad & Khan, Anwarzeb. (2019). Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: A review. *Reviews on Environmental Health*. 34. 10.1515/reveh-2018-0078.

25. Palma L. Di, Bavasso I., et al. (2019). Biological treatment of WW from pyrolysis plant: Effect of organics concentration, pH and temperature. *Water*. 11, 336.

26. Fazullin D. D., Mavrin G. V., Savelyeva A. V., et al. (2017). Sewage treatment from heavy metal ions by the method of deposition, using sulfur-alkaline WW as a reagent. *International Journal of Green Pharmacy*. 11, 4, S831-S835.

27. Mehrjouei M., Müller S., Möller D. (2014). Treatment of pyrolysis WW using heterogeneous advanced oxidation processes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 33, 1, 178–183.
28. Silva, José & Santos, Dara & Santos, Ubiratan & Eguiluz, Katlin & Salazar Banda, Giancarlo & Schneider, Jaderson & Krause, Laiza & López, Jorge & Hernández-Macedo, Maria. (2017). Electrochemical and/or microbiological treatment of pyrolysis wastewater. *Chemosphere*. 185. 10.1016/j.chemosphere.2017.06.133.
29. Желовицкая А.В., Дресвянников А.Ф., Чудакова О. Г. Применение перспективных окислительных процессов для очистки сточных вод, содержащих фармацевтические препараты (обзор) // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №20.
30. Fazullin D. D., Mavrin G. V., Fedotov A. V., et al. (2016). Treatment of waste water containing waste oil. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 8, 2, 14366–14374.
31. Fedotova A. V., Dryakhlov V. O., Shaikhiev I. G., et al. (2018). Effect of radiofrequency plasma treatment on the characteristics of polysulfonamide membranes and the intensity of separation of oil-in-water emulsions. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 54, 2, 174–179.
32. Benedetta de Caprariis, Paolo De Filippis, A. David Hernandez, Elisabetta Petrucci, Antonietta Petrullo, Marco Scarsella, Mattia Turchi. Pyrolysis wastewater treatment by adsorption on biochars produced by poplar biomass, *Journal of Environmental Management*, Volume 197, 2017, Pages 231-238.
33. Shen R, Zhao L, Yao Z, Feng J, Jing Y and Watson J (2020) Efficient Treatment of Wood Vinegar via Microbial Electrolysis Cell With the Anode of Different Pyrolysis Biochars. *Front. Energy Res.* 8:216. doi: 10.3389/fenrg.2020.00216.
34. Rizaifah O. Agus S., Hiroaki H., Ryuichi E., Template for Article Submission in ASEAN Journal of Chemical Engineering, *AJChE* 2009, Vol 9, No. 2, 1 – 7.
35. Валеева А.Р., Грачев А.Н., Забелкин С.А., Башкиров В.Н., Сабирзянова А.И. Определение влияния степени замещения фенола жидкими продуктами пиролиза древесины на прочность фенолоформальдегидной смолы // Деревообрабатывающая промышленность. - 2020. - № 1. - С. 88 – 95.
36. Zabelkin, S., Valeeva, A., Sabirzyanova, A., Grachev A., Bashkirov V. Influence on the water resistance coefficient of phenol-formaldehyde resin modified by wood pyrolysis liquid products // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01025-0>.
37. Желовицкая, А. В., Ермолаева, Е. А., Дресвянников, А. Ф. (2008). Окисление органических соединений с помощью гидроксид-радикала, генерируемого в растворах химическим и электрохимическим методами. Вестник Казанского технологического университета, (6), 21.

©Грачев А.Н. – д-р техн.наук, доцент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: energolesprom@gmail.com; Бикбулатова Г.М. – канд.техн.наук, доцент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: gm.bikbulatova@gmail.com; Башкиров В.Н. – д-р техн.наук, профессор, зав. кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: vlad_bashkirov@mail.ru; Валеева А.Р. – ассистент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: samirhanova@rambler.ru; Валиуллина А.И. – аспирант кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: almi.sabirzyanova@yandex.ru; Дряхлов В.О. – канд.техн.наук, доцент кафедры инженерной экологии, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: vladislaved@mail.ru.

UDK 628.31

APPLICATION OF THE FENTON REACTION AND OZONIZATION FOR PURIFICATION OF THE WATER -SOLUBLE FRACTION OF LIQUID PRODUCTS OF FAST WOOD PYROLYSIS

A.N. Grachev, G.M. Bikbulatov, V.N. Bashkirov, A.R. Valeeva, A.I. Valiullina, O.V. Dryakhlov

There is a problem of commercialization of pyrolysis technology due to a number of unresolved acute problems. At the same time, this technology completely recycles waste lignocellulose raw materials into marketable products (bio-oil and bio-char). One of the significant tasks is the water-soluble fraction of bio-oil, which significantly degrades the properties of bio-oil as a fuel, as a phenol-substituting fraction, as paints, bitumen binder, etc. Moreover, in some cases it is necessary to remove this fraction. The ways of using the water-soluble

fraction are rather narrow due to the content of up to 95% water. Draining in the sewer is also impossible due to the high content of organic substances and dilution with water by more than 700 times is necessary for complete neutralization. Dilution of waste with water from the central water supply is prohibited on the territory of the Russian Federation, and thus there is a problem of cleaning this drain. It is relevant to develop the treatment of this wastewater for its disposal in the central sewer. A high efficiency of 94% in the course of preliminary tests was achieved by the oxidation method under the conditions of the Fenton reaction due to its greater compliance with the conditions relative to other methods, the acidic environment, and the presence of oxidising substances in the treated wastewater.

