ISSN 0011-9008

Дерево — обрабатывающая промышленность

2/2019

ÉCOLE SUPÉRIEURE DU BOIS

Высшая школа дерева

(г. Нант, Франция)

ÉCOLE SUPÉRIEURE DU BOIS

Высшая школа дерева

École supérieure du bois (*Высшая школа дерева*) - первое высшее учебное заведение в области естественных наук и технологий древесины. Он был создан в 1934 году городе Нант (Франция) под руководством специалистов и министерств сельского хозяйства, национального образования и промышленности.

Школа стремится научить будущих инженеров, техников и исследователей тому, что материалы на основе древесины и биоматериалов - это материалы будущего. Жилье, воздухоплавание, товары народного потребления ... области применения обширны и предлагают большие возможности для инноваций.

Между традицией, природой и инновациями, высшая школа дерева развивает это вместе и обучает таланты завтрашнего дня, чтобы раскрыть весь потенциал природы.

ISSN 0011-9008

Дерево — обрабатывающая промышленность

2/2019

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., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

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

***Башкиров Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор*
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический
университет»

***Гаспарян Гарик Давидович**, д.т.н., профессор*
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет»

***Григорьев Игорь Владиславович**, д.т.н., профессор*
ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия»

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

***Романов Евгений Михайлович**, д.с.-х.н., профессор*
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

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

***Семенов Юрий Павлович**, д.т.н., профессор*
ФГБОУ ВПО «Мытищинский филиал МГТУ им. Баумана»

***Торопов Александр Степанович**, д.т.н., профессор*
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

***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»

Зам. главного редактора
ответственный за международную ред. коллегию
***Štefan Barcík**, Prof. ing., Ph.D.*

Technical university in Zvolen,
Faculty of environmental and manufacturing technology,
Slovakia

Dr. prof. Vlado Goglia
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Ruzica Beljo Lucic
University of Zagreb, Croatia

Dr. prof. Nencho Delijski
University of Forestry, Bulgaria

Dr. prof. Ladislav Dzurenda
Technical University, Slovakia

Dr. prof. Etele Csanady
University of West Hungary

Dr. prof. Alfred Teischinger
BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Austria

Marian Babiak, PhD, Dr.h.c.prof.RNDr.
Czech University of Life Sciences Prague,
Czech Republic

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

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

© «Редакция журнала «Деревообрабатывающая промышленность», 2019

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

Мучкаева Г.М., Будевич Е.А., Шоль Н.Р., Самойлов В.В.
К вопросу о математическом исследовании микропрофиля поверхности лесосеки 3

Глотова Т.И.
Особенности базирования бревен на горизонтальных ленточных станках при получении пиломатериалов 9

Физико-механические процессы в деревообработке

Кукушкина В.А., Кантарюк Е.А., Кантарюк М.В., Русенко А.А.
Анализ резьбы по дереву в художественной обработке материалов 16

Микрюкова Е.В., Седых М.А.
Облегченные древесные плитные материалы с внутренним заполнением из картонных гильз 24

Разумов Е.Ю., Сафин Р.Р. , Мазуркин П.М., Сафина А.В., Хасаншина Р.Р.
Многофакторное моделирование динамики плотности древесины осины в процессе термомодифицирования 30

Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б.
К вопросу оценки адгезии лакокрасочных покрытий на древесине и древесных материалах методом решётчатых надрезов 40

Краснова В.Ф., Зотов Д.А.
Использование сухостойной древесины в качестве сырья для производства арболита 53

Химическая технология древесины

Просвирников Д.Б., Сафин Р.Р. , Козлов Р.Р.
Исследование физико-химических свойств и структуры лигноцеллюлозного материала, активированного паровзрывной обработкой 60

Галеев Т.Х., Садртдинов А.Р., Сафин Р.Г.
Когенерационная энергетическая установка по переработке растительной биомассы и ТБО на основе плазменного источника тепла 71

Жирнов Д.Н., Дернова Е.В., Дулькин Д.А.
Разработка методики оценки эффективности работы технологического оборудования размольно-подготовительного отдела в производстве бумаги и картона 79

Нгиа Н.Х., Зенитова Л.А., Просвирников Д.Б., Сафин Р.Г.
Получение микрокристаллической целлюлозы из рисовой шелухи 89

Лесоинженерное дело

УДК 630*22

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ МИКРОПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕСОСЕКИ

Г.М. Мучкаева, Е.А. Будевич, Н.Р. Шоль, В.В. Самойлов

В данной статье была исследованаматематическая модель микропрофиля поверхностного слоя лесосеки, способствующая выполнению изучения динамики машины, эксплуатируемой в условиях лесосеки при воздействии шероховатостей микрорельефа поверхностного слоя. Получены кривые процесса нестационарного случайного явления, воспроизведенные посредством моделирования и позволяющие провести статистический анализ зависимости изменения значений углов наклона платформы колесного типа от шероховатостей поверхностного слоя лесосеки.

Ключевые слова: *математическая модель, лесосечные машины, микрорельеф лесосеки.*

Введение

В сфере использования лесосечных машин и технологий лесозаготовок за последние годы наблюдаются существенные изменения. Применяются машины нового типа, которые могут функционировать в определенных природно-климатическихи производственных условиях по рельефным характеристикам лесосеки, условиям окружающей среды, видам почв, перечню древесных пород, составляющих древостой, показателями древостоя.

Передвижение машин производится по почво-грунтам лесного происхождения, отличающихся низким значением несущей способности и густотой корневых систем. Шероховатости поверхностей лесосеки оказывают влияние на передвижение машин колесного типа, используемых на лесосеке, при операциях по технологии производства древесины и являются главной причиной значительных колебаний непрерывного характера масс лесосечных машин[1-3].На стадиях создания проектов и выполнения исследовательских испытаний для достижения требуемых значений качественных показателей систем подрессоривания машин, функционирующих на лесосеке, возникает необходимость в стабилизации показателей поверхностей леса, служащих опорой для таких машин [4-5].

Микропрофиль поверхностного слоя лесосеки возможно установить посредством измерения рулеткой или сканированием дальномерами лазерного типа. Различают разные подходы в применении вероятностных показателей микропрофиля исследуемого участка. Один из них образует профиль участка в виде процесса изменения ординат, характеризующегося случайностью и непрерывностью. В данном случае предполагается, что такого рода процесс в изучаемых параметрах будет являться гауссовским. Другой подход предполагает статистическую обработку по участкам в виде зависимостей распределения длин и размахов шероховатостей.

Устранить недостаток данных о геометрических параметрах рельефа лесосеки возможно посредством построения математической модели профиля шероховатостей верхнего слоя лесосеки, выполняющей роль опоры для машин, применяемых в данных условиях. Применение такого рода моделей позволит повлиять на изучение действующих свойств машин, используемых на лесосеке при их конструировании и воспроизводстве испытаний доводочного характера [6-7].

Учитывая имеющийся опыт по выполнению математических моделей, можно определить основные принципы [8-9], предполагающие верный путь исследования:

- изучение расчетной схемы или структуры динамической системы; данный принцип возможно применить в тех случаях, когда структурная схема системы является простой;
- исследование значений, описывающих функциональные возможности системы и приобретенных в результате эксперимента; данный принцип позволяет выполнить гипотезу о структурной схеме системы и используется в случаях, когда схему невозможно представить;
- реализация экспериментов для извлечения информации, необходимой для определения структурной схемы системы.

На современном этапе изучения в части повышения эксплуатационных характеристик лесосечных машин главным образом направлены на исследования процессов перехода системы с определенного стационарного состояния на другое в сборочных единицах и узлах [10]. Всё же неоднозначные условия эксплуатации машин, применяемых на лесосеке, не дают возможности в полном объёме рационально использовать имеющийся опыт, сформированный в теоретических основах колебаний таких машин. В связи с этим для исследования колебаний платформы колесного типа можно выделить задачи, связанные с изучением как колебаний платформы машины, так и с явлениями, возникающими при контакте ходовой части с микропрофилем поверхности лесосеки.

Проблемы создания моделей функционирования технических систем освящены в работах таких ученых, как А.В. Жуков, Ю.А. Ширнин, В.А. Александров, П.М. Мазуркин. В трудах ученых раскрываются вопросы моделирования способов и методик рубок ухода и взаимодействия лесосечных машин с окружающей средой.

Исследования в части явления изменения состояния лесосечных машин отражены в трудах Е.Д. Львова, Ю.Е. Рыскина, В.Я. Аниловича. Результаты таких исследований используются при изучении вопросов моделирования лесосечных машин специального назначения с учетом их состояния.

Воздействия динамического характера на машины, применяемые на лесосеке, изучали В.И. Варава, В.А. Алексанров, В.Н. Андреев. Вопросами в части установления микрорельефа поверхностного слоя лесосеки занимались И.Г. Пархиловский, В.С. Щупляков, А.В. Жуков.

Методы и материалы

Применяются методы, основанные на создании математических моделей для изучения динамических свойств машин, используемых на лесосеке, а также методы экспериментальных исследований и статистический метод с элементами вероятностного подхода к изучению.

Результаты

Задачей математического моделирования рельефа поверхности лесосеки является получение линии профиля лесосеки с заданной корреляцией и дисперсией процесса

Проблемой исследования рельефалесосеки на математическом уровне считается получение линии профиля лесосеки с определенными значениями корреляции и дисперсии изучаемого процесса [11]. Применение подобной информации как параметров, оказывающих входное влияние, допускает изучение хода действия системы в зависимости от целого ряда вероятностных воздействий случайного характера.

Комплекс шероховатостей, определяем ый значениями, возникающими случайным образом вдоль осевой линии перемещения лесосечной машины, образует рельеф. В результате выполнения плавного контура шероховатости получается профиль в виде волнообразной синусоидальной кривой, что дает возможность при моделировании на математическом уровне применять метод с элементами вероятностного подхода к изучению систем динамического типа, основанный на статистическом подходе. При таком методе исследования случайных функций рассматривают свойства целого ряда связей элементов в общей сложности, а не свойства отдельной связи.

Построение математической модели предполагает следующие условия: микрорельеф лесосеки описывается случайной функцией эксплуатационной длины; размеры шероховатостей имеют ограничения по наибольшему максимуму профиля и наименьшему минимуму профиля; изменение микропрофиля характеризуется процессом, проявляющимся случайным образом и возможно в поверхности, отражающей диаметральную плоскость машины, применяемой на лесосеке.

Целью изучения микропрофиля верхнего слоя лесосеки, образующегося случайным образом, является извлечение выражения, функциональной способностью которого служило бы преобразование случайного явления типа «белый шум» в случайное явление с параметрами, заранее заданными. Действие такого выражения, преобразующего процессы, представлено в виде следующей схемы (рис. 1).

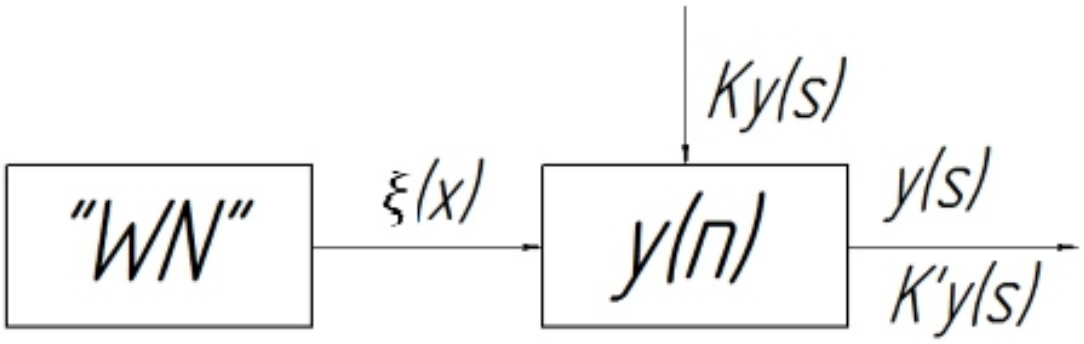


Рис. 1. Схема записи, модифицирующей процессы: ξ(x) – «белый шум» (WN); y(n) – запись, модифицирующаяпроцессы; $K_y s$ – корреляционная функция; y(s) –смоделированный процесс, проявляющийся случайным образом; $K'_y s$ – корреляционная функция микропрофиля, как результата моделирования

Рассмотрим модель случайного явления, которого можно охарактеризовать гауссовским законом с корреляционной функцией экспоненты и принять за модель микропрофиля верхнего слоя лесосеки [12]:

$$K(m) = Dexp(-am) \quad (1)$$

где D – дисперсия случайного явления; a – показатель, задающий корреляцию и характеризующий взаимозависимость ближних чисел (принимает только положительные значения).

На первичной стадии выполнения исследования нужно реализовать исполнение «белого шума» на дисперсном уровне продолжительностью N (где $N \geq 1000$ значений) с определенными условиямидисперсии и математического ожидания.

В условиях установившегося процесса выполняется полная дисперсия D при значении математического ожидания M(y)=0. Относительно неустановившегося процесса соблюдается распространение такого значения дисперсии как случайного значения с соответствующей величиной математического ожидания:

$$D = h_n + exp(h_{n-1}\Delta t) \quad (2)$$

$$M(y) = h_n + h_{n-1}\sin\Delta t \quad (3)$$

Для претворения такого исполнения в реальное событие нужно определенное число (N)раз воспользоваться устройством, определяющим числа случайным образом, которые рассредоточиваются по гауссовскому закону и являются независимыми. В части выполнения модели гауссовского процесса с экспоненциальной корреляционной функцией в системах со случайным процессом применяется следующая зависимость:

$$y(n) = k_1 e(n) + k_2 \text{y(n-1)}, \quad (4)$$

где:$k_1 = \left(D(1-k_2^2)\right)^{\frac{1}{2}}$; e(n) – величина, характеризующая «белый шум» непостоянного явления; k_2– коэффициент, определяющий корреляцию ближних чисел случайного явления, может принимать значение от 0,9 и не выходить за пределы единицы.

В качестве характеристик модели в такой части выступают дисперсия исследуемого выходного процесса D и показатель a, описывающий взаимосвязь ближних чисел. Значение коэффициента k_2 может достигнуть единицы, если все параметры случайного процесса окажутся на едином уровне, а когда данный коэффициент будет клониться к нулю, то на выходе возможно получить модель дискретного непостоянного гауссовского так называемого «белого шума». На рисунке 2 представлена случайная функция для «белого шума».

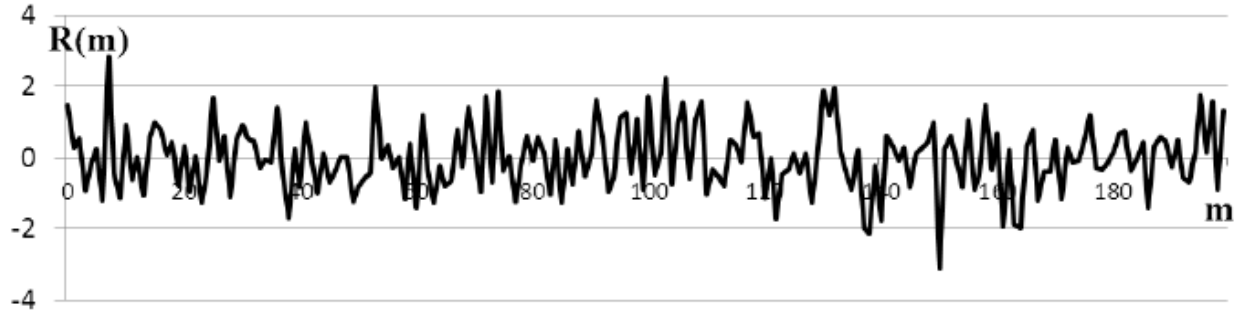


Рис. 2. Случайная функция для «белого шума»

Построение линии профиля микрорельефа верхнего слоя лесосеки с задаваемыми значениями корреляции и дисперсии данного процесса является завершающим этапом выполнения модели гауссовского случайного процесса. Значения, используемые для исследования процесса, отображены в таблице 1. Итоги моделирования микропрофиля поверхностного слоя лесосеки для неустановившегося процесса представлены на рисунках 3-5.

Таблица 1 – Отдельные значения для построения математической модели микрорельефа поверхностного слоя лесосеки

№	Случайная величина, S	«белый шум» дискретного явления	Математическое ожидание, Уср	Дисперсия, D	Исполнение случайного процесса, У(n)
1	0,502899	-0,9794	36,081	12,0419	-3,846972
2	0,048981	-0,4851	35,851	12,2109	-3,571904
3	0,095898	0,45918	36,253	12,3796	-3,136796
4	0,119164	0,64980	36,782	12,5579	-3,697258
5	0,725934	-1,0256	37,421	12,7246	-3,768842
6	0,648121	0,37123	38,015	12,9248	-3,519705
7	0,848999	0,13474	38,693	13,0894	-4,302925
8	0,841186	1,01489	39,154	13,2821	-2,186924
9	0,942983	-1,7854	39,751	13,4702	-2,378659
10	0,598474	-1,0688	40,356	13,6605	-3,198258

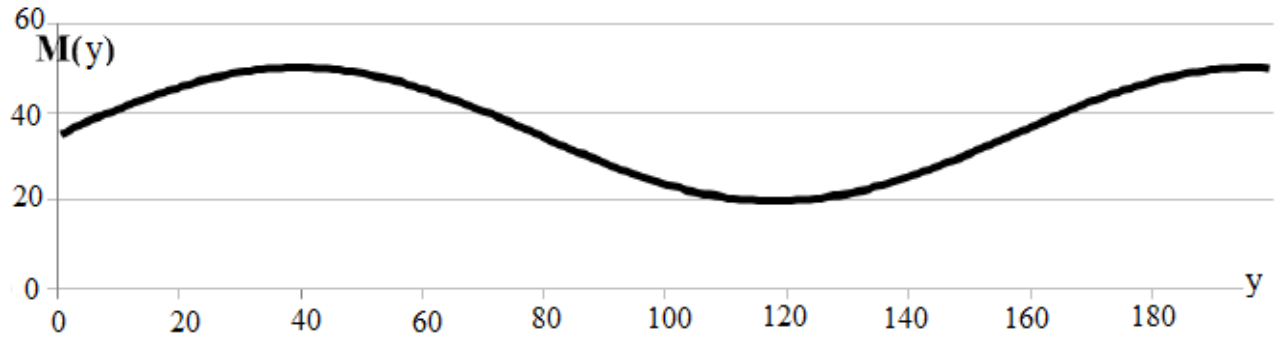


Рис. 3. Математическое ожидание (M(y)) ординат микропрофиля

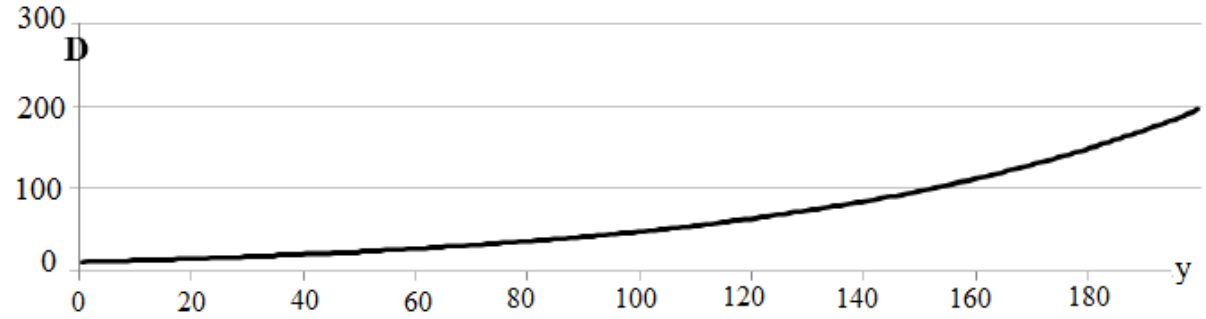


Рис. 4. Среднее квадратичное отклонение (D) ординат микропрофиля

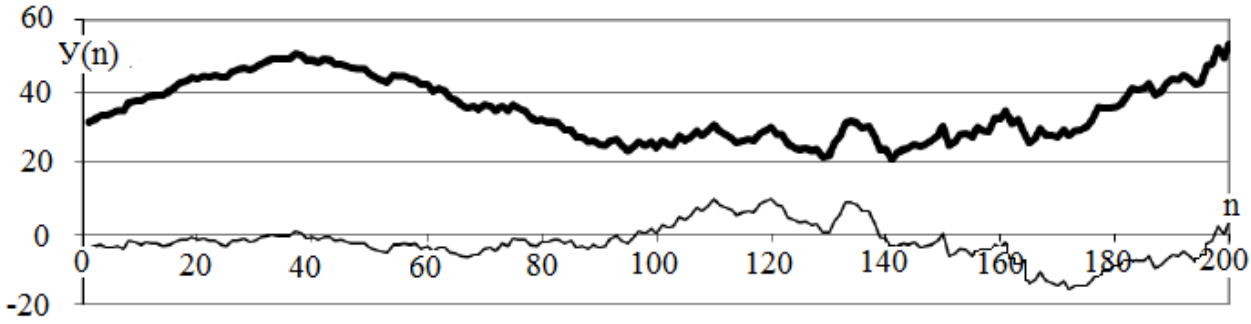


Рис. 5. Смоделированный процесс неустановившегося случайного явления (криваянижняя) с учетом значения математического ожидания (кривая верхняя)

Заключение

Выполненная математическая модель микропрофиля поверхностного слоя лесосеки способствует выполнению исследования динамики машины, применяемой на лесосеке при воздействии шероховатостей микрорельефа. В таком случае можно выполн ить статистический анализ влияния шероховатостей поверхностного слоя лесосеки на изменение значений углов наклона колесной платформы.