Keywords: *fenton reaction, ozonation, waste water, pyrolysis, water-soluble fraction, wood waste.*

References

1. Okolie, J.A., Nanda, S., Dalai, A.K. et al. (2021) Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste Biomass Valor* 12, 2145–2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>.
2. Olatunji, Obafemi & Akinlabi, Stephen & Madushele, Nkosinathi (2020). Application of Lignocellulosic Biomass (LCB). 10.1007/978-3-030-38032-8_1.
3. Parakh D. Pranav, Nanda Sonil, Kozinski A. Janusz , Eco-friendly Transformation of Waste Biomass to Biofuels, Current Biochemical Engineering (Discontinued) 2020; 6(2). <https://dx.doi.org/10.2174/2212711906999200425235946>.
4. Nanda, S., Azargohar, R., Dalai, A.K., Kozinski, J.A.: An assessment on the sustainability of lignocellulosic biomass for biorefining. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 50, 925–941 (2015);
5. Wang, Shurong & Gu, Yueling & Liu, Qian & Yao, Yan & Guo, Zuogang & Luo, Zhongyang & Cen, Kefa. (2009). Separation of bio-oil by molecular distillation. *Fuel Processing Technology*. 90. 738-745. 10.1016/j.fuproc.2009.02.005.
6. Ahmad M., Rajapaksha A., Lim, et al. (2013). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*. 99, 19-33.
7. Du, H.G., M. Ogawa, S. Ando, E. Tsuzuki and S. Murayama. 1997. Effect of mixture of charcoal with pyroligneous acid on sucrose content in netted melon (*Cucumis melo* L.var. *reticulatus* Naud) fruit. *Jpn J Crop Sci.* 66(3): 369-373.
8. Sechie, H. A. Assessment of pyroligneous liquid as a potential organic fertilizer. *Ecological agriculture and sustainable development*. Center for Research in Rural and Industrial Development, v. 1, p. 591-595, 1998.
9. Ichikawa, T. and Y. Ota. 1982. Plant growth-regulating activity of pyroligneous acid. I- Effect of pyroligneous acid on the growth of rice seedlings. *Jpn J Crop Sci.* 51(1):14-17.
10. Shibayama, H. 1998. Effects of application of pyroligneous acid solution produced in Karatsu city and growth and free sugar contents of storage roots of sweet potatoes. *Marine and Highland Bioscience Center Report* 7:15-23.
11. Yoshimoto, T., 1994. Present status of wood vinegar studies in Japan for agricultural. usage, in *Proceedings of the 7th International Congress of the Society for the Advancement of. Breeding Researches in Asia and Oceania (SABRAO): Taichung District Agricultural. Improvement Station*, v. 3, p. 811 -820.
12. De Guzman, Ronel & Cababaro, Alben. (2021). Utilization of Wood Vinegar as Nutrient Availability Enhancer in Eggplant (*Solanum melongena* L.). 2. 485-492. 10.11594/ijmaber.02.06.04.
13. Theappar, Y., Chandumpai, A., & Damrongsak Faroongsarng, D. (2018). Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. In P. Sudarshana, M. Nageswara - Rao, & J. R. Soneji (Eds.), *Tropical Forests - New Edition*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77380>
14. Aguirre, J. L., Martín, M. T., González, S., & Peinado, M. (2021). Effects and Economic Sustainability of Biochar Application on Corn Production in a Mediterranean Climate. *Molecules* (Basel, Switzerland), 26(11), 3313. <https://doi.org/10.3390/molecules26113313>
15. Aguirre, Juan & Baena-González, Juan & Martín, María & Gonzalez-Egido, Sergio & Manjón, José & Peinado, Manuel. (2020). Herbicidal effects of wood vinegar on nitrophilous plant communities. *Food and Energy Security*. e253. 10.1002/fes3.253.
16. Oğuz, İlbilge & Oğuz, Halilibrahim. (2021). A research on the use of wood vinegar (pyrolysis acid) and biochar in the horticultural production. *Iksad publications 2021* In book: *Recent headways in pomology* (pp.129-150).
17. Pan, Xin & Zhang, Yipeng & Wang, Xiao & Liu, Guocheng. (2017). Effect of adding biochar with wood