Литература

1. Скрыпник В.И. Некоторые подходы к организации испытаний машин на лесосечных работах // Научные исследования: от теории к практике. – 2016. - №2-1 (8). – С. 279-280.

2. Григорьев И.В., Цыгарова М.В., Жукова А.И., Лепилин Д.В., Есин Г.Ю. Планирование эксперимента при исследовании взаимодействия трелевочной системы с волоком // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. - №2. – С. 47-54.

3. Бурмистрова О.Н., Шоль Н.Р., Травин Н.Н. Методика экспериментальных исследований валочно-пакетирующей машины // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2010. - №5. – С. 101-102.

4. Угрюмов Б.И., Гаспарян Г.Д., Михайлов Н.С. Математическое моделирование технологического процесса лесозаготовки зарубежной техникой // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. - №1 (25).- С. 184-186.

5. Григорьев И.В. Методика определения характеристик микропрофиля трелевочного волока // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2005. - №176. – С. 76-85.

6. Юдина Н.Ю., Пошарников Ф.В., Буланов А.С. Методика решения задач оптимизации с использованием математических моделей технологических операций // Лесотехнический журнал. – 2012. - №2 (6). – С. 132-140.

7. Голякевич С.А. Математическая модель для оценки нагруженности несущих конструкций многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2013. – №2 (158). – С. 65-71.

8. Протас П.А., Мисуно Ю.И. Структурная схема и критерии оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – №2 (184). – С. 248-253.

9. Wood M.J., Carling P.A., Moffat A.J. Reduced ground disturbance during mechanized forest harvesting on sensitive forest soils in the UK // Forestry. – 2003/ - v. 76. - №3. – c. 345.

10.Кручинин И.Н. Математическая модель лесотранспортной машины для исследования взаимодействия ходовой части с деформируемой опорной поверхностью // Современные проблемы науки и образования. – 2014. - №5. – С.1-8.

11.Хитров Е.Г., Хахина А.М., Дмитриева М.Н., Песков В.Б., Григорьева О.И. Уточненная модель для оценки тягово-сцепных свойств колесного движителя лесной машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. - №217. – С. 108-119.

12.Ласточкин Д.М., Москалева С.А., Ларина А.В., Мучкаева Г.М. Моделирование опорной поверхности лесосечных машин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. - №85. – С. 231-243.

© **Мучкаева Г.М.** – канд.с-х.наук, доцент кафедры «Агроинженерия» ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова»(ФГБОУ ВО «КалмГУ им Б. Б. Городовикова»); **Будевич Е.А.**– канд. техн. наук, доцент кафедры «Инжиниринг технологических машин и оборудования» ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГТУ»); **Шоль Н.Р.** – канд. техн. наук, профессор кафедры «Инжиниринг технологических машин и оборудования» ФГБОУ ВО «УГТУ»; **Самойлов В.В.** – магистрант кафедры «Агроинженерия» ФГБОУ ВО «КалмГУ им Б. Б. Городовикова» ; galya_2508@mail.ru.

UDC 630*22

TO THE QUESTION ABOUT THE MATHEMATICAL RESEARCH OF THE MICROPROFILE OF THE SURFACE OF FORESECA

G.M. Muchkaeva, E.A. Budevich, N.R. Shol, V.V. Samoilov

In this paper, we have investigated a mathematical model for white-surface layer of the cutting area, contributing to the study of machine dynamics operating in a logging site under the influence of the roughness of the microrelief of the surface layer. The curves of the process of non-stationary random phenomena, reproduced by modeling and allowing to carry out a statistical analysis of the dependence of changes in the values of the tilt angle of the wheel-type platform on the roughness of the surface layer of the cutting area.

Keywords: *mathematical model, cutting machines, microrelief of cutting area.*

References

1. Skrypnik V.I. Nekotorye podhody k organizacii ispytanij mashin na lesosechnyh rabotah // Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike. – 2016. - № 2-1 (8). – S. 279-280.

2. Grigor'ev I.V., Cygarova M.V., ZHukova A.I., Lepilin D.V., Esin G.YU. Planirovanie eksperimenta pri issledovanii vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s volokom // Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. – 2011. - № 2. – S. 47-54.

3. Burmistrova O.N., SHol' N.R., Travin N.N. Metodika eksperimental'nyh issledovanij valochno-paketiruyushchej mashiny // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik. – 2010. - №5. – S. 101-102.

4. Ugryumov B.I., Gasparyan G.D., Mihajlov N.S. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskogo processa lesozagotovki zarubezhnoj tekhnikoj // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. – 2010. - №1 (25).- S. 184-186.

5. Grigor'ev I.V. Metodika opredeleniya harakteristik mikroprofilya trelevochnogo voloka // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoj akademii. – 2005. - № 176. – S. 76-85.

6. YUdina N.YU., Posharnikov F.V., Bulanov A.S. Metodika resheniya zadach optimizacii s ispol'zovaniem matematicheskih modelej tekhnologicheskih operacij // Lesotekhnicheskij zhurnal. – 2012. - № 2 (6). – S. 132-140.

7. Golyakevich S.A. Matematicheskaya model' dlya ocenki nagruzhennosti nesushchih konstrukcij mnogooperacionnyh lesozagotovitel'nyh mashin // Trudy BGTU. №2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. – 2013. – № 2 (158). – S. 65-71.

8. Protas P.A., Misuno YU.I. Strukturnaya skhema i kriterii ocenki ekspluatacionno-ekologicheskoj sovmestimosti lesnyh mashin s pochvogruntami // Trudy BGTU. №2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. – 2016. – № 2 (184). – S. 248-253.

9. Wood M.J., Carling P.A., Moffat A. J. Reduced ground disturbance during mechanized forest harvesting on sensitive forest soils in the UK // Forestry. – 2003/ - v. 76. - № 3. – c. 345.

10. Kruchinin I.N. Matematicheskaya model' lesotransportnoj mashiny dlya issledovaniya vzaimodejstviya hodovoj chasti s deformiruemoj opornoj poverhnost'yu // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. - №5. – S.1-8.

11. Hitrov E.G., Hahina A.M., Dmitrieva M.N., Peskov V.B., Grigor'eva O.I. Utochnennaya model' dlya ocenki tyagovo-scepnyh svojstv kolesnogo dvizhitelya lesnoj mashiny // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoj akademii. – 2016. - № 217. – S. 108-119.

12. Lastochkin D.M., Moskaleva S.A., Larina A.V., Muchkaeva G.M. Modelirovanie opornoj poverhnosti lesosechnyh mashin // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. - № 85. – S. 231-243.

©**Muchkaeva G.M.** –PhD in Agricultural sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering «Kalmyk state university named after B.B. Gorodovikov» («KalmSU named after B.B. Gorodovikov»); **Budevich E.A.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Technological Machines and Equipment «Ukhta state technical university» («USTU»); **Shol N.P.** – PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Engineering Technological Machines and Equipment «USTU»; **Samoilov V.V.** – master's Degree student of the Department of Agricultural Engineering («KalmSU named after B.B. Gorodovikov»; e-mail: galya_2508@mail.ru.

УДК 674.093.6

ОСОБЕННОСТИ БАЗИРОВАНИЯ БРЕВЕН НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ СТАНКАХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Т.И. Глотова

В статье рассмотрены вопросы применения горизонтальных ленточнопильных станков для производства пиломатериалов. Указаны основные проблемы, связанные с использованием данного вида оборудования. Выявлены причины снижения качества пиломатериалов, полученных при раскрое бревен на горизонтальных ленточнопильных станках. Базирование бревен по образующей приводит к отклонению комлевого торца и смещению оси бревна от горизонтальной плоскости от 30 до 70 мм, что является причиной возникновения несимметричного постава, снижения объемного выхода, увеличению наклона волокон и покоробленности досок после сушки. Предложена методика расчета поставов при раскрое бревен с учетом его базирования.

***Ключевые слова**: Ленточнопильные станки, базирование бревен, наклон волокон, покоробленность пиломатериалов, теория раскроя.*

Введение

Повышение эффективности использования пиловочного сырья во все времена оставалось одной из основных задач, которые ставились перед лесопильной промышленностью. В последнее время эта задача в основном решается за счет применения новых типов бревно перерабатывающего оборудования: проходного, позиционно-проходного и позиционного типов. Использование прогрессивного бревнопильного оборудования позволяет коренным образом преобразовать лесопиление, и ориентировать его на наиболее перспективные технологии, системы управления и оптимизации производства пиломатериалов [1].

Отечественные лесопильные предприятия. в целях экономии на приобретение станочного парка, все больше внимания уделяютгоризонтальным ленточнопильным станкам производительностью 8 - 10 м³ в смену.

Ленточнопильные станки в настоящее время считаются одними из наиболее перспективных по распиловке круглого леса. Они экономичны в эксплуатации, дают самый хороший коэффициент выхода пиломатериала, за счёт малой толщины пропила (2,2 мм) и возможность индивидуального раскроя каждого бревна [2, 3]. Ленточные станки оптимально сочетают в себе критерии «цена - качество – эффективность», так как обеспечивают высококачественную распиловку, в том числе крупно - и короткомерныхбревен любых пород, при низких энергозатратах и эксплуатационных расходах, не имеют аналогов по простоте и надежности.

Стоит отметить, что наряду с большими преимуществами, эксплуатация данного вида оборудования связана с проблемами использования рабочего времент станка и получения пиломатериалов требуемого качества. [4] Так на производительность ленточнопильного станка и качество получаемых пиломатериалов оказывает влияние конструкция узлов пильного суппорта и стапеля (узел, предназначенный для размещения обрабатываемого материала); материал и размеры полотна пилы, геометрические параметря зубьев применяемых пил [5]. Кроме указанных факторов, на качество получаемой продукции значительное влияние оказывают размерно-качественные характеристики пиловочного сырья, а также сезонность его заготовки и переработки. В настоящее время, производители пиломатериалов недостаточно уделяют внимания операции оттаивания сырья в зимний период времени, что приводит к излишнему изнашиванию инструмента и снижению качества поверхности пиломатериалов.

Опыт практического импользования горизонтальных ленточнопильных станков показывает, что к конструкции узлов пильного суппорта предьявляются дополнительные требования по жесткости и устойчивости, то есть люфты и зазоры между механизмами должны быть минимальными и не оказывать влияние на скорость перемещения каретки с пильными шкивами. На условие распиловки большое влияние оказывает натяжение пильной ленты и надежность поддерживающих и направляющих роликов, а также расположение пилы относительно торца бревна. Карретка с пильными шкивами, расположенная под углом к оси стапеля станкаобеспечивает вход пилы в пропил под углом в 10-12°, что позволяет снизить усилия резания и повысить качество получаемых пиломатериалов.

Важным условием качественной работы станка является повышенная жесткость стапеля, так как он воспринимает существенные динамические нагрузки при накатке бревен и их кантовании в процессе раскроя.

Производители горизонтальных ленточнопильных станков часто указывают в основных преимуществах отсутствие повышенных требований к обустройству подстаночного фундамента, так как отсутствуют большие динамические вибрации. Но практическое применение доказывает обратное. Стапель и рельсовый путь перемещения рамы ленточнопильного суппорта обязательно должны быть установлены строго в горизонтальной плоскости, что обеспечивается достаточной степенью подготовительных работ по формированию подстаночной площадки и креплением станка анкерными болтами. Процесс установки и правильность расположения стапеля и рельсов подлежит контролю как при пусковых работах, так и при эксплуатации станка, это является одним из гарантов стабильной и качественной работы оборудования.

Анализ литературных источников[5-9] и данных по эксплуатации ленточнопильных станков марки ЛП-6000 в условиях деревообрабатывающего производства показал, что наряду с перечисленными проблемами работы обрудования существует недостаток в конструкции станков, связанный с отсутствием механизма подъема и ориентации вершинного торца бревна относительно плоскости пилы. Этот механизм должен обеспечивать возможность установки пилы в процессе раскроя в плоскости параллельной геометрической оси бревна. Указанный механизм присутствует на станках фирмы «WoodMizer» и является обязательной частью устройства для кантования бревен [2].

Обычно производители пилопродукции не уделяют должного внимания этой проблеме и в конечном итоге получают доски с наклоном волокон более 10 %. Это обстоятельство, как правило, вызывает такой дефект при сушке, как продольная покоробленность пиломатериалов. Доски, имеющие покоробленность при дальнейшей обработке подлежат раскрою на отрезки меньшей длины, что увеличивает трудозатраты и снижает выход продукции.

Следует отметить, что причиной возникновения наклона волокон в пиломатериалах также является наличие сучков. Анатомические элементы строения древесины при росте дерева вынуждены огибать место расположение сучков, тем самым создавая наклон волокон, размер которого может достигать 20%. В результате сушки пиломатериалы принимают ярко выраженную продольную покороб ленность по пласти, которая может составлять более 18 мм на 6 м длины доски. Продольная покоробленность пиломатериалов возникает и при наличии кромочных сучков, выходящих на обе пласти доски. Эти обстоятельства необходимо учитывать в процессе базирования и кантования бревен при раскрое на горизонтальных ленточнопильных станках, так как наряду со смещением оси бревна, смещается и расположение пороков относительно геометрии получаемых досок.

Качестводосок, получаемых на оборудовании рассматриваемого типа, в значительной степени зависит от качества подготовки инструмента. Применяемые узкие ленточные пилы, шириной до 50 мм, а так же геометрические параметры зубьев пил являются причиной возникновения на поверхности доски излишней волшнистости и шероховатости, превышающей допустимые значения.

В процессе анализа работы горизонтального ленточнопильного станка ЛП-6000 установлено, что применение ленточных пил, изготовленных с применением конструкционных и инструментальных сталей, позволяет увеличить скорость подачи с 8 до 16м/ мин. При этом, рекомендуется уделять пристальное внимание процессу пдготовки пил: производить заточку после раскроя 1-2 $м^3$ круглых лесоматериалов; поизводить до 10-15 переточек пил в течении периода работы станка. Следует отметить, что наиболее рациональным считается применение пил с толщиной полотна равной от 1 до 1,5 мм, и шириной от 32 до 50 мм, шаг зубьев при этом должен составлять от 19 до 25 мм, а передний угол должен находиться в пределах от 9 до 11 $^{\circ}$, уширение зубьев должно составлять от 0,45 до 0,75 мм. За величиной уширения необходимо следить, так как его уменьшение может привести к зажиму пилы в пропиле, а увеличение выше рекомендуемого может стать причиной излишней шероховатости и волнистости пропила.На возникновение волнистости пропила, при распиловке хвойных лесоматериалов существенное влияние оказывает наличие сучков, так как их плотность превышает плотность древесины почти в 1,5 – 2 раза[6, 10]. Попадая на сучок, узкая ленточная пила отклоняется от горизонтальной плоскости и совершает рез, приводящий к возникновению разнотолщинности получаемых досок. Аналогичный дефект возникает при раскрое мерзлой древесины в зимной период и бревен диаметром более 50 см, содержащих ядровую гниль.

Практический опыт эксплуатации горизонтальных ленточнопильных станкоп позволил сформулировать ряд рекомендаций, позволяющих повысить производительность станков и качество получаемых пиломатериалов. К данным рекомендациям относится: раскрой низкокачественного сырья при уменьшеной скоростй подачи каретки суппорта ленточной пилы до 6 – 8 м/мин; применение пил с передним углом порядка 2 - 5°.

Указанные факторы оказывают существенное влияние на качество получаемых пиломатериалов и должны быть учтены при выборе способа базирования бревна при раскрое его на двухкантный брус и доски.Необходимые теоретические положения позволят обосновать применение механизма подъема и ориентации торца бревна с целью повышения производительности и улучшения качества получаемой продукции.

Целью исследования является разработка методики расчета поставов,при базировании бревна по образующей, и установление влияния на объемный и качественный выход пиломатериалов величины отклонения плоскости пропилов относительно оси распиливаемого бревна .

Научной новизной являются аналитические закономерности, позволяющие произвести расчет поставов при раскрое бревен, параллельно образующей с целью обоснования снижения объемного выхода и качества пиломатериалов при таком способе базирования.

Теоретическая значимость заключается в расширении теоретических положений теории раскроя пиловочного сырья с учетом базирования пиловочных бревен на горизонтальных ленточнопильных станках.

Практическая значимость – определение влияния величины отклонения плоскости пропила от оси бревна на объемный выход пиломате риалов и установление численных значений величины подъема вершинного торца при раскрое.

Методы и материалы

Методической основой послужили положения теории раскроя бревен на пиломатериалы и методы оптимизации объемного выхода. Эмпирическую основу исследования составили размерно-качественная характеристика пиловочного сырья и данные опытных распиловок на горизонтальных ленточнопильных станках марки ЛП-6000. Для исследования были использованы данные о раскрое бревен при их базировании по образующей ствола.

Результаты исследований

Распиловка происходит при базировании бревна на его боковую поверхность, при этом пропилы располагаются параллельно образующей ствола. При распиловке бревна с брусовкой, бревно переворачивается на 180° и далее распиливается параллельно пласти бруса «рис. 1».

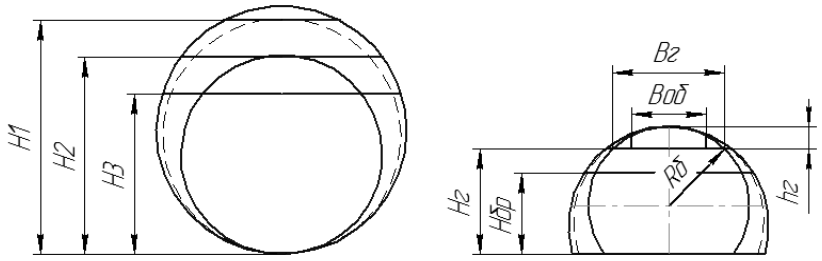


Рис. 1. Схема раскроя бревна, при базировании по образующей: H1,H2,H3 – высота пропила, параллельно образующей; Нбр- толщина бруса; Нг – высота пропила, образующего длинномерный горбыль; Вг – ширина пласти горбыля; Воб – ширина обшивки; $R_{бр}$ – исходный радиус бревна в вершине; $h_г$ – толщина горбыля в вершине бревна

При базировании на боковую поверхность происходит смещение оси бревна относительно горизонтальной плоскости на величину равную углу наклона α, который определяется по формуле

$$\alpha = arctan\left(\frac{D-d}{2}L\right), \quad (1)$$

где *D*-диаметр бревна в комлевом торце;

d- диаметр бревна в вершинном торце;

L-длина бревна.

Боковая поверхность бревна отклоняется от горизонтальной оси на угол β, который определяется по формуле

$$\beta = arcsin\left(\frac{H-h}{L}\right), \quad (2)$$

где *H*-отклонение в комлевом торце;

h - отклонение в вершинном торце.

Эти отрезки образуются при смещении торца бревна от плоскости перпендикулярной плоскости базирования. Отклонение составляет половину величины сбега «рис. 2».

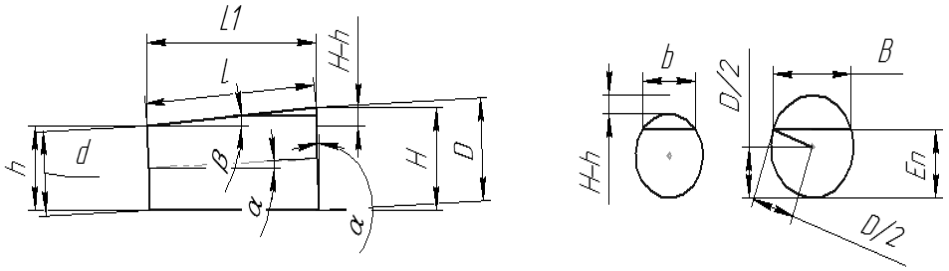


Рис. 2. Схема к расчету угловых параметров

Величина отклонения определяется с учетом смешения комлевого диаметра на угол α

$$h = d\cos\alpha;$$

$$H = D\cos\alpha. \quad (3)$$

Расчет постава начинается с определения расхода ширины постава E_n, который в данном случае является расстоянием от плоскости базирования до плоскости пропила. Расход постава для бруса определяется по формуле

$$E_n = \frac{d}{2} + H_{\text{бр}}. \quad (4)$$

где d – вершинный диаметр бревна;

$H_{бр}$ - толщина бруса.

Ширина пласти бруса и ширина досок, у которых высота пропила меньше вершинного диаметра рассчитываются по формуле

$$b = 2\sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(E_n - \frac{d}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

Расход ширины или высота пропилов Н2, Н3 (рис.1), образующих боковые доски определяется с учетом толщины доски - t, припуска на усушку - y и толщины пропила–p

$$H3 = H2 + (t + y) + p. \quad (6)$$

Для досок, у которых высота пропила превышает вершинный диаметр бревна, ширина определяется по комлевому диаметру с учетом смещения центра бревна на угол α.

$$B = 0{,}577\sqrt{2\left[\left(\frac{H}{2}\right)^2 - \left(\frac{H_i - H}{2}\right)^2\right]}, \quad (7)$$

где H_i – высота пропила для i-ой доски.

Длина боковых досок рассчитывается с учетом величины укорочения

$$l = L1 - \left(\frac{d-h}{\tan\beta}\right), \quad (8)$$

где $L1$- расстояние от вершинного до комлевого торца, с учетом величины отклонения

$$L1 = L\cos\beta, \quad (9)$$

где L – длина бревна.

Разница между H-h показывает на сколько отклоняется комлевой диаметр от горизонтальной оси. Это отклонение в значительной степени оказывает влияет на образование наклона волокон при получении пиломатериалов.

Проведенные расчеты показали, что отклонение зависит от величины диаметра и длины бревен. При изменении длины бревен от 3 до 6,5 м и неизменной для определенного вершинного диаметра смещение увеличивается в среднем от 30 до 70 мм. Это смещение является причиной несимметричной распиловки бревна, при получении двухкантного бруса и раскрое боковой части на доски. При первоначальном раскрое бревна из боковой части получается досок больше, чем при раскрое оставшейся части бревна и ее повороте на 180°.

При раскрое после порота все боковые доски имеют длину равную длине бревна, так как выпиливаются из оставшейся части вершинного диаметра, при этом происходит образование горбыля, длиной равного длине раскраиваемого бревна[11].

Ширина досок (рис.1) определяется с учетом того, что центр бревна смещен на величину, равную половине толщины получаемого бруса $H_{бр}$

$$b = 2\sqrt{\left[\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{E_n - H_{\text{бр}}}{2}\right)^2\right]}. \quad (10)$$

По разработанной методике проведены расчеты поставов и определен объемный выход пиломатериалов.

В таблице 1 представлены результаты расчета постава при условиях: порода – сосна; диаметр бревна 26 см; длина 6м; диаметр в комле 31см; объем бревна 0,39 м^3; толщина пропила 2,2 мм; угол между плоскостью торца бревна и перпендикуляром к плоскости базирования α=2,52°; угол наклона образующей β=5,04°; h=25,97 см; H=31,24см; L1=5,97м

Таблица 1 – Результаты расчета постава

Толщина, мм	Количество, шт.	Расход ширины постава, мм		Ширина доски, мм		Длина, м	Объем, м^3	Выход, %
		на одну доску	общий	расчетная	стандартная			
120	1	192,75	192,75	227,2	-	-	-	-
25	1	28,03	220,78	185,5	175	6	0,02625	6,7
25	1	28,03	248,81	178	100	6	0,015	3,8
25	1	28,03	276,84	110,4	75	3	0,00562	1,4
поворот на 180°								
120	1	123,3	123,3	228,6	225	6	0,162	41,5
25	1	28,03	151,33	187,8	175	6	0,02625	6,7
25	1	28,03	179,36	109,7	100	6	0,015	3,8
Итого								64,1

Заключение

1. Базирование и пиление лесоматериалов по образующей приводит к несимметричному поставу. Несимметричный постав уменьшает объемный выход пиломатериалов на10%.Получаемые при раскрое доски на первых проходах имеют наклон волокон более 10°, что при сушке приводит к покоробленности пиломатериалов.

2.Стапель станканеобходимо снабжать механизмом подъема вершинного торца бревна. Величина подъема в зависимости от диаметра составляет от 15 до 45 мм.

3 Методика расчета поставов при базировании бревна по образующей может быть рекомендована для теоретического и практического использования в расчетах объемного выхода пиломатериалов.

Литература

1. Калитеевский, Р.Е. Лесопиление в XX1 веке. Технология, оборудов ание, менеджмент / Р.Е. Калитеевский. – С-Пб.: ПРОФИ-ИНФОРМ , 2005.- 480 с.

2. Справочник по лесопилению / под ред. Ю.Б. Шимкевича. - С-Пб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. – 200с.

3. Глотова Т.И. Совершенствование технологической подготовки производства пиломатери алов при круговом способе раскроя бревен //Деревообрабатывающая промышленность, 2018.-№2,С.10-15.

4. Белозеров И.Л. Расчет поставов для максимального ценностного выхода обрезных пиломатериалов// Деревообрабатывающая промышленность, 1988.- №10 С. 5-7.

5. Алексеева Л.В. Повышение эффективности применения ленточнопильных станков в условиях малого лесопиления // Л.В. Алексеева : Дис. канд. техн. наук. – Архангельск, 2002. – 293 с.

6. Веретенкин Д.Г. Влияние сучков на ценностный коэффициент сосновых и еловых пиломатериалов // В сборнике: Науч. тр. ЦНИИМОД, 1984. С.135.

7. Жаденов В.С., Заикин А.Н. Оборудование для продольной распиловки лесоматериалов (этапы развития) // Учебное пособие по технологии и оборудованию лесозаготовок – Брянск, БГИТА, 2002.-62 с.

8. Калитеевский Р.Е. Технология лесопильно -деревообрабатывающих производств. Эколого-технологические проблемы лесопиления. Метод, указания по курсовому и дипл. проектированию для студентов спец. 26.02. СП ЛТА, 1993. 29 с.

9.Алексеев А.Е. Базирование в производстве пиломатериалов.//Архангельск: АГТУ, 1999. 152 с.

10. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения: ГОСТ 2140-81. – Изд. с июнь 1981 с Изм. 1,2.- Взамен ГОСТ 2140-71; введ.01.01.82

11. Квасов В.В., Глотова Т.И., Полу чение и использование длинномерного горбыля при производстве деревянного щита для сборки домов // В сборнике:Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды-2018 материалыVIIIВсероссийской научно-

практической конференции школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 томах.2018. С. 144-147.

© **Глотова Т.И.** – канд. техн. наук, доцент, доцент, кафедра «Технология деревообработки»,Брянский государственный инженерно-технологический университет,e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru

UDC 674.093.6

PECULIARITIES OF BASING OF HANDS ON HORIZONTAL BELTIC MACHINES WHEN RECEIVING THE TIMBER

T.I. Glotova

The article deals with the use of horizontal band sawing machines for the production of lumber. The main problems associated with the use of this type of equipment are indicated. The reasons for the decline in the quality of sawn timber obtained when cutting logs on horizontal band saws are identified.Basing logs along the generatrix leads to a deviation of the butt end and a shift of the log axis from the horizontal plane from 30 to 70 mm, which causes an asymmetrical set, a decrease in volume output, an increase in fiber tilt and warping of the boards after drying. A method of calculating sawing schedules when cutting logs with regard to its basing is proposed.

Key words: *Bandsaws, base of logs, inclination of fibers, warping of timber materials, cutting theory.*

References

1. Kaliteevsky, R.E.[Sawing in the XX1 century. Technology, equipment, management]/ R.E. Kaliteyevskiy. - S-Pb .: PROFI-INFORM [R.E. Kaliteevsky. - St. Petersburg: PROFI-INFORM] 2005.- 480 p.

2. [Handbook of sawmilling] pod red. YU.B. Shimkevicha. - S-Pb.: PROFI-INFORM [ed. Yu.B. Shimkevich. - St. Petersburg: PROFI-INFORM] 2005. – 200 p.

3. Glotova T.I. [Improving the technological preparation of the production of lumber in a circular way of cutting logs] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2018 .-№2, pp.10-15.

4. Belozerov I.L [Calculation ofsawing schedules for maximum value output of edged sawn timber] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost [Woodworking industry] 1988.- №10 pp. 5-7.

5. Alekseyeva L.V. [Improving the efficiency of band sawing machines in conditions of small sawing] L.V. Alekseyeva : Dis. kand. tekhn. nauk. – Arkhangelsk[L.V. Alekseeva: Dis. Cand. tech. sciences. - Arkhangelsk], 2002. – 293 p.

6. Veretenkin D.G. [The effect of knots on the value coefficient of pine and spruce lumber] V sbornike: Nauch. tr. TSNIIMOD [In the collection: Scientific. tr. TSNIIMOD] 1984. p.135

7. Zhadenov V.S., Zaikin A.N. [Equipment for the longitudinal sawing of timber (stages of development)] Uchebnoye posobiye po tekhnologii i oborudovaniyu lesozagotovok – Bryansk, BGITA [Manualonthetechnologyandequipmentoflogging - Bryansk, BGITA] 2002.-62 p.

8. Kaliteevsky R.E. [Technology sawmill and woodworking industries. Ecological and technological problems of sawmilling]Metod, ukazaniya po kursovomu i dipl. proyektirovaniyu dlya studentov spets. 26.02. SP LTA [Method, instructions for coursework and dipl. design for students specials. 26.02]1993. 29 p.

9.Alekseev A.E. [Basing in lumber production]Arkhangelsk: AGTU[Arkhangelsk: AGTU]1999. 152p.

10. [Visible defects of wood. Classification, terms and definitions, methods of measurement: GOST 2140-81] Izd. s iyun' 1981 s Izm. 1,2.- Vzamen GOST 2140-71[Ed. from June 1981 to Izm. 1,2.- Instead of GOST 2140-71]enter.01.01.82.

11. Kvasov V.V., Glotova T.I.[Obtaining and using lengthy croaker in the production of wooden panels for assembling houses]V sbornike: Ekologiya, ratsional'-noye prirodopol'zovaniye i okhrana okruzhayushchey sredy-2018 materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii shkol'nikov, studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [In the collection: Ecology, rational nature management and environmental protection-2018 materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference schoolchildren, students, graduate students and young scientists]in 2 volumes. Pp. 144-147.

© **Glotova T.I.** – Cand. tech. Sci., Associate Professor, Associate Professor, Department of Woodworking Technology, Bryansk State Impact Engineering and Technological University, e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 745.51

АНАЛИЗ РЕЗЬБЫ ПО ДЕРЕВУ В ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Кукушкина, Е.А. Кантарюк, М.В. Кантарюк, А.А. Русенко

В данной статье рассмотрена ручная и автоматизированная резьба. Ручная художественная резьба – это один из древних видов народного декоративного искусства. Представлены основные этапы ручной работы при рельефной резьбе. Приведена классификация видов резьбы по дереву.
В настоящее время благодаря развитию науки и техники мы имеем возможность для создания резных узоров (по дереву) использовать автоматизированное оборудование, например, станки с числовым программным управлением.Рассмотрен пример изготовления резной иконы на станке с ЧПУ.Обозначена актуальность применения резных рельефных икон. Выявлены характерные особенности и приоритеты применения станков с числовым программным управлением при рельефной художественной резьбе, которые включают ряд преимуществ, таких как точность и детализация исполнения по 3D-модели, а так же значительное сокращение временных затрат и упрощение трудоёмкости технологического процесса.

Ключевые слова: *резная икона, станок ЧПУ, технология, инструмент. 3D-модель.*

Введение

Традиция художественной резьбы по дереву в русском народном творчестве существует и здавна, как один из самых развитых и наиболее древних видов народного декоративного искусства. Повсеместному распространению и популярности резьбы по дереву способствовали простота обработки и доступность материала, наличие умелых мастеров и богатые традиции. Плотники и столяры со всех концов России строили хоромы и терема, ставили ендовы и скобари для кваса и медовых напитков, делали красивейшую домашнюю утварь, например, плоские и широкие корыта для теста – дежи и ковши. На ярком солнце блистала расписанная киноварью и золотом рельефная резьба наличников и крылец. В XVII – XVIII вв. искусство художественной резьбы по дереву стало активно применяться в оформлении иконостасов, дворцовых интерьеров, мебели, где преобладала объемная, горельефная, накладная и прорезная резьба.

Актуальность резьбы по дереву вновь возрастает в последнее время, интенсивнее входя в жизнь людей [1].

Виды резьбы по дереву

Ручная резьба применялась для декорирования поверхности предметов линиями и объемными изображениями различной глубины при помощи ручного инструмента.В зависимости от замысла мастера, назначения и стиля будущего изделия, а также от техники исполнения резьба может быть выполнена по-разному. Существуют различные классификации видов резьбы по дереву, где исследователи подразделяют ручную резьбу на несколько групп по способу изготовления, технологическим, геометрическим и функциональным признакам. Так, например, Петросян О.А.[1] выделяет пять основных групп: плоскостную, рельефную, прорезную, объемную и домовую резьбу.

Наиболее целесообразно разделять виды резьбы по геометрическому признаку (характеристикам рельефа) на следующие основные группы: плосковыемчатая (геометрическая и контурная), плоскорельефная, прорезная, рельефная и объемная резьба. Рельефная резьба представляет одну из самых эффектных и выразительных техник декорирования древесины, где элементы рельефа поднимаются над фоном на различную высоту, образуя многоплановые композиции сложного рельефа.

В свою очередь рельефную резьбу можно разделить на два типа: барельефную и горельефную. При барельефной (низкий рельеф) резьбе рельеф поднимается над фоном на высоту, не превышающую

половины толщины всей детали. При горельефе (высокий рельеф) толщина рельефа превышает половину толщины изделия.

Декорирование поверхности изделия при помощи ручной резьбы процесс достаточно трудоёмкий. Работа осуществляется соответствующим определенному виду резьбы ручным инструментом. Основу составляют резцы по дереву для ручной работы, круглые и плоские стамески. Полотна имеют множество профилей, по размерам они варьируются от 2 до 50 мм. Также используют царазики, уголки, клюкарзы, клинки, ножи.

Наиболее сложной считается рельефная ручная резьба. В ней используют твердые породы древесины: березу, бук, дуб, орех. Существует множество методов и приёмов обработки поверхности при рельефной резьбе, включающих следующие этапы:

- нанесение рисунка;
- надрез и подрезка контура орнамента;
- выявление форм рельефа орнамента;
- зачистка фона;
- выявление мелкого рельефа орнамента.

В настоящее время благодаря развитию науки и техники мы имеем возможность для создания резных узоров (по дереву) использовать автоматизированное оборудование, например, станки с числовым программным управлением.

Особенность осуществления техники резьбы по дереву с использованием станков с ЧПУ заключается в том, что значительная часть ручной работы заменяется обработкой по управляющей программе. Технологическая подготовка производства при использовании станков с ЧПУ включает решение ряда новых задач, которых не было при (ручной резьбе). Необходимо подготовить производство на базе станков с ручным управлением.

Создается новый вид технологической документации – управляющая программа, в которой траектория движения инструмента, скорости его перемещения записываются в числовой форме на специальном программоносителе.

Возрастает сложность технологических задач и трудоемкость проектирования технологического процесса:

1. Детальная разработка попереходной технологии. Устанавливается траектория движения инструмента при резании, исходное положение, траектория при отходе, врезании, отводе и т.п.

2. Технолог должен обладать знаниями не только технологии, но и вычислительной техники.

3. Необходима точная увязка траектории автоматического движения инструмента с системой координат станка, исходной точкой и положением заготовки. Это требует пересчёта размеров деталей от какой-то одной точки вне детали, которая называется «нулевой», то есть на станке выбирается точка, от которой считается начало движений инструмента. Обычно нулевую точку совмещают с базовой точкой узла, несущего заготовку, так, чтобы все перемещения отсчитывались в положительных координатах.

Технологическая подготовка производства при использовании станков с ЧПУ включает следующие этапы:

1. Выбор номенклатуры изделий, подлежащих изготовлению на станках с ЧПУ, и анализ технологичности их конструкций.

2. Разработка технологического процесса.

3. Расчёт управляющей программы, который включает:

• графическое построение и расчет траектории движения инструмента по опорным точкам;

• кодирование программы обработки;

• запись на программоносителе.

4. Контроль управляющей программы с помощью специальных средств (координатографов) и внесение необходимых исправлений.

5. Пробная обработка детали на станке с ЧПУ.

6. Контроль обработанной поверхности и внесение исправлений в программу или технологический процесс.

7. Обработка партии деталей [2].

Рассмотрим особенности рельефной резьбы, осуществлённой с помощью станка с числовым программным управлением на примере изготовления икон.

Первые резные иконы появились в Византии и датировались первым веком от Рождества Христова. Из Византии искусство резьбы пришло в Грецию, Сербию, Болгарию. На Русь же резная икона пришла после крещения Руси. Первые иконы были подарками, которые скрепляли дружбу между двумя православными государствами, а широкое распространение данный вид искусства начал в XI веке.

В Византии иконы изготавливали из дерева, перламутра, мягких пород камня, а также отливали из золота, серебра и меди. На Руси же большее распространение получили изделия из дерева. В конце XVI и начале XVII веков наблюдался расцвет русского резного искусства по дереву. Прообразами для будущих икон мастера использовали Священные Писания, а также оригинальные писаные образы. Создавались невероятно красивые образы, которые по достоинству были оценены не только на Руси, но и за её пределами.