- vinegar on the growth of cucumber. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 61. 012149. 10.1088/1755-1315/61/1/012149
18. Benzon, Hiyasmin & Lee, Sang Chul. (2016). Potential of Wood Vinegar in Enhancing Fruit Yield and Antioxidant Capacity in Tomato. Korean Journal of Plant Resources. 29. 704-711. 10.7732/kjpr.2016.29.6.704.
19. Yang, Jyh-Ferng, Cheng-Hong Yang, Ming-Tsai Liang, Zi-Jie Gao, Yuh-Wern Wu, and Li-Yeh Chuang. 2016. "Chemical Composition, Antioxidant, and Antibacterial Activity of Wood Vinegar from Litchi chinensis" Molecules 21, no. 9: 1150. <https://doi.org/10.3390/molecules21091150>
20. Sun, Haijun & Feng, Yanfang & Ji, Yang & Shi, Weiming & Yang, Linzhang & Xing, Baoshan. (2018). N₂O and CH₄ emissions from N-fertilized rice paddy soil can be mitigated by wood vinegar application at an appropriate rate. 185. 10.1016/j.atmosenv.2018.05.015.
21. Yugi, Ahadiyat & Hadi, sapto nugroho & Herliana, Okti. (2018). Application of wood vinegar coconut shell and NPK fertilizer to maintain sustainable agriculture of upland rice production. Journal of Degraded and Mining Lands Management. 5. 1245-1250. 10.15243/jdmlm.2018.053.1245.
22. Aguirre, JL, Baena, J, Martín, MT, González, S, Manjón, JL, Peinado, M. Herbicidal effects of wood vinegar on nitrophilous plant communities. Food Energy Secur. 2020; 9:e253. <https://doi.org/10.1002/fes3.253>
23. Xinyou Liu, Yue Zhan, Xuehan Li, Ying Li, Xinhao Feng, Muthukumar Bagavathiannan, Chuanjie Zhang, Mingnan Qu, Jialin Yu, The use of wood vinegar as a non-synthetic herbicide for control of broadleaf weeds, Industrial Crops and Products, Volume 173, 2021, 114105, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114105>.
24. Ilyas, Muhammad & Ahmad, Waqas & Khan, Hizbullah & Yousaf, Saeeda & Yasir, Muhammad & Khan, Anwarzeb. (2019). Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: A review. Reviews on Environmental Health. 34. 10.1515/reveh-2018-0078.
25. Palma L. Di, Bavasso I., et al. (2019). Biological treatment of WW from pyrolysis plant: Effect of organics concentration, pH and temperature. Water. 11, 336.
26. Fazullin D. D., Mavrin G. V., Savelyeva A. V., et al. (2017). Sewage treatment from heavy metal ions by the method of deposition, using sulfur-alkaline WW as a reagent. International Journal of Green Pharmacy. 11, 4, S831–S835.
27. Mehrjouei M., Müller S., Möller D. (2014). Treatment of pyrolysis WW using heterogeneous advanced oxidation processes. Environmental Progress & Sustainable Energy. 33, 1, 178–183.
28. Silva, José & Santos, Dara & Santos, Ubiratan & Eguiluz, Katlin & Salazar Banda, Giancarlo & Schneider, Jaderson & Krause, Laiza & López, Jorge & Hernández-Macedo, Maria. (2017). Electrochemical and/or microbiological treatment of pyrolysis wastewater. Chemosphere. 185. 10.1016/j.chemosphere.2017.06.133.
29. Zhelovitskaya A.V., Dresvyannikov A.F., Chudakova O.G. Primeneniye perspektivnykh oksislitel'nykh protsessov dlya ochistki stochnykh vod, soderzhashchikh farmatsevticheskiye preparaty (obzor) // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. №20.
30. Fazullin D. D., Mavrin G. V., Fedotov A. V., et al. (2016). Treatment of waste water containing waste oil. International Journal of Pharmacy and Technology. 8, 2, 14366–14374.
31. Fedotova A. V., Dryakhlov V. O., Shaikhiev I. G., et al. (2018). Effect of radiofrequency plasma treatment on the characteristics of polysulfonamide membranes and the intensity of separation of oil-in-water emulsions. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 54, 2, 174–179.
32. Benedetta de Caprariis, Paolo De Filippis, A. David Hernandez, Elisabetta Petrucci, Antonietta Petrullo, Marco Scarsella, Mattia Turchi. Pyrolysis wastewater treatment by adsorption on biochars produced by poplar biomass, Journal of Environmental Management, Volume 197, 2017, Pages 231-238.
33. Shen R, Zhao L, Yao Z, Feng J, Jing Y and Watson J (2020) Efficient Treatment of Wood Vinegar via Microbial Electrolysis Cell With the Anode of Different Pyrolysis Biochars. Front. Energy Res. 8:216. doi: 10.3389/fenrg.2020.00216.
34. Rizaifazah O. Agus S., Hiroaki H., Ryuichi E., Template for Article Submission in ASEAN Journal of Chemical Engineering, AJChE 2009, Vol 9, No. 2, 1 – 7.
35. Valeeva A.R., Grachev A.N., Zabelkin S.A., Bashkirov V.N., Sabirzyanova A.I. Opredeleniye vliyaniya stepeni zameshcheniya fenola zhidkimi produktami piroliza drevesiny na prochnost' fenoloformal'degidnoy smoly // Derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost'. - 2020. - № 1. - S. 88 – 95.
36. Zabelkin, S., Valeeva, A., Sabirzyanova, A., Grachev A., Bashkirov Neutrals influence on the water resistance coefficient of phenol-formaldehyde resin modified by wood pyrolysis liquid products // Biomass

Conversion and Biorefinery. 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01025-0>.

37. Zhelovitskaya, A. V., Yermolayeva, Ye. A., Dresvyannikov, A. F. (2008). Okisleniye organicheskikh soyedineniy s pomoshch'yu gidroksid-radikala, generiruyemogo v rastvorakh khimicheskim i elektrokhimicheskim metodami. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, (6), 21.

©Grachev A.N. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: energolesprom@gmail.com; Bikbulatova G.M. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, e-mail: gm.bikbulatova@yandex.ru; Bashkirov V.N. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, e-mail: vlad_bashkirov@mail.ru; Valeeva A.R. – Assistant of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, e-mail: samorhanova@rambler.ru; Valiullina A.I. – Assistant of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, e-mail: almi.sabirzyanova@yandex.ru; Dryakhlov V.O. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Ecology, KNRTU, e-mail: vladisloved@mail.ru.

УДК 678

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА, ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ФЛИЗЕЛИНОВЫХ ОБОЕВ И ДРЕВЕСНОЙ МУКИ

А.Е. Шкуро, Д.Д. Чирков, В.В. Глухих, Ю.М. Кулаженко, Д.В. Бандуркин

Целью настоящей работы являлось исследование физико-механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе поливинилхлорида, отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки. Для пластификации поливинилхлорида использовался дибутиловый эфир ортофталевой кислоты (дибутилфталат). Смешение компонентов ПКМ осуществлялось методом вальцевания. Для оценки влияния содержания и отходов производства флизелиновых обоев древесной муки на физико-механические свойства композиционного материала был проведен двухфакторный эксперимент по плану Бокса-Уилсона. Для полученных композитов были определены следующие физико-механические свойства: плотность, прочность при изгибе, твердость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, число упругости, пластичность, ударная вязкость, водопоглощение за 24 часа и 30 суток. Для названных свойств (за исключением плотности) были установлены их экспериментально-статистические зависимости от содержания в ПКМ древесной муки и отходов производства флизелиновых обоев. Установлено, что совместное использование отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки в качестве наполнителя позволяет повысить жесткость, твердость, ударную вязкость, прочность при изгибе и водостойкость ПКМ по сравнению с образцами, содержащими только один из типов наполнителя. Полученные результаты подтверждают возможность использования образце отходов производства флизелиновых обоев в качестве частичной замены древесной муки в качестве наполнителя при производстве полимерных композиционных материалов на основе поливинилхлорида.

Ключевые слова: композит, вальцевание, ПКМ, поливинилхлорид, флизелин, древесная мука, отходы флизелиновых обоев.