И в настоящее время для изготовления резной иконы мастера используют древесину различных пород, обладающих разными свойствами:

- кипарис имеет желтовато-розового цвета древесину, структура плотная и однородная, наиболее устойчивая к воздействию климатических условий;
- липа является простой и легкой в обработке, а иконы имеют особый теплый оттенок;
- берёза хорошо поддается лакированию и покрытию икон поталью, благодаря чему, иконы выглядят живыми;
- древесину бука и дуба выбирают для изготовления крупных изделий, тополь и осина, наоборот, предназначены для создания более мелких деталей;
- древесина фруктовых пород позволяет создать исключительный эффект живого лица.

Неповторимый теплый цвет дерева позволяет художнику создать истинно живые образы и лики[4], что в свою очередь влияет на формирование эстетического восприятия целостного композиционного строя иконы в совокупности с орнаментом оклада. За счет градации света под различным углом зрения меняется восприятие рельефа.

Для изготовления резных икон наиболее актуальным сейчас является использование современных технологий. С помощью фрезерных станков обрабатываются заготовки различной степени сложности; изделия отличаются повышенной точностью изображения как самого образа, так и элементов композиции иконы.

Рассмотрим преимущества использования станков с числовым программным обеспечением на примере авторского проекта «Икона Божией Матери» с резным окладом.

Прежде чем приступить к практической части реализации данного проекта, был проведен предпроектный анализ Казанской иконы Божией Матери, рис.1.

Рис. 1. Прототип Казанской иконы Божией Матери

Нами был выбран наиболее характерный огрудной вариант Образа Казанской Божьей Матери. Композиция является наиболее значимым компонентом изобразительно-выразительного строя иконы. Были выявлены характерные черты пластики и фактуры рельефной иконы, такие как:

- плавность форм и силуэта в композиции, что символизирует мир духовный;
- гармония и согласованность в складках облачениях, изображенных на иконе, что придает единство всей композиции и соподчиненность центральной духовной доминанте;
- особая фактура иконы(она должна быть гладкой).

Для изготовления рельефного изображения на станке с ЧПУ необходима 3D-модель, рис.2, которую можно создать в различных программах: Blander, SketchUp, ArtCam, Zbrush, 3DMax. Икона представляет собой сложное композиционное решение, имеющее множество деталей. Поэтому изготовление иконы является трудоёмким технологическим процессом, который сложно реализовать на обычном оборудовании [3].

Рис. 2. 3D-модель Казанской иконы Божией Матери

После создания 3D-модели необходимо переходить к написанию управляющей программы для станка с использованием программы ArtCAM. Прежде чем приступить к запуску программы для создания резьбы, необходимо закрепить деревянную заготовку на столе с помощью шуруповерта. Далее осуществляется непосредственно процесс резьбы. Использование фрезерного станка во многом упрощает процесс изготовления резной иконы:

- обработка заготовки может выполняться в автономном или полуавтономном режиме;
- выполнение необходимых операций не требует большого количества персонала, а даже может ограничиться одним человеком;
- высокая точность деталей и всего строя передаваемой композиции.

Правильность выполненной работы зависит от управляющих блоков:

- блок CNC регулирует траекторию фрезеровочного инструмента, он способен двигаться по трем осям (x;y;z);
- позиционный блок определяет установку фрезы самостоятельно до начала работы;
- контурный блок определяет траекторию, по которой будет совершаться движение фрезы.

В данной работе был использован станок марки «Beaver»

Для изготовления сложных форм и орнаментов необходимо как можно более точно выбрать фрезу. Нужно подобрать породу древесины, которая наиболее характерно отразит пластику виноградной лозы, выбранной нами в основу орнамента оклада, так как в православии виноградная лоза символизирует Христа, её ветви – апостолов, а виноград – верующих. Для реализации данного проекта была выбрана

древесина бук. Данный материал обладает богатой текстурой, легко обрабатывается, так как относится к породам средней плотности. При выборе древесины были учтены её свойства, мягкость и вязкость. При резьбе бук не колется, при сушке не трескается. Ядра у бука нет, древесина желтовато-красноватая, похожая на красное дерево, и отвечает требованиям данного проекта [7].

Изготовление иконы на станке с ЧПУ происходит в два этапа: черновой и чистовой.

При выборе фрезы, были учтены параметры станка и особенность композиции, размер заготовки. Фреза со сферическим наконечником (двухзаходная) обеспечивает точную и качественную обработку, выбранного нами материала.

В авторском проекте «Икона Божией Матери» с резным окладом черновая обработка иконы состоит в том, чтобы убрать как можно больше материала с поверхности обрабатываемого участка, что позволит в дальнейшем более точно обработать поверхность для чистовой обработки. Исходя из данных характеристик, выбираем кольцевую (однозаходную) фрезу. Широкая канавка не позволяет фрезе скапливать стружку, поэтому обработка плоскости происходит глаже – без накручиваний и сцеплений с остаточным шпоном. Чистовая обработка выполняется конической-сферической двухзаходной фрезой, что позволяет сделать детализацию изображения более качественной. Время обработки на станке с ЧПУ иконы «Казанской Божией Матери» черновая – 60 минут, чистовая – 16 часов.

Готовый оклад покрывается золотым лаком, что придаёт орнаменту еще большую выразительность.

Иконы, изготовленные на станке с числовым программнымуправлением, являются резными декоративными изделиями. Производство данных икон вызывает большой интерес: рельеф имеет идеальную поверхность, чёткие линии и структуру, рис.3.

Рис. 3. Пример резной иконы «Божией Матери» сокладом на станке с ЧПУ

Анализ готового изделия показывает, что в результате обработки на станке значительно возрастают эстетические свойства, которые определяются блеском древесины, гладкостью поверхности, текстурой и цветом. В данном изделии древесина бука не имеет четко выраженной текстуры, что даёт возможность более ярко выразить рельефность. Оценивали фактуру готового изделия на основе визуальных и тактильных ощущений. Визуальную оценку выполняли при естественном рассеянном и искусственном освещении, направленном под углом 45°. Расстояние на котором проводилась визуальная оценка 0.4 и 1,5 м от образца до наблюдателей.

Тактильное восприятие иконы было положительно оценено слепыми и слабовидящими детьми на базе детской школы-интерната 3-4 вида для слепых и слабовидящих детей в городе Липецке. Дети с

помощью пальцев рук, через тактильное восприятие исследовали поверхность иконы. В данном изделии форма рельефа редуцирует некоторые признаки объекта, например, его размеры, поверхностную структуру и отделку, которая не должна отличаться шероховатостью, воздействуя на осязание или скольжением не вызывать чувство неуверенности [8].

Здесь были учтены эргодизайнерские показатели, которые трактуются как человекоориентированные научно-проектные виды деятельности, при которых за счет интеграции средств дизайна и эргономики создаётся эстетически и эргономически полноценный объект [8].В результате формируется целостный образ рельефной иконы.

В процессе изготовления иконы были учтены следующие параметры:

-построение резного изделия строилось в соответствии с эстетическими свойствами выбранной древесины;

- соблюдено единство художественно-выразительной формы и практического назначения изделия;

- учтена художественно-эстетическая и духовная потребности людей, для которых была изготовлена икона.

Заключение

В результате реализации данного проекта можно сделать вывод:

- применение современных технологий значительно сокращает трудоёмкость работы и время изготовления иконы;

- с помощью станка с программным управлением удалось создать изделие, обладающее высокими художественно-эстетическими свойствами;

- использование современных технологий значительно расширяет диапазон возможностей художественного формообразования.

Представлены критерии оценки ручной резьбы и на станке с числовым программным управлением, табл. 1

Таблица 1 – Критерии оценки ручной резьбы и на станке ЧПУ

Виды резьбы	Критерии	
	Достоинства	Недостатки
Ручная резьба	- высокая эксклюзивность изделия; - сохранение традиций ручной художественной резьбы.	- длительное время обработки; - трудоёмкость процесса.
Резьба на станке ЧПУ	- высокая производительность; - высокое качество обработанной поверхности; - минимальные временные затраты.	- затраты на оборудование; - сложность построение 3D-модели; - поточное изготовление изделий.

Применение станков с числовым программным управлением актуально в различных сферах деятельности, таких как дизайн, ювелирное дело, машиностроение, и позволит вывести продукцию на качественно высокий уровень, значительно сократив временные затраты и повысив качество изделий. Но здесь возникает существенный минус: изготовление резных изделий можно поставить на поток, где участие человека минимально, так как сложный технологический процесс выполняет машина. Актуальность ручной резьбы снижается, но не исчезает, так как изделия,изготовленные вручную, уникальны, отражают творческую идею автора и превращают резьбу в искусство.

Литература

1. Руденко Н.О. Дизайн резных художественно-промышленных изделий из древесины при автоматизированном производстве // Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2013.
2. Коган, Б.И. Технологическая подготовка обработки деталей на станках ЧПУ// [Электронный ресурс] Б.И. Коган. – Режим доступа: https://studfiles.net/preview/417492 (01.03.2019).
3. Всё о ЧПУ // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vseochpu.ru/ikony-chpu (01.03.2019).
4. Древесина для доски иконы // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ukoha.ru/article/vdofor/drevecina_dla_docki_ikony.htm (01.03.2019).
5. История резных икон // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.glavikona.ru/articles/istoriya-reznyh-ikon-na-dereve (01.03.2019).
6. Резные иконы: история и особенности создания // [Электронный ресурс]. – Режим доступа :http://reznoe7.ru/reznye-ikony-istoriya-i-osobennosti-sozdaniya.html (01.03.2019).
7. Кукушкина, В.А. Проектирование и изготовление резных икон с окладами на станке ЧПУ // В.А. Кукушкина, Е.А. Кантарюк, Е.А. Киселев, А.А. Русенко. Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов: матер. XI междунар. науч. - практ. конф. вузов России. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2019. С. 512- 516.
8. Кукушкина, В.А. Особенности восприятия рельефно-графических пособий для слепых и слабовидящих людей // В.А. Кукушкина, Т.В. Ананьева, С.О. Щенников. Социально-гуманитарные проблемы образования, моды и дизайна: сборник материалов Всероссийского научного форума молодых исследователей (Социальный инженер – 2015). Часть 2. – М.: ФГБОУ ВПО«МГУДТ», 2015. С. 242 - 245.
9. Афанасьев, А.Ф. Резьба по дереву // Москва: Культура и традиции, 1997. – 260с.
10. Барташевич, А.А. Художественная обработка дерева // Минск: Вышэйшая школа, 2000. – 230 с.
11. Эленвуд, Э. Резьба по дереву // Э. Эленвуд; пер. с англ. О. Смирнова. – Москва: Издательство АСТ : Кладезь, 2018. С. 192.
12. Авсеенко, А.А. Своеобразие русской народной деревянной пластики 19 в. // Сборник трудов НИИХП. – Вып. 4. – Москва: Легкая индустрия, 1967. С. 372.
13. Барадулин, В.А. Художественная обработка дерева // Москва: Легпром-издат, 1986. С. 264.
14.Семенцов, А.Ю. Резьба по дереву // Минск : Современное слово, 2004. С 672.
15. Лебедева, Е.И. Резьба по дереву // Москва :Аделант, 2005. – 200 с.
16. Онианс, Д. Резьба по дереву // Москва: Мир книги, 2004. – 176 с.

© **Кукушкина В.А. -** член Союза Дизайнеров России, доцент ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ЛГТУ»), e-mail: vera.a.kukushkina@mail.ru**, Кантарюк Е.А. -** канд. философ. наук, доцент ФГБОУ ВО «ЛГТУ», e-mail: e.abaeva@mail.ru**, Кантарюк М.В. -** студент 3 курса ФГБОУ ВО «ЛГТУ», e-mail: e.abaeva@mail.ru**, Русенко А.А. -** студент 1 курса ФГБОУ ВО «ЛГТУ», e-mail: rusenko.alena@mail.ru

UDC 745.51

ANALYSIS OF WOOD SCULPTURE IN ARTISTIC PROCESSING OF MATERIALS

V.A. Kukushkina, E.A.Kantaryuk, M.V. Kantaryuk, A.A. Rusenko

This article describes the manual and automated carving. Manual art carving is one of the most ancient types of folk decorative art. Presents the main stages of handmade with embossed carving. The classification of types of woodcarving is given.

Currently, thanks to the development of science and technology, we have the opportunity to create carved patterns (on wood), to use automated equipment, for example, machine tools with numerical control. The example of making a carved icon on a CNC machine is considered. Indicated the relevance of the use of carved relief icons. Identified features and priorities of the use of machine tools with numerical control in

relief art carving, which include a number of advantages, such as accuracy and detailing the performance of the 3D-model, as well as a significant reduction in time and simplification of the complexity of the process.

Key words: *carved icon, CNC machine tool, technology, tool, 3D model.*

References

1. Rudenko N.O. [Design of carved artistic and industrial wood products in automated production] Izhevsk: FGBOU VPO Izhevskiygosudarstvennyytekhnicheskiyuniversitetimeni M.T. Kalashnikova [Izhevsk: Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikova] 2013 (InRuss.)

2. Kogan, B.I. [Technological preparation of parts processing on CNC machines] Elektronnyjresurs [Electronic resource] - Access mode: https://studfiles.net/preview/417492 (03/01/2019) (InRuss.).

3. [All about CNC] Elektronnyjresurs [Electronic resource]. - Access mode: https: //vseochpu.ru/ikony-chpu (03/01/2019) (InRuss.).

4. [Wood for the blackboard icon] Elektronnyjresurs [Electronic resource]. - Access mode: http://www.ukoha.ru/article/vdofor/drevecina_dla_docki_ikony.htm (03/01/2019) (InRuss.).

5. [History of carved icons] Elektronnyjresurs [Electronic resource]. - Access mode: http://www.glavikona.ru/articles/istoriya-reznyh-ikon-na-dereve (03/01/2019) (InRuss.).

6. [Carved icons: history and features of creation] Elektronnyjresurs [Electronic resource]. - Access mode: http://reznoe7.ru/reznye-ikony-istoriya-i-osobennosti-sozdaniya.html (03/01/2019) (InRuss.).

7. Kukushkina, V.A. [Design and manufacture of carved icons with metal cover on a CNC machine] Naukaiobrazovanie v oblastitekhnicheskojestetiki, dizajnaitekhnologiihudozhestvennojobrabotkimaterialov: mater. XI mezhdunar.nauch.-prakt. konf. vuzovRossii. [Science and education in the field of technical aesthetics, design and technology of artistic processing of materials: mater. XI int. scientific-practical conf. universities of Russia] - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, 2019. - pp. 512- 516.(InRuss.)

8. Kukushkina, V.A. [Features of perception of relief-graphic aids for blind and visually impaired people] Social'no-gumanitarnyeproblemyobrazovaniya, modyidizajna: sbornikmaterialovVserossijskogonauchnogoforumamolodyhissledovatelej (Social'nyjinzhener – 2015) [Social and humanitarian problems of education, fashion and design: a collection of materials of the All-Russian Scientific Forum of Young Researchers (Social Engineer - 2015)]. Part 2. - Moscow: MGUDT, 2015. - pp. 242 – 245 (InRuss.).

9. Afanasyev A.F. [A woodcarving] Moskva: Kul'turaitradicii [Moscow: Culture and Traditions] 1997. – 260 p (InRuss.).

10. Bartashevich A.A. [Artistic wood processing] Minsk: Vyshejshayashkola [Minsk: Higher School] 2000. - 230 p (InRuss.).

11. Elenwood, E. [A woodcarving. Translate from English O. Smirnova] Moskva: Izdatel'stvoAST :Kladez' [Moscow: AST Publisher: Kladez] 2018. - 192 p (InRuss.).

12. Avseenko, A.A. [The peculiarity of Russian folk wooden plastic art of the 19th century] Sborniktrudov NIIHP. – Moskva: Legkayaindustriya [Collection of works NIIHP. - Moscow: Light Industry] vol.4, 1967. - 372 p. (InRuss.)

13. Baradulin, V.A. [Artistic wood processing] Moskva: Legprom-izdat [Moscow: Legprom-publish.] 1986. - 264 p. (InRuss.)

14. Sementsov, A.Yu. [A woodcarving] Minsk :Sovremennoeslovo [Minsk: Modern word], 2004. - 672 p. (InRuss.)

15. Lebedeva, E.I. [A woodcarving] / E.I. Lebedeva, E.M. Burgunova. - Moscow: Adelant, 2005. - 200 p. (InRuss.)

16. Onians, D. [A woodcarving] Moskva - Mir Knigi [Moscow: The World of Books] 2004. - 176 p. (InRuss.).

© Kukushkina V.A. - member of the Union of Designers of Russia , ssistant professor Lipetsk State Technical University**, Kantaryuk E.A.-** Cand. Sc.(Philosophy), assistant professor Lipetsk State Technical University**, Kantaryuk M.V. -** 3rd year student Lipetsk State Technical University**, Rusenko A.A. -** 1rd year student Lipetsk State Technical University

УДК 674-419

ОБЛЕГЧЕННЫЕ ДРЕВЕСНЫЕ ПЛИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВНУТРЕННИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ИЗ КАРТОННЫХ ГИЛЬЗ

Е.В. Микрюкова, М.А. Седых

Рациональное использование сырья, проявляющееся в увеличении использования легких материалов, может обеспечить экономное управление природными ресурсами. В статье рассматриваются новые легкие трехслойные панели с заполнением из картонных гильз для применения в деревообрабатывающей промышленности. Представлен обзор результатов исследований и испытаний зарубежных авторов. Современные облегченные материалы должныиметь плотность не более 500 кг/м^3. Такие материалы могут применяться в мебельной промышленности, в качестве заполнения дверей и межкомнатных перегородок, а также для создания дизайнерских конструкций большой толщины. Было предложено техническое решение по созданию нового облегченного древесного плитного материала с внутренним заполнением из картонных гильз. Для исследования нового материала былиизготовлены образцы с различными характеристиками и проведены испытаниядля определенияпредела прочности при изгибе. Максимальное значение предела прочности составило 12,9 МПа для облегченного плитного материала с наружными слоями из соснового шпона. Удельный вес облегченных плитных материалов составил 178-395 кг/м^3.

Ключевые слова: *облегченные плиты, древесные материалы,картонные гильзы, предел прочности при изгибе, удельный вес*

Введение

Древесина является возобновляемым экологически чистым сырьем, используемым для производства высококачественной мебели, товаров повседневного спроса, применяется в строительстве. Ее универсальное использование во многих отраслях деревообрабатывающей промышленности оказывает значительное влияние на интенсивную эксплуатацию лесных ресурсов. Древесина широко используются благодаря эффективной способности переносить осевые, изгибающие и скручивающие нагрузки.

В настоящее время легкие сотовые панели могут заменить традиционные деревянные материалы. Рациональное использование сырья, проявляющееся в увеличении использования легких материалов, может обеспечить экономное управление природными ресурсами и сокращение выбросов парниковых газов, которые влияют на изменение климата. Еще одно важно обоснование использования более легких материалов связано с попытками снизить производственные затраты с целью повышения рентабельности. Важными преимуществами легких слоистых панелей по сравнению с древесиной всегда будут более низкая цена, меньший вес и соответственно простая транспортировка к месту назначения. Что особенно интересно, так это соотношение высокого качество панелей к плотности, которое может быть достигнуто путем правильного выбора геометрии даже при использовании материалов среднего качества. Облегченные панели формируют путем приклеивания прочных и жестких лицевых листов к толстому, относительно слабому, но легкому материалу сердцевины в таких пропорциях, чтобы оптимальная жесткость и прочность могли быть достигнуты при минимальном весе. Малый вес является их главным преимуществом, особенно в производстве легкой мебели. Плотность легких сотовых панелей не должна превышать500 кг/м^3 [1].

Авторами Smardzewski Jerzy и Prekrat Silvana были изготовлены и испытаны трехслойные панели, наружные слои которой изготовлены из HDF (HighDensityFiberboard) древесноволокнистой плиты высокой прочности толщиной 2,5мм, а внутренний слой выполненииз переработанной бумаги толщиной 0,15 мм в виде сот различной формы. Были проведены испытания на изгиб, кручение, определен модуль упругости при изгибе, модуль упругости при сдвиге.По сравнению с древесностружечной плитой модуль упругости для нового материалав зависимости от конструкции на 24,3%÷54,9% ниже. Максимальное значение модуля упругости при сдвиге составило 523 МПа, а у древесностружечных плит это значение в 2 раза больше[2].

В работе NabihahSallih, PeterLescher, DebesBhattacharyуапредставлены исследованиясэндвич-панелей сзаполнением в виде сот из натурального волокна кенафа и полипропиленаи определены их свойства. Цель испытаний состояла в том, чтобы определить жесткость и прочность материалов заполнения при сжимающих нагрузках в зависимости отношения толщины к толщине стенок ячейки и

отношения высоты заполнения к размеру ячейки.В результате испытаний величина прочности на сжатие пустотелых сотсоставила 6,1 МПа[3].

Польскими учеными JerzySmardzewski, AdamGajęckiиMarlenaWojnowska проводилось исследование по определению влияния ориентации прямоугольных и гексагональных ячеек бумажного сотового заполнения на механические свойства трехслойных мебельных панелей. Целью их экспериментов было также установить константы относительной плотности и эластичности проектируемых конструкций. Результатами испытания были следующие значения: модуль упругости при сдвиге шестиугольной ячейки был почти в 15 раз больше, чем у прямоугольной ячейки; прочность при изгибе с шестиугольными ячейками равнялась 68,40Н, а с прямоугольными ячейками эти значения составили 66,25Н [4].

В работе GibsonandAshby многослойные конструкционные композиты предлагается изготавливать с использованием ячеистой структуры как из натуральных, так и из искусственных материалов, внутреннее заполнение которых сделано главным образом из древесного волокна, придающего композиту минимальную плотность и высокие механические свойства. Бумажное сотовое заполнение изготавливается из линейных ребер, которые соединяются по длине, а затем растягиваются, чтобы сформировать шестиугольник жесткой формы, имеющий угол ребра около 0 и 60° от линейного направления. Таким образом, эффективное выравнивание шестигранных ребер обычно составляет 120° друг от друга. Выравнивание ребер улучшает жесткость во всех плоскостных направлениях, но эффективная жесткость в основном направлении ребер немного выше из-за площади двойного сцепления исходных линейных ребер [5].

В научной статье В.Г.Савенко,А.А. Лукаша, К.К. Шкиля изложен материал, конструкция которо го представляет склеенные между собой слои лущеного шпона. Листы лущеного шпона размещаются под углом 90°, образуя верхний слой, следующий за ним, подслой укладывается с интервалами в виде ячеек, так же укладываются остальные слои. На данную конструкцию ячеистой фанерной плиты получен патент РФ №225285. Плотность такой плиты составляет 498±5,2 кг/м^3.Были проведены испытания для определения предела прочности при статическом изгибе и удельного сопротивления выдергиванию шурупов. В результате предел прочности составил 37,7±1,9 МПа, сопротивление выдергиванию шурупов из пласти составило 96,4±3,4 Н/мм^2, а из кромки 74,3±4,94 Н/мм^2 [6].

В статье Е.В. Наливко, А.В. Спиглазова, С.В. Шетько приведены результаты исследования свойств облегченных щитов с бумажным сотовым заполнителем. Проведенные испытания были максимально приближены к реальному нагружению в изделии.Полученные фактические значения напряжений при предельных нагрузках значительно ниже, чем у традиционных материалов (сосна, древесностружечная плита, фанера и др.). Так же, при увеличении высоты сотового заполнителя его удельная прочность значительно уменьшается, однако при этом в большей степени происходит увеличение жесткости щитов [7].

Известен такой материал как строительно-отделочная панель, внутренний наполнитель которой из бамбука, выполнен в виде сотовой ячеистой конструкции. В данном материале наполнитель состоит из одного и более слоев, между слоями внутреннего наполнителя размещены слои листового материала в виде панелей из бамбука, фанеры, картона или бумаги. А между слоями листового материала и сотовыми ячейками в виде цилиндров размещена армирующая сетка и нанесены слои адгезива, связывающие листовой материл с цилиндрами из бамбука, картона или пластика. Армирующая сетка может быть выполнена из стекловолокна, пластика или металла [8]. Недостатком данного материала является сложность обработки и утяжеление конструкции из-за наличия армирующей сетки.

Из уровня техники известна строительная панель (конструкционный плитный материал), содержащий наружные слои из листового материала, выполненного, в частности, их картона или древесноволокнистой плиты и внутренний слой из протяженных трубчатых элементов, выполненных из пластика или бумаги или другого подобного материала, расположенных параллельно друг другу и наружным слоям. Трубчатые элементы и наружные слои соединены с помощью адгезива [9].

Использование сотовых панелей с бумажным сотовым заполнением, изготовленных из шестиугольных ячеек, довольно широко распространено. В вышеупомянутых исследованиях отмечено, что жесткость и прочность легких сотовых панелей существенно зависит от бумаги, а также от формы и размеров ячеек, от этого у данных материалов есть ряд недостатков, такие как: невысокая прочность, сложность обработки,также высокая стоимость.В настоящее время такие сотовые панели или

тамбурат широко используются в конструкциях мебели, когда щитовым элементам необходимо придать визуально массивную форму при этом ее не утяжеляя.

Альтернативой сотового картона могут служить картонные гильзы, которые также изготавливаются из бумаги. Картонные гильзы используют для намотки рулонных материалов.Картонные гильзы представляют собой скрученный цилиндр картона, пропитанный клеем. Скручивание картона осуществляется методом спирального или прямого наматывания (навивки) слоев различной плотности на гильзонавивном оборудовании. Сырьем для производства картона служит целлюлоза, а также макулатурное сырье. Такой материал является экологически безопасным [10].

Нами было предложено техническое решение по созданиюоблегченныхдревесных плит, в которых в качестве внутреннего слоя используются части картонных гильз цилиндрической формы.На данное техническое решение был получен патент на полезную модель. Облегченный конструкционный плитный материал содержит наружные слои из листового материала, преимущественно древесного, и соединенный с ними путем склеивания внутренний слой, в виде упорядоченно расположенных частей картонных гильз цилиндрической формы. Гильзы ориентированы перпендикулярно по отношению к наружнымслоям, могут располагаться вплотную друг к другу либо на расстоянии [11]. Такой материал, возможно использовать в мебельной промышленности,для производства строительно-столярных изделий, в качестве межкомнатных перегородок.

Цели исследования – изучение физико-механических свойств нового материала,изучение зависимости этих свойств от характеристик наружного слоя и размера внутреннего заполнения из картонных гильз.

Методы и материалы

Для исследования были изготовлены образцы облегченных древесных плит с использованием в качестве наружных слоев древесноволокнистых плит, березовой фанеры, древесины сосны и березы (рис.1).

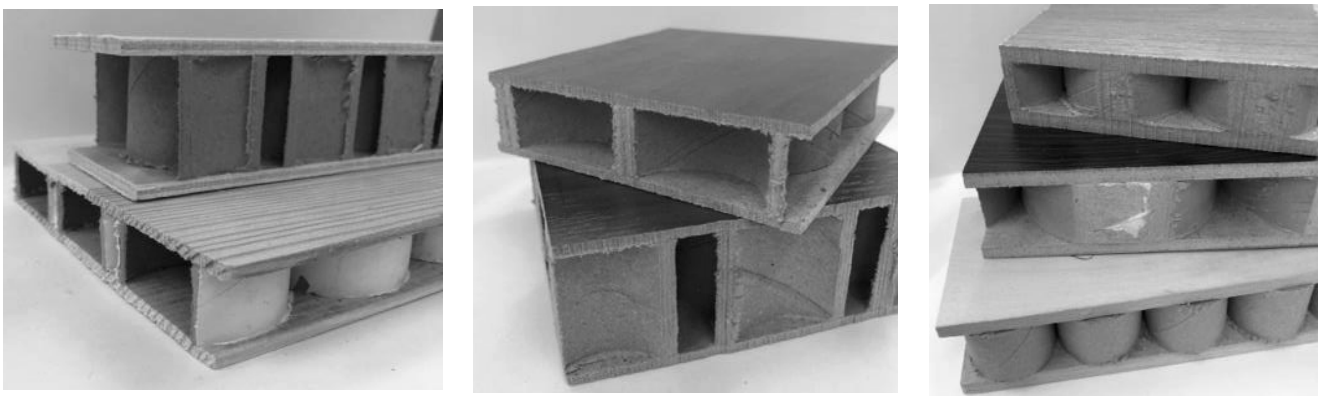


Рис.1. Облегченные древесные плитные материалы с внутренним заполнением из картонных гильз

Для изготовления облегченных плитных материалов в качестве наружных слоев использовались плиты MDF толщиной 3 и 6 мм, березовая фанера марки ФК толщиной 4 мм. В качестве альтернативного материала для наружных слоев применялись отходы шпонострогального производства сосновый отструготолщиной 3,3 мм и березовыйотструг толщиной 6мм. Диаметр картонных гильз во внутреннем слое составлял30, 33,48, 56, 66 и 80 мм, а толщина картонных гильз составляла 2±0,5 мм. Были изготовлены плитные материалы толщиной от 25 до 43 мм.

Технологический процесс изготовления облегченных древесных плитных материалов состоит из нескольких операций. В первую очередь осуществляется раскрой древесных плитных материалов и картонных гильз на заготовки. Последующей операцией является нанесение клея и сборка пакета. Далее полученный материал прессуется, происходит технологическая выдержка в стопе в течение 24 ч. Завершающей операцией является форматный раскрой облегченного древесного плитного материала.

Для определения физико-механических свойств облегченных древесных материалов были проведены испытания на определение предела прочности при изгибе. Целью данного испытания было определить влияние наружного слоя на прочность плиты. Испытание проводилось в соответствии с ГОСТ 10635-88 «Плиты древесностружечные. Методы определения предела прочности и модуля

упругости при изгибе». Из полученных облегченных плит были изготовлены прямоугольные образцы, шириной 50 мм и длиной 300 мм. Длина образцов совпадала с направлением волокон наружного слоя для изотропных материалов. Испытание проводилось на разрывной машине Р-10. Образцы укладывались на опоры, и производилось нагружение с постоянной скоростью до разрушения образца. В момент разрушения фиксировалась максимальная нагрузка. Предел прочности при изгибе определялся по формуле (ГОСТ 10635-88):

$$\sigma_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^2}, \text{ МПа},$$

где P – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между центрами опор; b, h – соответственно ширина и толщина образца, мм.

Кроме предела прочности при изгибе определялся удельный вес облегченных плитных материалов отношением массы образцов к их объему. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний облегченных плитных материалов с внутренним заполнением из картонных гильз

Материал наружных слоев	Толщина наружных слоев, мм	Диаметр картонных гильз, *D*, мм	Толщина плиты, *h*, мм	Предел прочности при изгибе, $\sigma_{изг}$, МПа	Удельный вес, ρ, кг/м^3
MDF	3	30	25	11,82	304,1
		48		4,84	317,2
		56		7,81	303,4
		66		5,27	308,0
MDF	3	30	40	5,11	236,4
		48		4,48	248,4
		66		2,2	207,8
MDF	6	30	40	2,79	299,5
		48	31	10,24	395,1
Фанера	4	33	28	10,2	300,8
		66		8,55	278,5
		80	43	3,77	178,1
		66		4,77	206,9
Древесина сосны	3,3	33	25	12,91	249,3
		41		11,79	225,2
Древесина березы	6	33	42	6,44	259,2

В ходе проведенного исследования было обнаружено, что существует влияние материала наружного слоя и его характеристик на прочность при изгибе облегченного плитного материала. Наиболее прочными при изгибе оказались материалы на основе древесины сосны.При этом их удельный вес ниже, чем у материалов с наружными слоями из композиционных древесных материалов.

Плиты с наружными слоями из более плотных и толстых материалов имеют больший удельный вес. Также удельный вес зависит от толщины самой плиты. Чем больше толщина плиты при неизменных толщине и материале наружных слоев, тем меньше ее удельный вес. Это связано с увеличением объема полостей, как между картонными гильзами, так и внутри их.

В результате исследований была выявлена закономерность влияниязмера диаметра картонных гильз на прочность облегченных плитных материалов. На рис. 2 представлены результаты испытаний на изгиб облегченных плитных материалов с наружными слоями из MDF толщиной 3 мм.

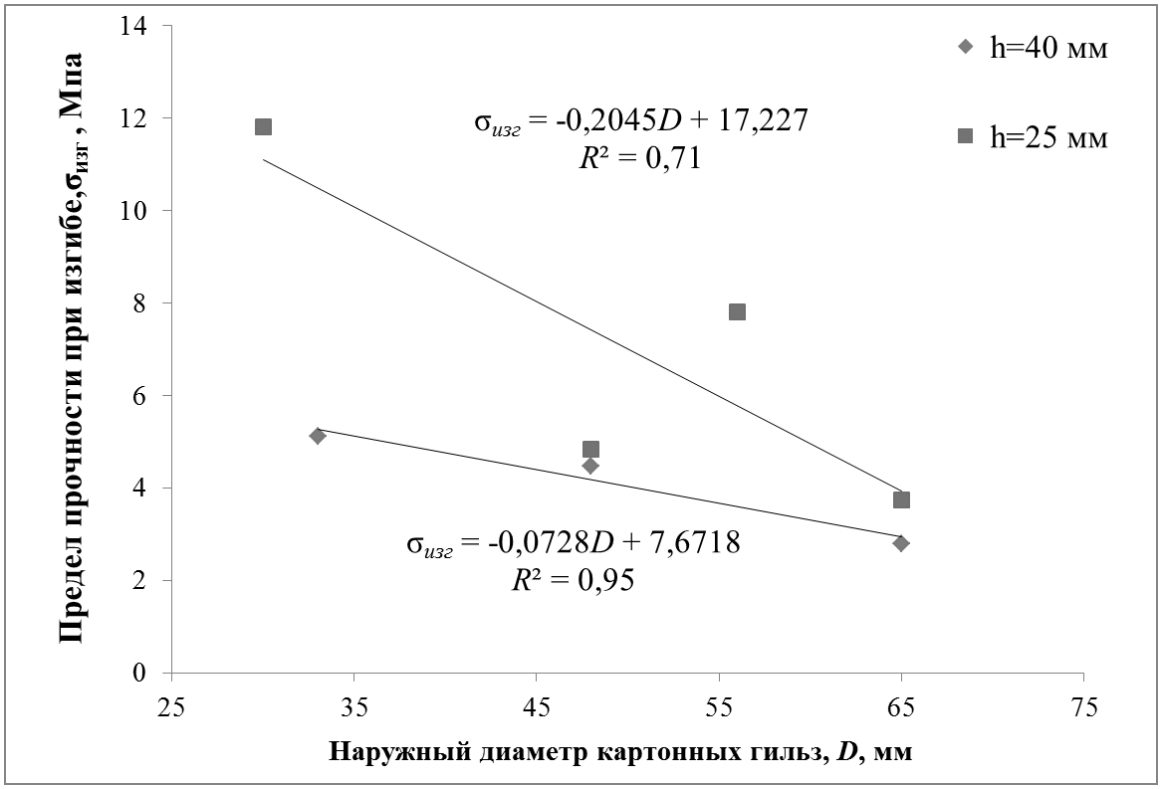


Рис. 2. Зависимости предела прочности при изгибе облегченных плитных материалов толщиной 25 и 40мм с наружными слоями из MDF толщиной 3 мм

На основании экспериментальных данных были построены линейные регрессионные модели, описывающие зависимости предела прочности при изгибе от диаметра картонных гильз для плитных материалов толщиной 25 и 40 мм с наружными слоями из MDFтолщиной 3 мм. Коэффициенты детерминации имеют значения 0,95 для толщины плитных материалов 25 мм и 0,71 для толщины 40 мм. Полученные значения коэффициентов свидетельствуют о высокой степени связи между пределом прочности на изгиб и диаметром картонных гильз, используемых для внутреннего заполнения облегченных плитных материалов. Для того, чтобы построить регрессионные модели для других типоразмеров облегченных плитных материалов, необходимо продолжить исследования.

С увеличением диаметра картонных гильз, используемых в качестве внутреннего слоя облегченных плитных материалов, уменьшается предел прочности материала при изгибе. Это связано с уменьшением числа ребер жесткости, которыми непосредственно и являются части картонных гильз. Чем меньше диаметр картонных гильз, тем большее их количество содержится в единице площади. Также предел прочности при изгибе уменьшается с увеличением толщины плитного материала. Чем больше толщина материала, тем больше высота картонных гильз, образуемых внутренний слой.

Заключение

Предложена конструкция облегченных плитных материалов с внутренним заполнением из картонных гильз. Удельный вес таких материалов в данном исследовании колеблется в пределах 178-395 кг/м^3 и зависит в большей степени от материала наружных слоев и толщины плиты, а в меньшей степени от размеров картонных гильз, образующих внутренний слой.

Прочность на изгиб таких материалов зависит как от материала и толщины наружных слоев, так и от геометрических размеров внутреннего слоя, образованного картонными гильзами. С увеличением диаметра картонных гильз происходит уменьшение прочности на изгиб облегченных плитных материалов, причем, чем больше толщина материала, тем ниже показатель прочности при изгибе. Так же прочностные характеристики плитных материалов зависит от материала наружных слоев. Наибольшие показатели прочности при прочих равных условиях имеют плитные материалы с наружными слоями из массивной древесины.

Предлагаемые облегченные плитные материалы могут быть использованы при реализации конструкторских и дизайнерских идей при проектировании мебели. Они позволяют создать иллюзию массивности при достаточно низком удельном весе и достаточно высокой прочности. Кроме того, такие материалы могут быть востребованы в конструкциях щитовых дверей, как альтернатива сотовому заполнению.

Литература

1. Скуратов Н.В. Инновационные легкие панели из древесины // Лесной вестник. 2016. №3. С. 60-65.

2. Smardzewski J., Prekrat S. Auxetic structures in layered furniture panels //Conference: IMPLEMENTATION OF WOOD SCIENCE IN WOODWORKING SECTOR, At Zagreb, 6th – 7th December 2018, University of Zagreb - Faculty of Forestry Wood Science and Technology Department. Pp. 163-171.

3. Nabihah S., Peter L., Debes B. Flatwise Compressive Properties of Kenaf/Polypropylene HoneycombCore//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. -Volume 370. 2018. 10 p.

4. Smardzewski J., Gajęcki A., Wojnowska M. Investigation of Elastic Properties of Paper Honeycomb Panels with Rectangular Cells // BioResources. – 14(1). 2019. Pp. 1435-1451.

5. Gibson L. J., Ashby M. F. Cellular Solids: Structural and Properties //Pergamon Press. Oxford. 1988. Pp. 15-51.

6. Савенко В.Г., Лукаш А.А., Шкиль К.К. Ячеистая фанерная плита // Деревообрабатывающая промышленность. 2006. №6. С.14-15.

7. Наливко Е.В., Спиглазов А.В. Шетько С.В. Свойства облегченных щитов с бумажным сотовым заполнителем// Деревообрабатывающая промышленность. 2009. №6 С.17-21.

8. Строительно-отделочная панель из натурального бамбука: пат. 103548 Рос. Федерация: МПК E04C 2/00 / Малицкий А.В.; заявитель и патентообладатель Малицкий А.В. № 2010152727/03; заявл. 23.12.2010; опубл. 20.04.2011, Бюл. № 11.