Введение

Флизелин – нетканый материал, изготавливаемый из смеси полимерных волокон природного, искусственного и синтетического происхождения [1]. В его состав могут входить хлопок, вискоза, полиэтилентерефталат (ПЭТФ), капрон (полиамид). Вискозные волокна обладают хорошей гигроскопичностью и малой электризуемостью. Их недостатками являются неустойчивость к действию микроорганизмов, солнечных лучей. Полиамидные волокна, по устойчивости к истиранию превосходят все остальные за счет свойств исходного полимера; гигроскопичность полиамидных волокон незначительна. Полиамидные волокна также обладают стойкостью к воздействию микроорганизмов. Недостатком полиамидных волокон является низкая светостойкость, как следствие их легкой окисляемости. Полиэфирные волокна вследствие низкой гигроскопичности обладают ценным свойством электроизоляционного материала. По стойкости к повышенным температурам полиэфирные волокна

превосходят все природные и большинство синтетических волокон. Полиэфирные волокна также обладают высокой стойкостью к низким температурам, значительно более высокой светостойкостью, чем большинство природных и синтетических волокон. Стойкость к истиранию у полиэфирных волокон лучше, чем у целлюлозных, но хуже, чем у полиамидных [2]. Присущие изделиям из таких волокон гигиенические и эксплуатационные свойства обуславливают их преимущества флизелина перед аналогами. Флизелин обладает высокой упругостью, жесткостью, стойкостью к химическим воздействиям и влажно-тепловой обработке, а также невысокой сминаемостью, что обуславливает его широкое применение в различных отраслях промышленности [1]

Основным направлением применения данного материала является производство флизелиновых обоев. Согласно данным Росстата в 2021 году было произведено 570 000 000 м² обоев [3]. Из них около половина – флизелиновые. По оценке экспертов, технологический норматив образования отходов при производстве флизелиновых обоев составляет 2-5 %. Таким образом, годовой объем образования отходов производства флизелиновых обоев можно оценить в 1000-3000 тонн. Флизелин является ценным сырьем для химической технологии и потому представляется перспективным поиск новых способов утилизации этого вида отходов. По аналогии с другими видами текстильных материалов [4-7] перспективным методом утилизации отходов производств флизелиновых обоев представляется их использование в качестве полной или частичной замены лигноцеллюлозных наполнителей растительного происхождения в производстве композиционных материалов с термопластичными полимерными матрицами.

Предполагается, что значительное количество специальных добавок, содержащихся в составе флизелина, может благотворно сказаться на физико-механических свойствах изучаемых композитов, улучшив межфазное взаимодействие между матрицей и наполнителем. В качестве полимерного связующего для композиционных материалов с отходами производства флизелиновых обоев был выбран поливинилхлорид (ПВХ). По сравнению с полиолефинами молекулы ПВХ значительно более полярны. Поэтому он способен к более равномерному смешению с различными типами волокон, входящих в состав флизелина.

Эта работа посвящено изучению возможности частичной замены древесной муки в составе полимерных композиционных материалов с поливинилхлоридной полимерной матрицей на отходы производства флизелиновых обоев. В задачи исследования также входило установление экспериментально-статистических зависимостей между содержанием наполнителей (отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки) и показателями физико-механических свойств полученного композиционного материала.

Методы и материалы

В качестве полимерной матрицы для получения композиционных материалов был использован суспензионный поливинилхлорид марки СИ-67. В качестве наполнителей были использованы древесная мука марки 180 (ООО «Юнайт», ГОСТ 16361-87) и отходы производства флизелиновых обоев (ОПФО), предоставленные ООО "Лоймина" (г. Нижний Новгород). Материал представляет собой смесь волокон целлюлозы (преимущественно лиственных пород) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ), скреплённых акриловыми смолами. На поверхность ОПФО нанесена печатная краска, представляющая смесь акрилового сополимера, мела, диоксида титана, слюды и функциональных добавок (кремнийорганических, полиэфирных соединений, гликолей). Отходы производства флизелиновых обоев измельчались и подвергались разволокнению с помощью лабораторной мельницы IKA A1 Basic. Для пластификации поливинилхлорида был использован дибутиловый эфир ортофталевой кислоты (дибутилфталат, ДБФ, ГОСТ -8728-77). В качестве лубриканта применяли стеарат кальция (ТУ 6-09-4233-76). Массовое соотношение между поливинилхлоридом и дифбутилфталатом для всех образцов ПКМ оставалось постоянным и составляло 91:9 м. ч.

Для оценки влияния содержания и отходов производства флизелиновых обоев (Z_1) древесной муки марки 180 (Z_2) на физико-механические свойства композиционного материала был проведен двухфакторный эксперимент по плану Бокса-Уилсона. Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 1, рецептуры полимерных композиционных материалов с отходами производства флизелиновых обоев и древесной представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

№	Кодированные значения факторов		Натуральные значения факторов	
	Z_1	Z_2	$X_1, \%$	$X_2, \%$
1	0,00	0,00	15,00	15,00
2	1,00	1,00	25,00	25,00
3	-1,00	1,00	5,00	25,00
4	-1,00	-1,00	5,00	0,00
5	0,00	1,41	15,00	29,10
6	1,41	0,00	29,10	15,00
7	0,00	0,00	15,00	15,00
8	1,00	-1,00	25,00	5,00
9	-1,41	0,00	0,90	15,00
10	0,00	-1,41	15,0	0,90

Смешение компонентов ПКМ производилось на лабораторных вальцах марки ПД-320-160/160 при температуре 150-160 °С. Стандартные образцы для испытаний физико-механических свойств были изготовлены методом горячего прессования.

Для полученных композитов с отходами производства флизелиновых обоев и древесной муки были определены следующие физико-механические свойства: плотность, прочность при изгибе, твёрдость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, число упругости, пластичность, ударная вязкость, водопоглощение за 24 часа и 30 суток.

Таблица 2 – Рецептуры ПКМ с отходами производства флизелиновых обоев и древесной мукой

Номер образца	Содержание компонента в образце композита, %				
	Поливинилхлорид СИ-67	Дибутилфталат	Отходы производства флизелиновых обоев	Древесная мука марки 180	Стеарат кальция
1	68,5	5,6	15,0	15,0	1,5
2	48,5	3,4	25,0	25,0	1,5
3	68,5	5,2	5,0	25,0	1,5
4	93,5	8,6	5,0	0,0	1,5
5	54,4	3,7	15,0	29,1	1,5
6	54,4	4,4	29,1	15,0	1,5
7	68,5	5,6	15,0	15,0	1,5
8	68,5	6,1	25,0	5,0	1,5
9	82,6	6,9	0,9	15,0	1,5
10	82,6	7,5	15,0	0,9	1,5

Результаты

Результаты испытаний физико-механических свойств образцов ПКМ с отходами производства флизелиновых обоев и древесной мукой представлены в таблице 3. Экспериментально-статистические зависимости показателей физико-механических свойств, полученных ПКМ, от содержания в них наполнителей представлены в таблице 4. Графики зависимостей твердости по Бринеллю, пластичности, ударной вязкости и водопоглощения за 30 суток приведены на рисунках 1-4.