9. Tubular core partition panel: patented 3228822 United Stated Patent Office. Maurice Norman, Crystal Lake. III., assignor to United States Gypsum Company, Chicago, III., a corporation of linois. Filed Apr. 24,1961. Patented Jan.11, 1966.

10.Картонные гильзы (шпули, втулки) – что собой представляют, сфера использования [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.makulaturin.ru(дата обращения 29.04.2019).

11.Конструкционный плитный материал: пат. 184792 Рос.Федерация: МПК E04C 2/32, B32B 7/12, B32B 21/06, B32B 29/08 / Микрюкова Е.В., Седых М.А., Якманов М.Л.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Поволжский государственный технологический университет". - №2018132120; заявл. 07.09.2018; опубл. 09.11.2018, Бюл. № 31.

© **Микрюкова Е.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств Поволжского государственного технологического университета, e-mail: mikryukovaev@volgatech.net; **Седых М.А.** – магистрант кафедры деревообрабатывающих производств Поволжского государственного технологического университета, e-mail: sedykh.rabota@yandex.ru

UDC 674-419

LIGHTWEIGHT WOOD BOARD MATERIALS WITH INTERNAL FILLING OF CARDBOARD CARTRIDGES

E.V. Mikryukova, M.A. Sedykh

Rational use of raw materials, manifested in the increased use of lightweight materials, can ensure the economical management of natural resources. The article discusses the new lightweight three-layer panels with a filling of cardboard sleeves for use in the woodworking industry. A review of the results of research and testing of foreign authors is presented. Modern lightweight materials should have a density of not more than 500 kg / m3. Such materials can be used in the furniture industry, as a filling of doors and interior partitions, as well as for the creation of designer structures of great thickness. A technical solution was proposed to create a new lightweight wood-based panel material with an internal filling of cardboard sleeves. For the study of the new material, samples were made with different characteristics and tests were

conducted to determine the flexural strength. The maximum value of the tensile strength was 12.9 MPa for a lightweight board material with outer layers of pine veneer. The share of light-weight plate materials was 178-395 kg / m^3.

Key words: *lightweight boards, wood materials, cardboard sleeves, bending strength, specific gravity.*

References

1. Skuratov N.V. [Innovative lightweight wood panels] Lesnojvestnik [Forest Herald]. 2016. №3.Pp. 60-65. (InRuss.)

2. Smardzewski J., Prekrat S. Auxetic structures in layered furniture panels //Conference: IMPLEMENTATION OF WOOD SCIENCE IN WOODWORKING SECTOR, At Zagreb, 6th – 7th December 2018, University of Zagreb - Faculty of Forestry Wood Science and Technology Department. Pp. 163-171.

3. Nabihah S., Peter L., Debes B. [Flatwise Compressive Properties of Kenaf/Polypropylene HoneycombCore] OP Conference Series: Materials Science and Engineering.Volume 370. 2018. 10 p.

4. Smardzewski J., Gajęcki A., Wojnowska M. [Investigation of Elastic Properties of Paper Honeycomb Panels with Rectangular Cells] BioResources. 14(1). 2019. Pp. 1435-1451.

5. Gibson L. J., Ashby M. F. [Cellular Solids: Structural and Properties] Pergamon Press.Oxford.1988. Pp. 15-51.

6. Savenko V.G., Lukash A.A., SHkil' K.K. [Cellular plywood plate]Derevoobrabaty-vayushchayapromyshlennost', nauchno-tekhnicheskij, ekonomicheskij i proizvodstvennyjzhurnal [Wood industry, scientific, technical, economic and production magazine]. 2006. № 6. Pp.14-15. (InRuss.)

7. NalivkoE.V., Spiglazov A.V. SHet'ko S.V. [Properties of lightweight paper honeycomb shields]Derevoobrabaty-vayushchayapromyshlennost'[Wood industry].2009. № 6. Pp.17-21. (InRuss.)

8. [Natural bamboo construction and finishing panel]: pat. 103548 Ros. Federaciya [RU 103548]: MPK E04C 2/00 / Malickij A.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Malickij A.V. № 2010152727/03; zayavl. 23.12.2010; opubl. 20.04.2011, Byul. № 11. (InRuss.)

9. Tubular core partition panel: patented 3228822 United Stated Patent Office. Maurice Norman, Crystal Lake. III., assignor to United States Gypsum Company, Chicago, III., a corporation of linois. Filed Apr. 24,1961. Patented Jan.11, 1966.

10.Cardboard sleeves (spools, sleeves) - what are the scope of use [Elektronnyjresurs]. Rezhimdostupa: http://www.makulaturin.ru (data obrashcheniya 29.04.2019).(InRuss.)

11.[Structural slab material]: pat. 184792. Ros. Federaciya [RU184792]: MPK E04C 2/32, B32B 7/12, B32B 21/06, B32B 29/08 / Mikryukova E.V., Sedyh M.A., YAkmanov M.L.; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazova-tel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Povolzhskij gosudarstvennyj tekhnolo-gicheskij universitet". №2018132120; zayavl. 07.09.2018; opubl. 09.11.2018, Byul. № 31. (InRuss.)

© **Mikryukova E.V.** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Woodworking Productions, Volga State University of Technology, e-mail: mikryukovaev@volgatech.net; **Sedykh M.A.** - masters degrees of the Department of Woodworking Productions, Volga State University of Technology, e-mail: sedykh.rabota@yandex.ru

УДК 674.04

МНОГОФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ОСИНЫ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ

Е.Ю. Разумов, Р.Р. Сафин, П.М. Мазуркин, А.В. Сафина, Р.Р. Хасаншина

Приведены результаты экспериментов и статистического моделирования изменения плотности древесины по сечению образцов из осинового пиломатериала в процессе вакуумно-контактной

термической обработки. Определение послойной плотности образца выполнялось на лабораторном рентгеновском профилометре DPX300 от нуля до пяти часов в процессе термообработки. Методом идентификации получено четырехфакторное уравнение с максимальной относительной погрешностью 1.18%. Установлено, что плотности образцов в динамике при температурах обработки 180, 200, 220 и 240 °С носят сложный характер, что впоследствии может быть использовано для управления процессом и обеспечения равномерности термической обработки по сечению материала.

***Ключевые слова**: термомодифицирование, древесина, плотность, коэффициент корреляции.*

Введение

В настоящее время в России и за рубежом активно развиваются процессы термической обработки древесины. Они вызывают интерес у многих исследователей, так как данная тематика имеет огромный спектр развития и хорошую перспективу углубленного изучения и использования в будущем. Термически обработанная древесина превосходит необработанную по множеству показателей: отличается повышенными эксплуатационные характеристиками (например, такими как биостойкость, размеро- и формо устойчивость) при достойном внешнем виде, изменяя цвет во всём объёме обрабатываемых заготовок до тёмных аристократических оттенок.

В связи с этим, термическая обработка постепенно внедряется во многие деревоперерабатывающие технологии: от получения массивной термомодифицированной древесины до композиционных материалов и биотоплив на основе термически обработанного древесного сырья. С экологической точки зрения превосходство данного вида модификации растительного сырья заключается в том, что при термической обработке не используются химические составы, что является огромным плюсом как для производителей, так и для потребителей данной продукции [1-4]. К негативному моменту процесса термической обработки следует отнести его достаточно высокую стоимость, обусловленную значительными энергетическими затратами.

При этом процесс термической обработки относительно несложен. Основными показателями качества массивной термодревесины являются отсутствие трещин и равномерность термической обработки материала [5-7]. Поэтому основные требования предъявляются к качественной предварительной сушке пиломатериалов и темпу повышения температуры в процессе термической обработки. И если процесс сушки основных отечественных пород древесины достаточно хорошо изучен, технологически и экономически отработан, то стадия повышения температуры материала в процессе термомодифицирования имеет существенные резервы для оптимизации как с позиции снижения энергозатрат, так и с точки зрения повышения качества обработки.

В связи с этим, в работе были поставлены следующие задачи:

- исследовать изменение плотности древесины по сечению образцов из осинового пиломатериала в процессе термомодифицирования;
- провести многофакторное моделирование процесса методом идентификации для последующего управления процессом и обеспечения равномерности термической обработки.

Материалы и методы

Для изучения процесса термомодифицирования были подготовлены деревянные бруски без пороков древесины сечением 20х50 мм и длиной 250 мм, взятые из одной осиновой доски радиальной распиловки, что обеспечило одинаковую структуру годичных колец по тангенциальным сечениям образца. Для опытов были приняты всего 12 образцов, по четыре толщиной образца 20, 12 и 4 мм.

Подготовленные бруски были подвергнуты вакуумной сушке при температуре 60 ºС в течении 5 суток, что обеспечило равномерное распределение влажности по сечению образцов в интервале 5-6%.

Перед началом эксперимента все образцы подверглись взвешиванию для определения средней плотности для всей партии. До дальнейших экспериментов были допущены образцы с отклонением их плотности от среднего значения по всей партии не более 1%.

Удовлетворяющие всем требованиям образцы были разбиты на четыре группы для проведения соответственно четырех серий экспериментов по термической обработке при температурах 180, 200, 220 и 240 ºС.

Установка (рис. 1) для термической обработки древесины содержит камеру 1, сообщенную с линией вакуумирования, состоящей из вакуумного насоса 2 и конденсатора 3 [8]. Подвод тепловой

энергии к обрабатываемому пиломатериалу 4 выполняется контактным способом с помощью теплоподводящих поверхностей 5 и 6. Они представляют собой перфорированные металлические пластины, обогреваемые с помощью нитей накаливания 7. Пластины теплоизолированы со стороны, противоположной обрабатываемому материалу, пористым влаго- и воздухопроницаемым материалом 8.

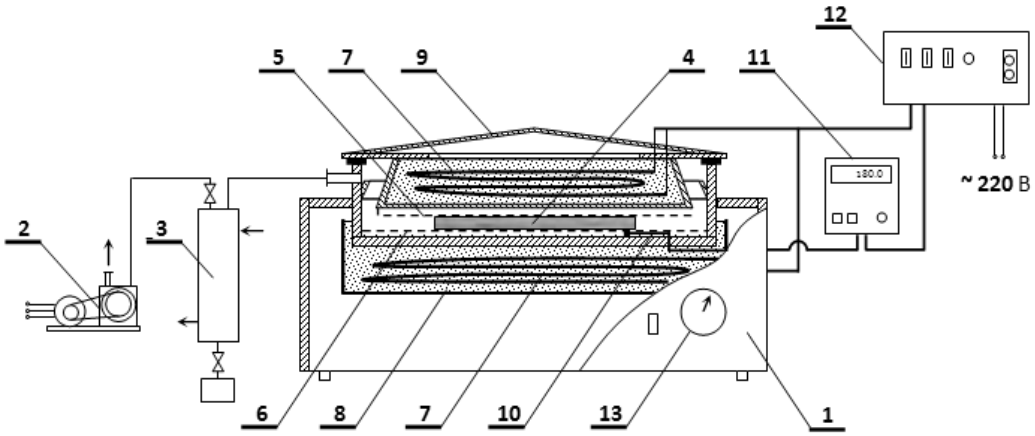


Рис. 1. Экспериментальная установка вакуумно-контактной термической обработки древесины

В каждой серии экспериментов в предварительно разогретую до требуемой температуры камеру единовременно загружалось по четыре образца, которые далее подвергались термомодифицированию в одинаковых условиях. При этом начальная температура образцов принималась 20 ^{0}C при их комнатном хранении. По истечении 2, 3, 4 и 5 часов из камеры вынималось по одному образцу, которые тут же помещались в эксикатор для охлаждения без набора влажности. В каждой серии проводилось не менее трех экспериментов с толщиной образца 20, 12 и 4 мм.

Обработанные образцы помещались в лабораторный рентгеновский профилометр DPX300, который предназначен для определения значений плотности плитных образцов (рис. 2).

Данный прибор сочетает в себе современную бесконтактную технологию и безопасность проведения измерений. Его основной характеристикой является высокая чувствительность, поэтому достигается малая погрешность измерений. До проведения измерений готовые образцы подрезались по длине с обоих концов до размера 250 (50) мм, что исключает торцевые эффекты.

а) **б)**

Рис. 2. Измерение плотности образцов: а - внешний вид профилометра DPX300, б - образец в приборе

Результаты и моделирование

В результате исследования для каждого образца на профилометре был получен его профиль плотности в виде графика, представленного на рисунке 3.

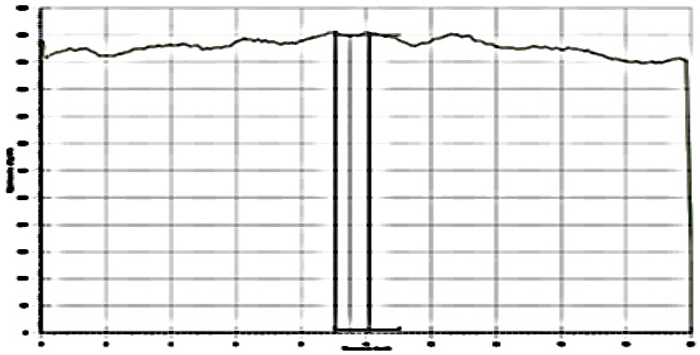


Рис. 3. Профиль плотности исследуемых образцов на профилометре DPX300

Далее значения, полученные внутри каждой серии экспериментов, были объединены в таблице 1 для многофакторного моделирования методом идентификации [9-11].

Такие факторы как, глубина слоя, толщина образца и плотность древесины относятся непосредственно к обрабатываемому материалу. Температура обработки относится к окружающей заготовку среде, которая в начальный момент времени соответствует температуре воздуха в лаборатории 20 ^{0}C. В дальнейших опытах измеряется температура каждом слое образца древесины. Такой фактор как время обработки относится к образцу и камере, поэтому этот параметр является независимым от объекта исследования.

Таблица 1 – Исходные данные для многофакторного моделирования процесса изменения плотности исследуемых образцов осины в процессе термомодифицирования

№ п/п	Глубина i-го слоя x, мм	Время обработки τ, час	Температура обработки t, °C	Толщина образца s, мм	Плотность древесины ρ, кг/м^3	Абсолют. погрешн. ε, кг/м^3	Относит. погрешн. Δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	20	20	557	1.96797	0.35
2	2	0	20	20	557	1.15077	0.21
3	4	0	20	20	557	-0.0498362	-0.01
4	6	0	20	20	557	-1.33733	-0.24
5	8	0	20	20	557	-2.83373	-0.51
6	10	0	20	20	557	-4.55823	-0.82
7	1	2	180	20	538	0.054632	0.01
8	2	2	180	20	540	1.23733	0.23
9	4	2	180	20	543	3.03673	0.56
10	6	2	180	20	547	5.74923	1.05
11	8	2	180	20	549	6.25283	1.14
12	10	2	180	20	551	6.52833	1.18
…	…	…	…	…	…	…	…
200	2	2	220	4	518	-2.92719	-0.57
201	1	3	220	4	516	-2.19333	-0.43
202	2	3	220	4	517	-2.01053	-0.39
203	1	0	20	4	557	1.40227	0.25
204	2	0	20	4	557	0.585064	0.11
205	1	2	240	4	493	-4.63393	-0.94
206	2	2	240	4	495	-3.45113	-0.70
207	1	3	240	4	492	-3.71723	-0.76
208	2	3	240	4	493	-3.53443	-0.72

После закладки четырех образцов в камеру, происходит нагрев образца до требуемой температуры. После взятия обработанного образца для измерения текущей плотности древесины камера также несколько охлаждается.

На рисунке 4 приведен график изменения температуры камеры до 180 ^{0}C с течением времени от 0 до 5 часов.

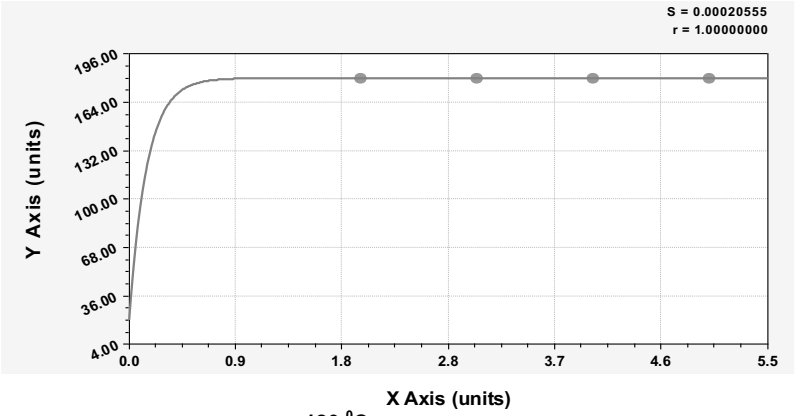


Рис. 4. График динамики температуры камеры до 180 ^{0}C

В правом верхнем углу графика от программной среды CurveExpert-1.40 расположены: *s* – дисперсия; *r* – коэффициент корреляции, характеризующий уровни адекватности закономерностей: выше 0.7 – сильная связь между факторами; 0.5-0.7 – средняя связь; 0.3-0.5 – слабая связь [11].

Уравнения достижения заданных температур в камере определяются законом распределения Вейбулла в виде:

$$t_{180} = 180 - 160\exp(-6.60972\tau); \quad (1)$$

$$t_{200} = 200 - 180\exp(-6.98016\tau); \quad (2)$$

$$t_{220} = 220 - 200\exp(-6.68531\tau); \quad (3)$$

$$t_{240} = 240 - 220\exp(-7.10983\tau). \quad (4)$$

Из-за малого количества точек коэффициент корреляции формул на рис. 4 равен 1.

При моделировании процесса необходимо идентифицировать однофакторные закономерности. Расположим факторы по росту их значимости согласно увеличению коэффициента корреляции.

Однофакторная функция влияния толщины образца на плотность с коэффициентом корреляции 0.0088 определяется формулой (рис.5):

$$\rho(s) = 686.52127\exp(-0.25658s^{0.0025686}). \quad (5)$$

При нулевой толщине получаем плотность, равную 686.5, что намного больше 557 кг/м^3.

Можно отметить, что при среднестатистических расчетах с увеличением толщины образца плотность осины уменьшается по экспоненциальному закону.

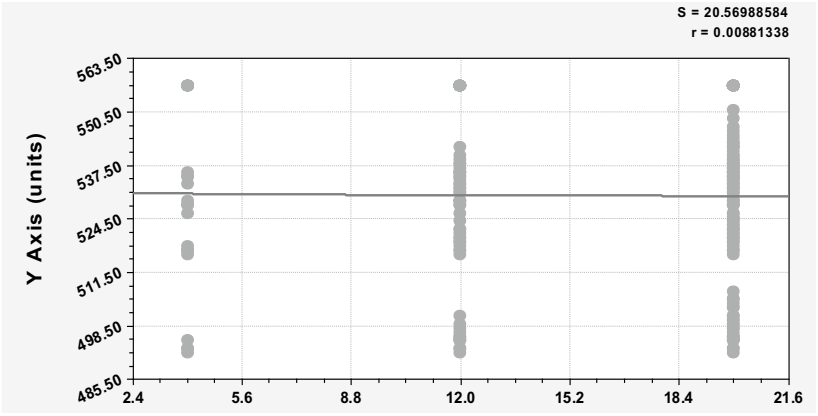


Рис. 5. Влияние толщины на плотность образцов осины

Данные графика 6 свидетельствуют о том, что при коэффициенте корреляции 0.0959 (менее 0.3) становится очевидным влияние глубины слоя на плотность исследуемых образцов по закону экспоненциального роста:

$$\rho(x) = 527.80274 \exp(0.00079932 x^{1.18730}). \quad (6)$$

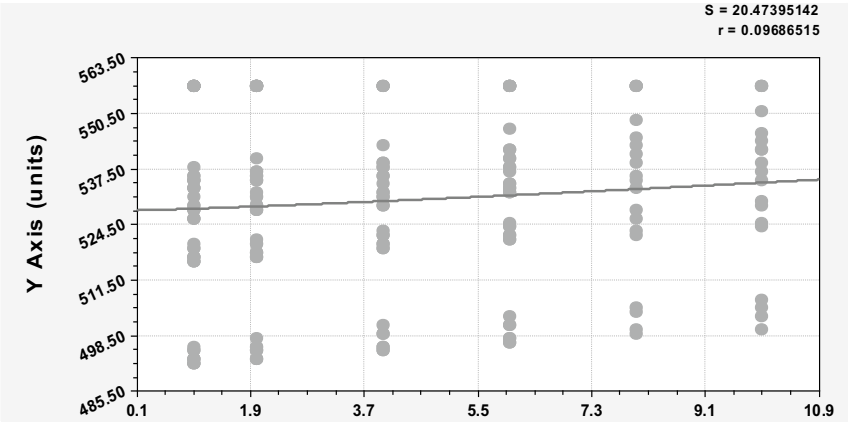


Рис. 6. Влияние глубины слоя на плотность образцов осины

С увеличением глубины слоя происходит рост плотности древесины исследуемых образцов.