Таблица 3 – Результаты испытаний физико-механических свойств образцов ПКМ

Номер образца	Плотность, кг/м ³	Твердость, МПа	Число упругости, %	Пластичность, %	Модуль упругости при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Ударная вязкость кДж/м ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Водопоглощение за 30 суток, %
1	1374	105,4	75,4	24,6	1220	51,8	4,7	4,1	8,5
2	1232	72,6	60,6	39,4	763	9,5	2,8	1,8	4,8
3	1294	70,0	69,8	30,2	725	16,9	4,0	5,2	6,7
4	1337	96,2	76,5	23,5	1089	76,7	8,4	1,1	2,7
5	1191	48,3	47,4	52,6	444	18,6	2,3	3,0	4,8
6	1374	91,5	6,4	93,6	1023	50,5	4,7	4,1	8,5
7	1232	92,0	71,4	28,6	1030	19,5	4,1	1,8	4,8
8	1302	61,7	56,9	43,1	615	16,5	4,1	5,2	6,7
9	1278	97,4	75,1	24,9	1106	47,9	5,0	1,1	2,7
10	1303	84,8	71,1	28,9	929	54,7	5,2	3,0	4,8

Максимальные значения показателей твердости по Бринеллю (рисунок 1) и модуля упругости при сжатии наблюдаются при содержании древесной муки в образцах порядка 16 мас. %. С ростом содержания отходов производства флизелиновых обоев в композите наблюдается снижение твердости и жесткости материала.

Таблица 4 – Экспериментально-статистические модели зависимостей свойств ПКМ от содержания в них наполнителей

Свойство	Экспериментально-статистическая модель Y_i	Статистические параметры модели Y_i		
		Значимость F	Коэффициент детерминации R^2	Стандартная ошибка
Твердость по Бринеллю, МПа (Y_1)	$Y_1=104,94-1,55 \cdot x_1+2,33 \cdot x_2-0,03 \cdot x_1^2-0,17 \cdot x_2^2+0,12 \cdot x_1 \cdot x_2$	0,05	0,89	9,1
Модуль упругости при сжатии, МПа (Y_2)	$Y_2=1207,05-20,96 \cdot x_1+31,92 \cdot x_2-0,41 \cdot x_1^2-2,32 \cdot x_2^2+1,63 \cdot x_1 \cdot x_2$	0,05	0,89	123,7
Пластичность, % (Y_3)	$Y_3=27,64-1,95 \cdot x_1+0,12 \cdot x_1^2+0,02 \cdot x_2^2$	0,06	0,69	14,5
Число упругости, % (Y_4)	$Y_4=72,36+1,95 \cdot x_1-0,12 \cdot x_1^2-0,02 \cdot x_2^2$	0,06	0,69	14,55
Ударная вязкость, кДж/м ² (Y_5)	$Y_5=9,09-0,28 \cdot x_1-0,2 \cdot x_2+0,01 \cdot x_1 \cdot x_2$	0,05	0,88	0,85
Прочность при изгибе, МПа (Y_6)	$Y_6=87,86-2,19 \cdot x_1-2,86 \cdot x_2+0,1 \cdot x_1 \cdot x_2$	0,08	0,65	16,5
Водопоглощение за 24 часа, % (Y_7)	$Y_7=-1,17+0,29 \cdot x_1+0,23 \cdot x_2-0,02 \cdot x_1 \cdot x_2$	0,04	0,72	1,0
Водопоглощение за 30 суток, % (Y_8)	$Y_8=0,72+0,31 \cdot x_1+0,2 \cdot x_2-0,01 \cdot x_1 \cdot x_2$	0,14	0,574	1,66

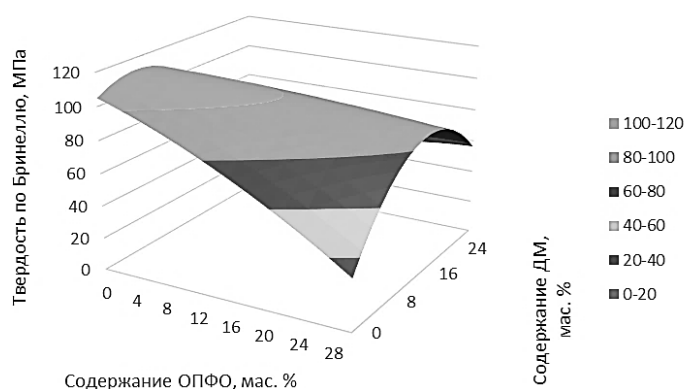


Рис. 1. График зависимости твердости по Бринеллю от содержания в образце отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки

Показатель пластичности (рисунок 2) возрастает с увеличением содержания отходов производства флизелиновых обоев в образцах ПКМ. Для упругости материала характерна обратная тенденция и с ростом содержания ОПФО. Увеличение содержания древесной муки приводит к незначительному росту показателя пластичности композиционного материала и снижению числа упругости.

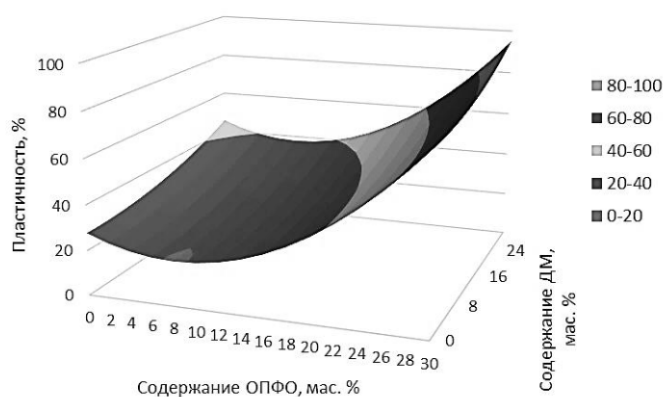


Рис. 2. График зависимости пластичности от содержания в образце отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки

Показатель ударной вязкости (рисунок 3) снижается с ростом содержания обоих типов наполнителей в составе ПКМ. Однако при совместном использовании древесной муки и отходов производства флизелиновых обоев падение ударной вязкости можно ограничить уровнем древеснонаполненного ПВХ (порядка 4 кДж/м²). Сходные тенденции характерны для показателя прочности при изгибе.