Следующим фактором с адекватностью 0.7199 становится время обработки:

$$\rho(\tau) = 557.00000 \exp(-0.14383 \tau^{0.43969}) + 60.86110 \tau^{0.55309} \exp(-0.28278 \tau^{0.12405}). \quad (7)$$

Указанная закономерность включает два слагаемых. Первый является законом экспоненциальной гибели, а второй – биотехническим законом. Из графика на рис. 7 видно, что основное влияние оказывает первое слагаемое.

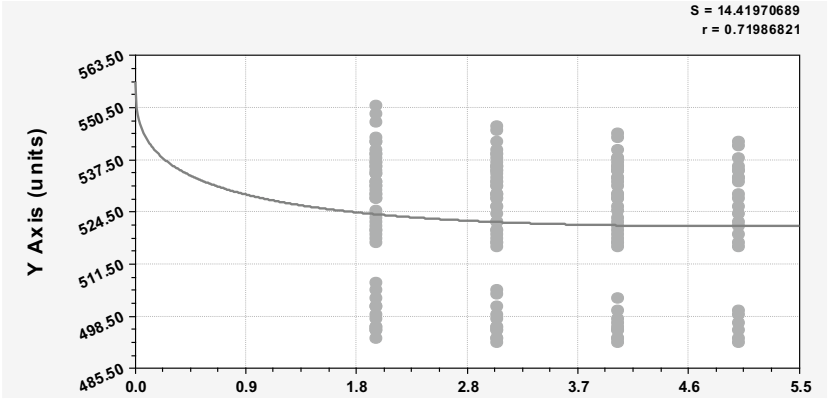


Рис. 7. Влияние времени на плотность образцов осины

И, наконец, самый высокий коэффициент корреляции 0.9836 имеет фактор влияния температуры на изменение плотности древесных образцов (рис. 8) по обратному закону Вейбулла:

$$\rho(t) = 557.15069 - 0.37191 \exp(0.021100 t). \quad (8)$$

По этой формуле из начальной плотности вычитается экспоненциальный закон роста при интенсивности роста 1.

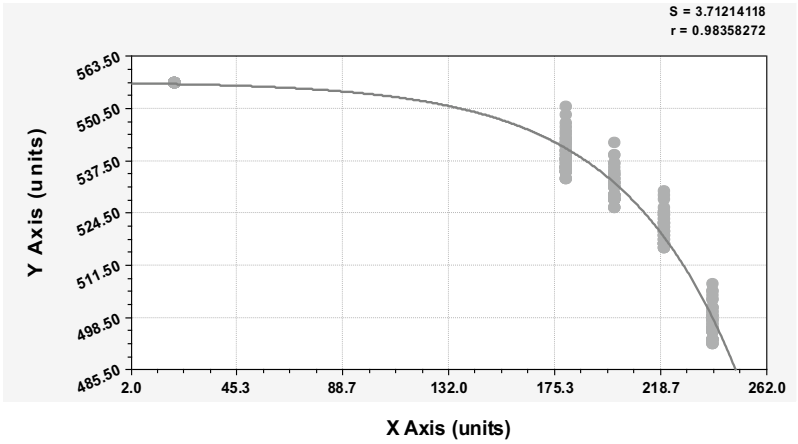


Рис. 8. Влияние температуры на плотность образцов осины

Таким образом, в результате моделирования определены однофакторные закономерности, которые ранжированы согласно увеличению коэффициента корреляции:

1) функция влияния толщины образца на плотность с коэффициентом корреляции 0.0088;
2) функция влияния глубины слоя на плотность с коэффициентом корреляции 0.0969;
3) функция влияния времени обработки на плотность с коэффициентом корреляции 0.7199;
4) функция влияния температуры обработки на плотность с коэффициентом корреляции 0.9836.

Далее осуществляется стыковка полученных данных для получения многофакторной модели динамики плотности древесного образца в процессе термической обработки. Для этого берем абсолютные погрешности от модели (5) и находим их зависимость от следующего по значимости фактора – глубины слоя x. Значения абсолютных погрешностей ε приведены в табл. 1.

$$\varepsilon_s(x) = -557.55228\exp(-5.49169x^{0.076154}) + 0.098879x^{1.71497}, \quad (9)$$

При этом произошло небольшое увеличение коэффициента корреляции с 0.0969 (рис. 6) до 0.1009. Результаты моделирования представлены на рисунке 9.

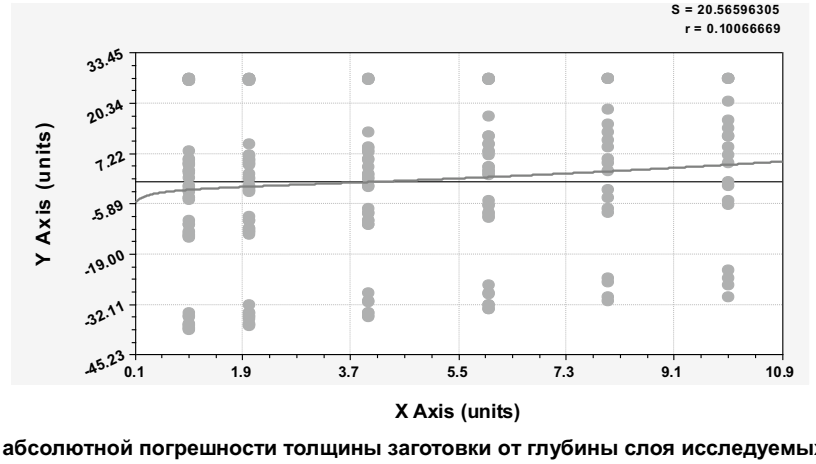


Рис. 9. Зависимость абсолютной погрешности толщины заготовки от глубины слоя исследуемых образцов осины

Затем находим зависимость абсолютных погрешностей от следующего по значимости фактора – время обработки τ (рис. 10).

$$\varepsilon_{s,x}(\tau) = 26.90364\exp(-0.016314\tau^{1.76265}) - 1.30535\tau^{0.28704}\exp(-0.089971\tau^{1.06196}), \quad (10)$$

По сравнению с рисунком 7 коэффициент корреляции вместо 0.7199 при однофакторном моделировании стал равным 0.7277.

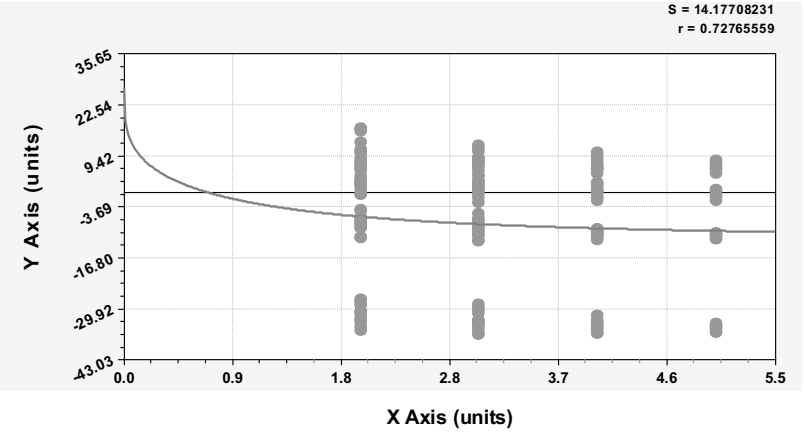


Рис. 10. Зависимость абсолютных погрешностей толщины заготовки и глубины слоя от времени обработки образцов осины

На рисунке 11 показан результат моделирования зависимости абсолютных погрешностей от последнего фактора - температуры обработки *t*.

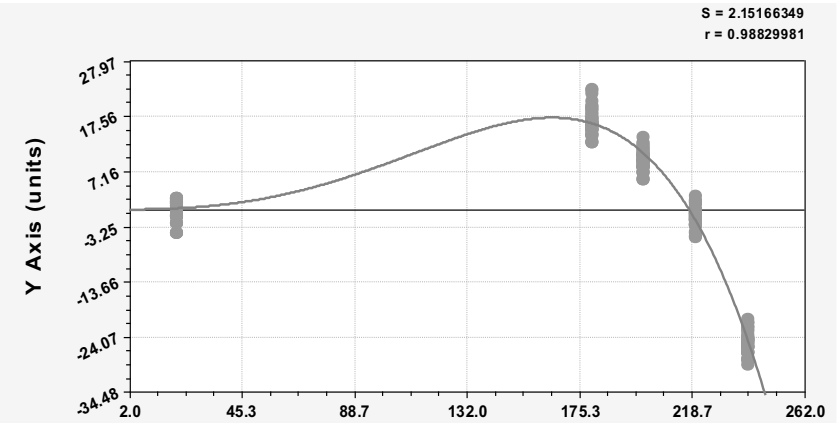


Рис. 11. Зависимость абсолютных погрешностей толщины заготовки, глубины слоя и времени обработки от температуры обработки образцов осины

$$\varepsilon_{s,x,\tau}(t) = 2.86459 \cdot 10^{-7} \exp(8.41213 t^{0.15959}) - 2.15207 \cdot 10^{-9} t^{4.59846}. \quad (11)$$

Однофакторное моделирование дало коэффициент корреляции 0.9836 (рис. 8), а после четырехфакторной модели в виде формулы:

$$\rho(s, \mathrm{x}, \tau, \mathrm{t}) = \rho(S) + \varepsilon_s(x) + \varepsilon_{s,x}(\tau) + \varepsilon_{s,x,\tau}(t), \quad (12)$$

по расчетам был получен коэффициент корреляции 0.9883 (чуть больше 0.9836) сверхсильной связи между пятью факторами. Таким образом, термообработка имеет явно нелинейные факторные связи.

Далее рассмотрим зависимость абсолютных погрешностей моделирования от плотности исследуемых образцов, приведенные на рисунке 12.

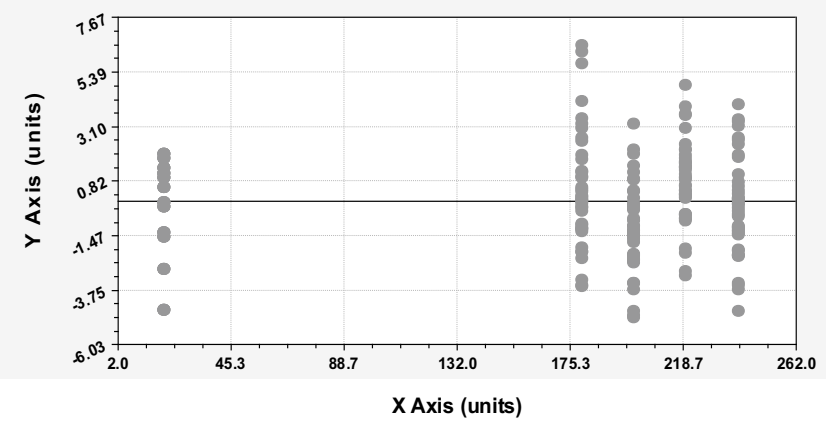


Рис. 12. Влияние абсолютных погрешностей температуры обработки, времени обработки, глубины слоя и толщины заготовки на изменение плотности образцов осины

Как и на рисунке 12, на всех графиках изменения абсолютных погрешностей видны небольшие колебания. В итоге подтверждается колебательный характер процесса термического модифицирования древесины [9,10]. Но здесь колебания возникают из-за частого вынимания образцов и быстрого охлаждения для регистрации профиля плотности.

Относительная погрешность модели в каждой точке определяется по формуле:

$$\Delta = 100\varepsilon / \rho_{\phi}, \tag{13}$$

где ρ_{ϕ} - фактические значения плотности древесины осины по данным таблицы 1. Максимальная относительная погрешность четырехфакторной модели для древесины осины составила 1.18 %.

В результате многофакторного моделирования установлено, что термообработка имеет явно нелинейные факторные связи. Только два фактора (время и температура обработки) оказывают сильное влияние на изменение плотности древесины осины в процессе термической обработки, а такие факторы как глубина слоя и толщина заготовки не дают сильной связи с плотностью.

Заключение

Термомодифицирование древесины позволяет изменить цветовую гамму и свойства массивной древесины по всему сечению пиломатериала, что происходит вследствие химических процессов и разложения части содержащихся в древесине веществ, вызывая изменение плотности материала. При этом характер термической обработки зависит от изменения плотности древесины. В этой связи, контроль за перепадом плотности материала по слоям позволит обеспечить равномерность термического модифицирования древесины по всему сечению заготовки, тем самым, предотвратив возможные негативные явления в процессе эксплуатации.

В результате проведенных экспериментов и моделирования методом идентификации для древесины осины установлено, что при термомодифицировании плотность образцов практически не зависит от влияния таких факторов как толщина заготовки и глубина слоя. Сильные факторные связи с коэффициентом корреляции не менее 0.7 обнаружены при влиянии времени и температуры обработки на плотность исследуемых образцов.

В последующих опытах можно принять группы по четыре образца древесины при не менее пяти значениях толщины (например, 40, 30, 20, 12 и 4 мм). Следует регистрировать температуры непосредственно в разных глубинах 1. 2, 4, 6, 8 и 10 мм при ступенчатом повышении температуры от 140 ^{0}C через 20 ^{0}C до 300 ^{0}C. Возможны трудности при измерениях плотности без вынимания образцов из камеры. Однако можно измерить текущую массу при условно постоянном объеме при термообработке каждого древесного образца.

Литература

1. Сафин Р.Р., Белякова Е.А. Усовершенствование технологии термомодифицирования древесины BICOS_TMT // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. С. 134-136.

2. Хасаншин Р.Р., Зиатдинов Р.Р., Хазиева Д.Р., Кузнецов К.Р. Влияние температуры обработки на водостойкость термофанеры // Деревообрабатывающая промышленность. 2013. № 4. С. 28-30.

3. Тимербаева А.Л., Сафин Р.Р. Обзор технических решений для осуществления процесса термической обработки измельченной древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. № 1. С. 57-63.

4. Губернаторов В.В., Шамсиев Р.Р., Шарычев О.С., Сафин Р.Р. Термообработка древесной муки в условиях плотного слоя // Деревообрабатывающая промышленность. 2017 № 3. С. 22-27.

5. Сафин Р.Р., Семёнов Ю.П. Сушка и термовлажностная обработка древесных материалов // Деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 1. С. 28-34.

6. Сафин Р.Р., Фатхуллова Р.И. Современные технологические решения в области термомодифицирования древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2. С. 32-35.

7. Safin R.R., Khasanshin R.R., Shaikhutdinova A.R., Safina A.V. Research of heating rate while thermo modification of wood // World Applied Sciences Journal. 2014. Т. 30. № 11. С. 1618-1621.

8. Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю., Оладышкина Н.А. Энергосберегающая установка для сушки и термической обработки древесины // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 542-546.

9. Mazurkin P.M. Method of identification. International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2014, 1(6), pp. 427-434.

10.Safin R.R., Mazurkin P.M., Mukhametzyanov S.R., Voronin A.E., Salimgaraeva R.V. Dinamics of mass of a samble in the course of oscillating vacuum and conductive drying of timber // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. Section Green Buildings Technologies and Materials. Volume 17. Issue 62. Sofia, Bulgaria. Doi: 10.5593/sgem2017/62. P.97-104.

11.Мазуркин П.М., Сафин Р.Г., Просвирников Д.Б. Статистическое моделирование процессов деревообработки: учеб. пос.; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. 336 с.

© **Разумов Е.Ю.** - д-р техн. наук, профессор кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: evgeny.razumov2011@yandex.ru; **Сафин Р.Р.** - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru; **Мазуркин П.М. -** д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»; **Сафина А.В.** - канд. техн. наук, доцент кафедры экономики ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: alb_saf@mail.ru; **Хасаншина Р.Р. -** аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины» ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: olambis@rambler.ru.

UDC 674.04

MULTIVARIATE MODELLING OF DENSITY DYNAMICS OF ASPEN WOOD IN THE PROCESS TERMOMODIFICATION

E.U. Razumov, R.R. Safin, P.M. Mazurkin, A.V. Safina, R.R. Khasanshina

The results of experiments and statistical modeling of changes in the density of wood cross-section samples of aspen lumber in the process of vacuum-contact heat treatment. Determination of the layer density of the sample was performed on the laboratory x-ray profilometer DPX300 from zero to five hours during heat treatment. The four-factor equation with the maximum relative error of 1.18% is obtained by the method of identification. It was found that the densities of the samples in the dynamics at processing temperatures of 180, 200, 220 and 240 °C are complex, which can then be used to control the process and ensure uniformity of heat treatment over the cross section of the material.

Keywords: *thermomodification, wood, density, correlation coefficient.*

References

1. Safin R.R., Belyakova E.A. [Improvement of the technology for thermal modification of wood BICOS_TMT] Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University] 2012. T. 15. pp. 134-136. (In Russ.)

2. Khasanshin R.R., Ziatdinov R.R, Hazieva D.R, Kuznecov K.R. [The effect of temperature treatment on the water resistance of termoplywood] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2013. № 4. pp. 28-30.

3. Timerbaeva A.L., Safin R.R. [Overview of technical solutions for the heat treatment of crushed wood] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2017. № 1. pp. 57-63.

4. Gubernatorov V.V., Shamsiev R.R., Sharychev O.S., Safin R.R.[Heat treatment of wood flour in a dense layer] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2017 № 3. pp. 22-27.

5. Safin R.R., Semyonov U.P. [Drying and thermal water treatment of wood materials] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2014. № 1. pp. 28-34.

6. Safin R.R., Fathullova R.I. [Modern technological solutions in the field of thermomodification of wood] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2014. № 2. pp. 32-35.

7. Safin R.R., Khasanshin R.R., Shaikhutdinova A.R., Safina A.V. Research of heating rate while thermo modification of wood // World Applied Sciences Journal. 2014. T. 30. № 11. C. 1618-1621.

8. Safin R.R., Razumov E.U. , Oladyshkina N.A. [Energy-saving installation for drying and heat treatment of wood] Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University] 2010. № 9. pp. 542-546.

9. Mazurkin P.M. Method of identification. International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2014, 1(6), pp. 427-434.

10.Safin R.R., Mazurkin P.M., Mukhametzyanov S.R., Voronin A.E., Salimgaraeva R.V. Dinamics of mass of a samble in the course of oscillating vacuum and conductive drying of timber // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. Section Green Buildings Technologies and Materials. Volume 17. Issue 62. Sofia, Bulgaria. Doi: 10.5593/sgem2017/62. P.97-104.