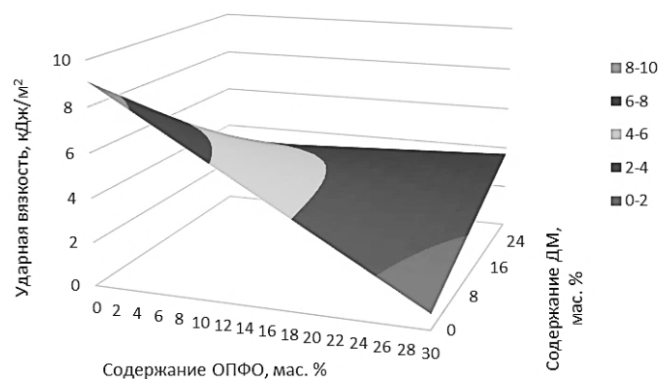


Рис. 3. График зависимости ударной вязкости от содержания в образце отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки

Оба типа использованных в работе наполнителей имеют в своем составе гидрофильные компоненты, поэтому их введение в состав относительно гидрофобной поливинилхлоридной полимерной матрицы ведет к резкому росту показателей водопоглощения за 24 часа и за 30 суток (рисунок 4). Однако при совместном использовании древесной муки и отходов производства флизелиновых обоев в качестве наполнителя для ПКМ наблюдается значительное снижение показателей водопоглощения.

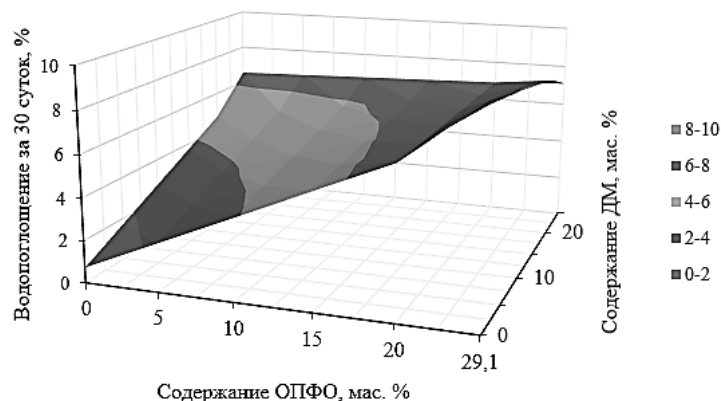


Рис. 4 График зависимости водопоглощения за 30 суток от содержания в образце отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки

Использование древесной муки и отходов производства флизелиновых обоев приводит к снижению большей части рассмотренных в работе физико-механических свойств ПКМ по сравнению с ненаполненным поливинилхлоридом. В тоже время установлено, что совместное использование рассмотренных в исследовании наполнителей в сочетании с поливинилхлоридной полимерной матрицей позволяет минимизировать падение физико-механических свойств ПКМ. Так совместное использование древесной муки и ОПФО в качестве наполнителя позволяет повысить жесткость, твердость, ударную вязкость, прочность при изгибе и водостойкость ПКМ по сравнению с образцами, содержащими только один из типов наполнителя. совместное использование древесной муки и отходов производства флизелиновых обоев в качестве наполнителя для полимерных композиционных материалов с поливинилхлоридной полимерной матрицей представляется эффективным способом утилизации ОПФО и может быть рекомендовано к опытно-промышленной апробации на базе производств профильно-погонажных изделий из древесно-полимерного композита.

Заключение

В результате проведения исследования были определены физико-механические свойства образцов ПКМ с отходами производства флизелиновых обоев и древесной мукой, установлены экспериментально-статистические зависимости показателей физико-механических свойств, полученных ПКМ от содержания в них наполнителей. Полученные результаты подтверждают возможность использования образце отходов производства флизелиновых обоев в качестве частичной замены древесной муки в качестве наполнителя при производстве полимерных композиционных материалов на основе поливинилхлорида.

Установлено, что совместное использование отходов производства флизелиновых обоев и древесной муки в качестве наполнителя позволяет повысить жесткость, твердость, ударную вязкость, прочность при изгибе и водостойкость ПКМ по сравнению с образцами, содержащими только один из типов наполнителя; является эффективным способом утилизации ОПФО и может быть рекомендовано к опытно-промышленной апробации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта "FEUG-2020-0013".

Литература

1. Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г., Музафарова Г.Ш., Саматова Э.М. Современные технологии производства нетканых материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №19.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tehnologii-proizvodstva-netkanyh-materialov> (дата обращения: 17.03.2022).

2. Кулаженко Е.Л., Коган А.Г. Использование текстильных отходов при производстве многослойных материалов // Вестник ВГТУ. 2008. №2 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tekstilnyh-othodov-pri-proizvodstve-mnogosloynnyh-materialov> (дата обращения: 17.03.2022).

3. О промышленном производстве в 2021 году // Росстат URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/12_02-02-2022.html (дата обращения: 14.02.2022);

4. Katkar, Pooja, Kadole, R.V. Nonwoven reinforced composites-a technological review // Man-Made Textiles in India. 2018. V.46. P.337-340;

5. Tausif M., Pliakas A., O'Haire T., Goswami P., Russell S.J. Mechanical Properties of Nonwoven Reinforced Thermoplastic Polyurethane Composites // Materials. 2017. V.10. P.618;

6. Tausif, M., O'Haire T. Effect of Fibre Type on Mechanical Properties of Nonwoven Reinforced TPU Composites // Proceedings of AUTEX 2016. 16th World Textile Conference AUTEX 2016, 08-10 Jun 2016, Ljubljana, Slovenia;

7. Wanassi B. Jaouadi M., Ben Hassan M., Msahli S. Effects of Manufacturing Technology on the Mechanical Properties of Alfa Fiber Non-woven Reinforced PMMA Composites // Composites Research. 2015. V.28, №3. P.112-117.

© **Чирков Д.Д.** – студент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: chirkovdd@m.usfeu.ru; **Шкуро А.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Глухих В.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Кулаженко Ю.М.** – аспирант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: kulazhenkoyuliya@mail.ru; **Бандуркин Д.В.** – директор по развитию производства ООО "АйВиси Рус", e-mail: dmitrybandurkin@gmail.com.

UDC 678

POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYVINYL CHLORIDE, WASTE FROM THE PRODUCTION OF NON-WALLPAPERS AND WOOD FLOUR

D.D. Chirkov, A.E. Shkuro V.V. Glukhikh, Yu. M. Kulazhenko, D.V. Bandurkin

This work aimed to study the physical and mechanical properties of polymer composite materials (PCM) based on polyvinyl chloride, non-woven wallpaper production waste, and wood flour. For the plasticization of polyvinyl chloride, orthophthalic acid dibutyl ester (dibutyl phthalate) was used. The mixing of PCM components was carried out by the rolling method. To assess the effect of the content and production waste of non-woven wallpaper wood flour on the physical and mechanical properties of the composite material, a two-factor experiment was carried out according to the Box-Wilson plan. For the resulting composites, the following physical and mechanical properties were determined: density, flexural strength, Brinell hardness, compressive modulus, elasticity number, plasticity, impact strength, water absorption in 24 hours and 30 days. For these properties (except for density), their experimental and statistical dependences on the content of wood flour and non-woven wallpaper production waste in PCM were established. It has been established that the joint use of waste from the production of non-woven wallpaper and wood flour as a filler makes it possible to increase the rigidity, hardness, impact strength, bending strength, and water resistance of PCM compared to samples containing only one type of filler. The results confirm the possibility of using a sample of waste from the production of non-woven wallpaper as a partial replacement for wood flour as a filler in the production of polymer composite materials based on polyvinyl chloride.

Keywords: composite, rolling, PCM, polyvinyl chloride, interlining, wood flour, non-woven wallpaper waste.

References

1. Abdullin I.Sh., Ibragimov R.G., Muzafarova G.Sh., Samatova E.M. Modern technologies for the production of nonwoven materials // Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. No. 19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tehnologii-proizvodstva-netkanyh-materialov> (date of access:

03/17/2022).

2. Kulazhenko E.L., Kogan A.G. The use of textile waste in the production of multilayer materials. Vestnik VGTU. 2008. No. 2 (15). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tekstilnyh-othodov-pri-proizvodstve-mnogosloynnyh-materialov> (date of access: 03/17/2022).

3. On industrial production in 2021 // Rosstat URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/12_02-02-2022.html (date of access: 02/14/2022);

4. Katkar, Pooja, Kadole, R.V. Nonwoven reinforced composites-a technological review // Man-Made Textiles in India. 2018. V.46. P.337 -340;

5. Tausif M., Pliakas A., O'Haire T., Goswami P., Russell S.J. Mechanical Properties of Nonwoven Reinforced Thermoplastic Polyurethane Composites // Materials. 2017.V.10. P.618;

6. Tausif, M., O'Haire T. Effect of Fiber Type on Mechanical Properties of Nonwoven Reinforced TPU Composites // Proceedings of AUTEX 2016. 16th World Textile Conference AUTEX 2016, 08-10 Jun 2016, Ljubljana, Slovenia;

7. Wanassi B. Jaouadi M., Ben Hassan M., Msahli S. Effects of Manufacturing Technology on the Mechanical Properties of Alfa Fiber Non-woven Reinforced PMMA Composites // Composites Research. 2015. V.28, no.3. P.112-117.

©Chirkov D.D. – student of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, Ural State Forestry Engineering University (USFEU), e-mail: chirkovdd@m.usfeu.ru; Shkuro A.E. – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; Glukhikh V.V. – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; Kulazhenko Y.M. – PhD student of the Department of Pulp and Paper Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: kulazhenkoyuliya@mail.ru; Bandurkin D.V. – Production Development Director of IVIsy Rus LLC, , dmitrybandurkin@gmail.com.

Уважаемые авторы журнала!!!

Все подготовленные к изданию статьи, должны соответствовать всем требованиям к оформлению.

Статьи, представляющие результаты исследований, должны включать разделы: «Введение», «Методы и материалы», «Результаты», «Заключение», «Литература».

Обзорные статьи также должны быть структурированы и состоять из разделов: «Введение», «Обзор исследований в области...», «Заключение», «Литература».

Рабочие языки журнала — русский и английский.

Одноколоночный макет журнала.

Параметры страницы:

– верх — 3 см;

– низ — 2,5 см;

– левое поле — 1,8 см;

– правое поле — 1,8 см;

Основной шрифт статьи «Times New Roman», размер шрифта — 11 кегль через 1 интервал (ключевые слова аннотации оформляются кеглем 10). Абзац — 0,75 см.

Размер рисунков:

– ширина — не более 17,5 см;

– высота — не более 12 см;

Название рисунков: шрифт «Arial» кеглем 8 полужирный, выравнивание по ширине (**Рис. 1.Название рисунка**). Цвет рисунка - черно-белый. Рисунки должны быть качественными, сканированные картинки не принимаются!

Размер таблицы не должен превышать 17,5 x 12 см.

Название таблиц: шрифт «Arial» кеглем 8 полужирный, выравнивание по ширине (**Таблица 1 - Название таблицы**)

Формулы, представленные в статье, должны по размеру помещаться в одну колонку, то есть иметь размер не более чем 8,5 x 5 см (шрифт «Times New Roman»).

Образец оформления статьи указан в конце журнала.

Уважаемые авторы и читатели журнала «Деревообрабатывающая промышленность»!

Благодарим за интерес, проявленный к нашему Журналу.

Если Вы автор и намерены опубликовать свою статью в нашем журнале, в целях ускорения процесса редактирования, публикации и распространения вашего материала Вам необходимо ознакомиться с «Требованиями для авторов». При подготовке рукописи статьи к отправке в редакцию автору (соавторам) следует руководствоваться изложенными требованиями и условиями.

При этом обращаем Ваше внимание на то, что редакция не принимает Вашу статью к рассмотрению, если:

- статья оформлена (представлена) с нарушением требований, изложенных в данных Правилах;
- автором (соавторами, правообладателями) не переданы Издательству необходимые авторские права на использование произведения (статьи);

**Авторы, направляющие статьи в журнал,
должны соблюдать следующие требования**

УДК 721.05 (Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю)

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (НАЗВАНИЕ СТАТЬИ ПРОПИСНЫМИ БУКВАМИ, ШРИФТ TIMES NEW ROMAN, КЕГЛЬ – 16, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЛЕВОМУ КРАЮ ПОЛУЖИРНЫМ ШРИФТОМ)

И. О. Фамилия авторов (инициалы и фамилия авторов Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю полужирным шрифтом. Например, И.И. Иванов)

*Аннотация является кратким изложением большей по объему работы. Она отражает научное содержание статьи, содержит сведения о решаемой задаче, методах решения, результатах и выводах. Аннотация не должна содержать рисунки, формулы, литературу и источники финансирования и ссылки на них. Рекомендуемый объем аннотации не менее 1000 букв. **Ключевые слова:** не менее 4 слов или словосочетаний, каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой. (Шрифт Times New Roman, кегль – 9, курсив, выравнивание по ширине, отступ справа и выступ слева – 1 см)*

Введение

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word. Статьи, представляющие результаты исследований, должны включать разделы: «**Введение**», «**Методы и материалы**», «**Результаты**», «**Заключение**», «**Литература**». Обзорные статьи также должны быть структурированы и состоять из разделов: «**Введение**», «**Обзор исследований в области...**», «**Заключение**», «**Литература**». Макет журнала – однокolumnный, с параметрами страницы: верх -3 см, низ -2,5 см, левое поле – 1,8 см, правое поле – 1,8 см

Десятичные цифры набираются только через запятую, а не через точку (0,25 вместо 0.25). Основной шрифт статьи «Times New Roman», размер шрифта — 11 кегль через 1 интервал, выравнивание по ширине. Абзац — 0,75 см.

Название параграфа

Формулы в статье набираются с использованием встроенного редактора формул MS Word 2007, курсивом. Использование букв кириллицы в формулах не рекомендуется. Расшифровка обозначений, принятых в формуле, производится в порядке их использования в формуле.

Все формулы желательно пронумеровать, но допустимо нумеровать лишь упоминаемые в тексте. Формулу следует располагать по центру строки, а ее номер по правому краю основного текста и заключать в круглые скобки.

Пример оформления формул

$$R = \frac{204,1187 - 9,797\tau - 1,58t + 0,1386\tau^2 + 0,0031t^2 + 0,0378\tau \cdot t}{1 - 0,056\tau - 0,0081t + 0,00067\tau^2 + 1,66 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,00025\tau \cdot t} \quad (1)$$

Название параграфа

Рисунки и таблицы необходимо приводить после упоминания их в тексте.

Таблицы нумеруются в порядке упоминания их в тексте, нумерация сквозная (шрифт - Times New Roman, кегль – 11, для объемных – 11 и 12.). Все графы таблицы должны иметь заголовки, сокращение слов в таблицах не допускается (кроме общепринятых). Отсутствие данных обозначается прочерком (–). Названия таблиц размещаются над ними, выравниванием по ширине и выделяются полужирным шрифтом (шрифт названия таблиц – Arial, кегль - 8). Подписная надпись выравнивается по ширине текста (шрифт названия таблиц – Arial, кегль -8). Точка в конце подписной надписи не ставится. Цвет рисунков – черно-белый. Рисунки должны быть качественными, **сканированные картинки не принимаются!**

При ссылках на рисунки и таблицы в тексте статьи необходимо указывать аббревиатуру «рис. 1» или «табл. 1».

Пример оформления таблиц

Таблица 1 – Название таблицы

Заголовок	Заголовок		
	Подзаголовок	Подзаголовок	Подзаголовок
Текст	Текст	Текст	Текст
Текст	Текст	Текст	Текст
Текст	Текст	Текст	Текст

Пример оформления рисунков

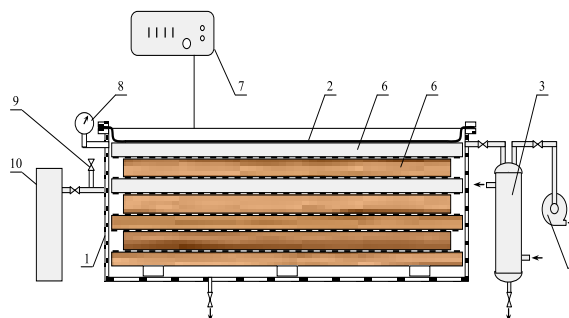


Рис. 1. Название рисунка: 1 – позиция 1; 2 – позиция 2

Заключение

Приводятся выводы по работе, рекомендации по использованию полученных результатов.

Здесь же при необходимости курсивом указывается источник финансирования исследования или благодарности.

Литература

В списке библиографических ссылок приводятся только источники, на которые автор ссылается в тексте. Список литературы составляется в порядке цитирования в работе, все указанные источники нумеруются. Ссылки на цитируемые источники в тексте статьи приводятся в виде цифр, соответствующих номеру работы в списке литературы, заключенных в квадратные скобки. Пример оформления ссылок на цитируемые источники: [1], [1, 2], [1-4]. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуется использовать не менее 15 источников.

Ссылку на источник необходимо приводить на том языке, на котором он был опубликован.

Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.05-2008.

© **Фамилия И.О. автора** – ученая степень, ученое звание, должность, наименование кафедры наименование организации, адрес электронной почты (шрифт - Times New Roman, кегль – 10, фамилия и инициалы выделяются полужирным шрифтом)

Данные на английском языке располагаются в конце статьи и следуют в том же порядке и с тем же форматированием, как в варианте на русском языке (УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы и сведения об авторах на английском языке)

UDC

PAPER TITLE

Authors Name/s per

Автор должен представить аннотацию на английском языке. В тексте аннотации на английском языке следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов. Следует избегать употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных терминов. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах резюме.

Key words: *приводится перевод ключевых слов или словосочетаний, каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой.*

References

Схема библиографического описания статьи с переводом заглавия на английский язык: - авторы (транслитерация); - [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках]; - Название русскоязычного источника (транслитерация); [Перевод названия источника на английский язык]; - Выходные данные с обозначениями на английском языке; - Указание на язык статьи (In Russ.) после описания статьи. (Шрифт - Times New Roman, кегль – 11, выравнивание по ширине)

© **Authors Name/s per dept.** - academic degree, academic title, position, name of organization, e-mail address