11.Mazurkin P.M., Safin R.G., Prosvirnikov D.B. [Stat istical modeling of woodworking processes] Ucheb. pos. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossii, Kazanskij nacionalnyj issledovatelskij tekhnologicheskij universitet. Kazan: izdatelstvo Kazanskogo nacionalnogo issledovatelskogo tekhnologicheskogo universiteta [Textbook; Ministry of education and science of Russia, Kazan National Research Technological University. Kazan: Kazan National Research Technological University Press] 2014. 336 p.

© **Razumov E.U.** - doctor of technical sciences, professor of the department of ArD of the «Kazan national research technological university» («KNRTU»), e-mail: evgeny.razumov2011@yandex.ru; **Safin R.R.** - doctor of technical sciences, professor, head of the department of ArD of the «KNRTU», e-mail: cfaby@mail.ru; **Mazurkin P.M** - doctor of technical sciences, professor of the «Volga State University of Technology»; **Safina A.V.** - candidate of technical sciences, associate professor of the department of Economics of the «KNRTU», e-mail: alb_saf@mail.ru; **Khasanshina R.R.** - postgraduate of the department of ArD of the «KNRTU», e-mail: olambis@rambler.ru..

УДК 684.4.059.1

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ АДГЕЗИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДРЕВЕСИНЕ И ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ РЕШЁТЧАТЫХ НАДРЕЗОВ

Б.М. Рыбин, И.А. Завражнова, Д.Б. Рыбин

В технологии деревообработки для формирования защитно-декоративных покрытий на древесине и древесныхматериалахиспользуют различные плёнкообразующие вещества. Все они являются полимерами различного способа отверждения. К ним относятся: полистирол, полиметилметакрилат, поливинилацетат, поливинилхлорид, карбомидо-феноло-и-меламиноформальдегидные, нитроцеллюлоза, полиуретан и полиакиленгликольмалеинат. Создание с помощью них качественных покрытий связано в первую очередь с получением достаточной адгезионной прочности на стыке слоев полимер-древесина. Такое явление наблюдается, если между контактирующими материалами имеется физическая совместимость. Доказать её возможно при использовании термодинамического параметра совместимости,зависящегоот плотностей энергии когезии адгезива и субстрата. При рассмотрении древесинного вещества,как лигноуглеводного комплекса можно определить какие полимеры имеют совместимость с целлюлозой и

гемицеллюлозами, а какие с лигнином. Такой подход показал, что практически все перечисленные полимеры имеют совместимость с отдельными элементами лигоуглеводного комплекса и приобретают в контакте с ними достаточную адгезионнуюпрочность с древесинным веществом. Оценка адгезионной прочности в целом должна проводится надежными способами с использованием наиболее простых методик. С этой точки зрения предпочтительным способом оценки адгезионной прочности полимеров на древесине является метод решетчатых надрезов. Метод прост для использования как в лабораторных так в цеховых условиях. Он долгое время используется в технологии деревообработки как один из основных методов оценки адгезии покрытия полимеров на древесине и древесных материалах. Недостатком его является оценка адгезионной прочности качественными показателями в виде соответствующих баллов. В работе были получены предварительные нормативы адгезионной прочности полимерных покрытий на древесине и древесных материалах. Для этого использовался комплексный подход рассмотрения сложных вопросов совместимости изучаемых полимеров с древесинным веществом, метод слабых граничных слоев двух контактирующих тел, а также элементы теории упругости. Полученные нормативные показатели адгезионной прочности хотя и являются предварительными, но рекомендуются для использования в фундаментальных исследованиях изучения контакта полимерных композиций с древесинным веществом.

Ключевые слова: *древесинное вещество, полимерные пленкообразователи, адгезионная прочность, метод решетчатых надрезов.*

Введение

Свойство лакокрасочного покрытия прочно сцепляется с поверхностью древесины и древесного материала характеризуется адгезией. Оно представляет собой поверхностное физико-химическое явление, возникающее при взаимодействии между двумя разнородными контактирующими телами, одним из которых является лакокрасочное покрытие (адгезив), другим поверхность древесины или древесного материала (субстрат). Мерой адгезии является адгезионная прочность, которая может быть непосредственно оценена лишь при разрушении адгезионного соединения.

Адгезионная прочность определяется силой, которая требуется для разрыва или отделения плёнки покрытия от поверхности древесины или древесного материала или работой отрыва плёнки от единицы этой поверхности.

В настоящее время для определения адгезионной прочности контактирующих между собой различных материалов разработаны и успешно применяются соответствующие методы испытаний [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Наиболее распространены методы неравномерного отрыва, позволяющие выявить колебания в значениях адгезионной прочности на отдельных участках испытуемых образцов. Такие методы пригодны при определении адгезионной прочности на отслаивание жёстких или гибких от жёстких материалов, а также на расслаивание гибких материалов. Для покрытий древесины и древесных материалов такие методы могут быть использованы для определения адгезионной прочности термопластичных плёнок, которыми являются плёнки из поливинилхлорида.

Другими методами, определяющими адгезионную прочность, являются методы равномерного отрыва, предусматривающие отделение адгезива от субстрата одновременно по всей площади контакта. При реализации таких методов усилие прикладывается перпендикулярно плоскости соединения материалов. Адгезионная прочность характеризуется силой, отнесённой к площади контакта. Из всех методов этого типа перспективным является метод равномерного отрыва штифтов. При использовании такого метода для определения адгезионной прочности лакокрасочного покрытия к древесине или древесному материалу штифты приклеиваются специальным клеем к поверхности покрытия. Хотя такой метод и является наиболее применяемым для определения адгезионной прочности лакокрасочных покрытий к древесине, он требует детального решения целого ряда технических задач. Существенным является выбор клея при приклеивании штифтов. Для получениядостаточной точности, при испытаний на адгезионную прочность покрытий древесины, необходимо исключить перекос образца и внецентренное приложение нагрузки, что является довольно сложной задачей. Кроме того, на адгезионную прочность, при таком методе испытаний оказывает существенное влияние равномерность скорости нагружения при отрыве штифтов от поверхности покрытия. Для решения этой задачи требуется использование специальных технических устройств. Отсюда, такой метод нашел применение для определения адгезионной прочности лакокрасочных покрытий древесины и древесных материалов в качестве исследовательского.

Широкое распространение получили методы определения адгезионной прочности, предусматривающие сдвиг контактирующих материалов образца друг относительно друга. При таком испытании нагружение осуществляется различными способами: растяжением, сжимающей нагрузкой, кручением. Практика показывает, что такие методы определения адгезионной прочности целесообразно применять для клеевых соединений.

Рассмотренные методы определения адгезионной прочности характеризуется кратковременным приложением нагрузки. В некоторых случаях адгезионную прочность целесообразно определять путём приложения циклически изменяющихся нагрузок, ударных и длительных статических. В этом случае работоспособность адгезионного соединения характеризуется числом циклов деформации до разрушения. Очень часто после приложения некоторого числа циклов деформации определяют адгезионную прочность одним из статических методов. Такие методы испытаний лакокрасочных покрытий древесины и древесных материалов можно отнести к области научных исследований. Для их осуществления в большинстве случаев, требуется сформировать покрытие не на древесине, а на поверхности специального материала. Это будет не соответствовать реальным условиям формирование покрытий и требования к эксплуатации изделий.

Существует ещё несколько методов определения адгезионной прочности, классификация которых по традиционной схеме затруднительна. Одним из них является метод параллельных и решетчатых надрезов. Сущность их состоит в перерезании покрытия резцом и скалывании участка нормальной составляющей силы со стороны передней грани резца. При параллельных надрезах определяют число отслаивающихся полосок, а при решетчатых надрезах число отслаивающихся квадратиков. Адгезионную прочность оценивают в баллах или процентах. Такие методы просты в применении; не требуют сложной, специальной техники в проведении испытаний; могут использоваться как в лабораторных, так и в цеховых условиях. Единственным их недостатком является отсутствие количественной оценки при получении результата испытаний.

Целью данной работы является определение количественной оценки адгезионной прочности лакокрасочных покрытий древесины и древесных материалов по методу решетчатых надрезов.

Материалы и методы

В качестве исследуемых материалов использовались полимеры, на основе которых в технологии защитно-декоративных покрытий древесины приготавливаются лакокрасочные композиции для жидкой отделки. Выбраны следующие полимеры (условное обозначение по ГОСТ 24888): полистирол (ПС), полиметилметакрилат (ПММА), поливинилацетат (ПВАЦ), поливинилхлорид (ПВХ), карбамидоформальдегид (КФ), меламиноформальдегид (МФ), фенолоформальдегид (ФФ), нитроцеллюлоза (НЦ), полиуретан (ПУР), полиалкиленгликольмалеинат(ПН). Перечисленные полимеры являются плёнкообразующими веществами в лакокрасочных композициях. На их основе могут быть приготовлены лаки, краски, эмали, грунтовки, шпатлёвки, порозаполнители. Для всех этих материалов характерным является адгезионная прочность к древесине. При нанесении нескольких слоёв межслойная адгезионная прочность должна быть также достаточной, чтобы в процессе эксплуатации не произошло расслоения покрытия. Физико-механические свойства высокомолекулярных соединений на основе перечисленных полимерных композиций были приведены в статье [8].

Исследовался метод решетчатых надрезов для определения адгезионной прочности лакокрасочных покрытий древесины и древесных материалов [9]. Сущность метода заключается в нанесении на готовое лакокрасочное покрытие решетчатых надрезов и визуальной оценки состояния покрытия по четырёхбалльной системе.

В качестве режущего инструмента может использоваться лезвие бритвенное в держателе любого типа, одно- или многолезвийный нож с углом заточки режущей части 20÷30º и кромкой лезвия толщиной 0,05÷0,10 мм. При применении многолезвийного инструмента расстояние между лезвиями может быть 1 мм, 2 мм и 3 мм.

При испытании на покрытие действует усилие сдвига, создаваемое лезвием бритвы или ножом многолезвийной фрезы. Отрыв покрытия происходит в направлении вдоль основания, на которое оно нанесено. Одновременное действие 6-ти режущих лезвий на покрытие существенно увеличивает точность определения адгезии по сравнению с однолезвийными инструментами.

Методика проведения испытаний должна предусматривать следующие моменты. Торец режущего инструмента должен располагаться нормально к поверхности образца с покрытием. Давление на

режущий инструмент должно быть постоянным и не допускается резких движений. Надрез производится до поверхности древесины или древесного материала. Грубое внедрение резца при этом в поверхность подложки является нежелательным. Скорость перемещения резца при надрезании покрытия должна составлять от 10 до 50 мм/с, что требует приобретения, в этом случае, соответствующих навыков исследователем. На участке покрытия надрез выполняется строго прямолинейно и в выбранном направлении. При использовании однолезвийного резца для осуществления прямолинейного реза может служить металлическая линейка. К первому надрезу покрытия выполняется надрез под углом 90º так, чтобы образовался решетчатый рисунок. Различные по размерам решетчатые надрезы создают разрушенные участки поверхности покрытия по площади примерно 1 мм^2, 2 мм^2 и 3 мм^2. Методика проведения испытаний определяет в зависимости от толщины покрытия размеры получаемых решетчатых надрезов. Чем тоньше покрытие, тем меньше по площади должны быть разрушенные участки поверхности. Оценка разрушения осуществляется путём внимательного рассмотрения разрушенного участка покрытия в виде решетчатого рисунка. Устанавливается количество отделенных квадратиков покрытия на разрушенном участке по верхности и характер их качественного отделения - разрушения. Для этой цели может использоваться лупа с 4^x - кратным увеличением.

Для более детального исследования характера разрушения и улучшения отделения отслоившихся квадратов покрытия может использоваться мягкая кисть, а также липкая лента типа «СКОЧ» или «ЗМ». Последняя равномерно приклеивается на разрушенный участок покрытия, а затем отрывается равномерно за свободный конец. Возможно также отделения покрытия от основания после проведения решётчатого надреза методом удара по обратной стороне основания. Практически отделенные квадратики покрытия за счёт такого удара должны осыпаться с решетчатого рисунка.

Проводимые манипуляции над разрушенным участком поверхности покрытия, в виде решетчатого рисунка, дают возможность оценить адгезионную прочность по балльной системе, указанной в стандарте на этот метод испытаний.

Результаты и обсуждение

Взаимодействие контактирующих материалов адгезива и субстрата подчиняется условиям термодинамической трактовки адгезии. В этом случае должно происходить смачивание и растекание адгезива по поверхности субстрата, молекулярное взаимодействие между ними, и возникновение адгезионной прочности. Максимальная величина ее будет наблюдаться в том случае, когда значение плотности энергии когезии субстрата является близким по значению с плотностью энергии когезии адгезива. По мере возрастания различий в плотностях энергий когезии совместимость ухудшается. Различие в плотностях энергии можно оценить термодинамическим параметром совместимости [1] β (кал/см^3) по следующей формуле

$$\beta = \left(\sqrt{\frac{Es}{Vs}} - \sqrt{\frac{Ea}{Va}}\right)^2$$

$$\beta = \left(\sqrt{(Es/Vs)} - \sqrt{(Ea/Va)}\right)^2 \quad (1)$$

где E_s и E_a- когезия, соответственно субстрата и адгезива, кал/моль;

V_s и V_a- суммарный вклад функциональных групп структурных звеньев в аддитивную мольную функцию объёма, соответственно субстрата и адгезива, см^3/моль.

Очевидно, с возрастанием параметра β адгезионная прочность должна уменьшаться.

Используя данные статей [8,10], выполним расчёты по определению термодинамического параметра совместимости полимеров, применяемых в деревообработке, с древесным веществом и его составляющими, т.е. с веществами лигноуглеводного комплекса. Результаты приведены на рис. 1.

Целлюлоза и гемицеллюлозы практически совместимы по параметру β с такими полимерами как:феноло-и- меламиноформальдегид, нитроцеллюлоза, полиуретан. Отличие других полимеров от целлюлозы и гемицеллюлоз имеют один и тот же характер изменения значения термодинамического параметра совместимости.

Лигнин хорошо совместим с полистиролом, полиметилметакрилатом, поливинилацетатом, поливинилхлоридом, полиалкиленгликольмалеинатом.

В целом древесинное вещество имеет относительно хороший результат совместимости по параметру β со всеми полимерами, применяемыми в деревообработке. Значение β не превышает величину 6,15. Исключением является карбамидоформальдегид. Его параметр совместимости с древесинным веществом и с веществами лигноуглеводного комплекса колеблется от 13 до 60 единиц.

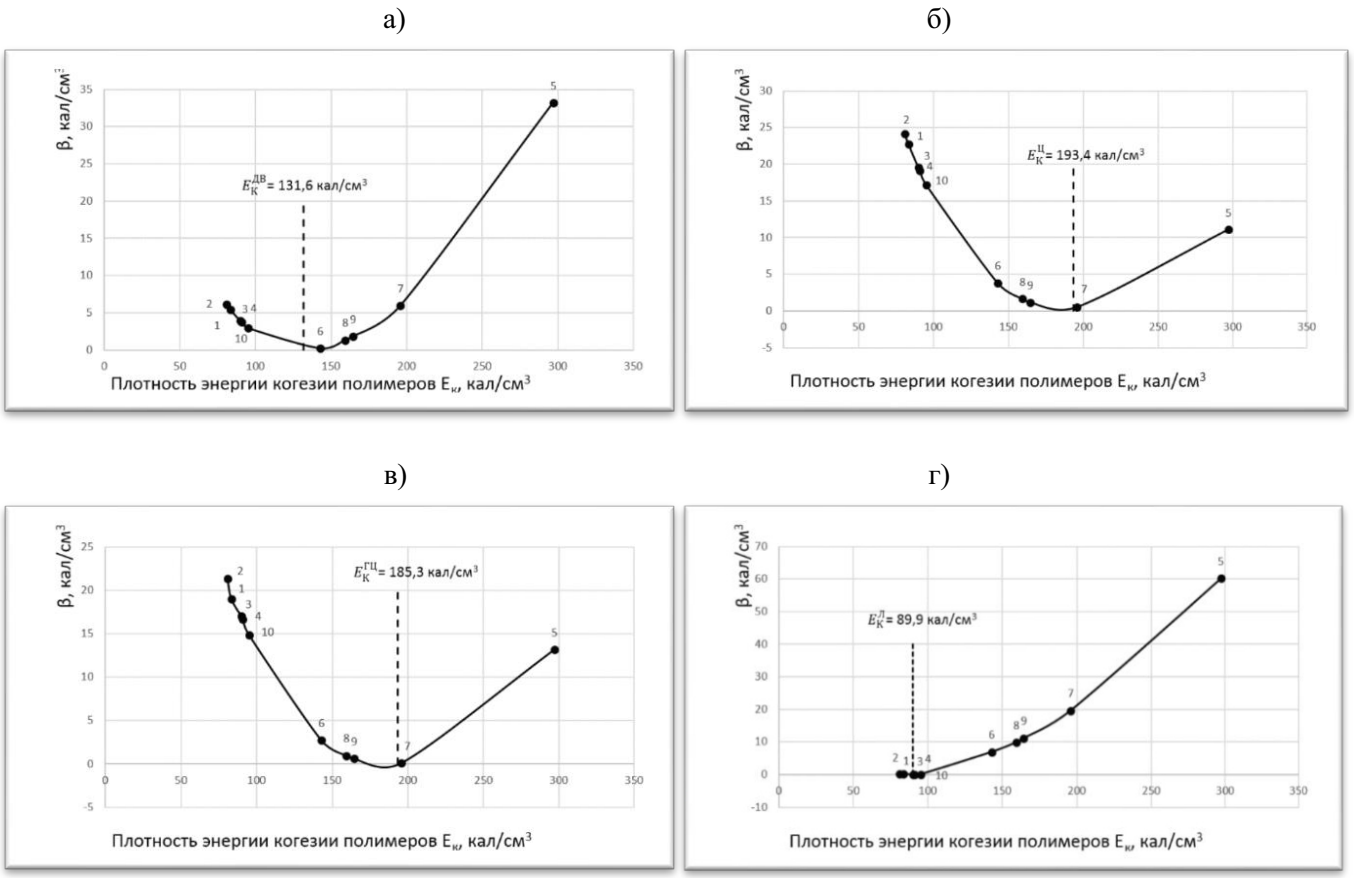


Рис. 1. Параметры совместимости плотности энергии когезии полимеров и а) древесинного вещества, б) целлюлозы, в) гемицеллюлоз, г) лигнина к полимерам: 1-ПС; 2-ПММА; 3-ПВАЦ; 4- ПВХ; 5- КФ; 6- ФФ; 7- МФ; 8-НЦ; 9- ПУР; 10-ПН

В результате проведенного исследования можно заключить, что все перечисленные полимеры, используемые в качестве адгезива в лакокрасочных композициях, имеют хорошую совместимость с древесинным веществом, выполняющим роль субстрата. Это является одним из условий возникновения достаточной адгезионной прочности при формировании защитно-декоративных покрытий.

Другим условием получения достаточной адгезионной прочности между субстратом и адгезивом является относительно низкая свободная энергия их поверхности раздела.

Для оценки свободной энергии поверхности раздела адгезива и субстрата воспользуемся методикой, предложенной Джирифалко и Гудом [11,12]. Первоначально определяется параметр Ф по следующей формуле

$$Ф=4(V_s*V_a)^{1/2}/(V_s^{1/3}+V_s^{1/3})^2, \quad (2)$$

где V_s и V_a-суммарный вклад функциональных групп структурных звеньев в аддитивную мольную функцию объёма, соответственно субстрата и адгезива, см3/моль.

Затем определяем свободную энергию поверхности раздела адгезив-субстрат σ_{sa} (эрг/см^2) по следующей зависимости

$$\sigma_{sa}= \sigma_s+ \sigma_a-2*Ф*(\sigma_s* \sigma_a)^{1/2}, \quad (3)$$

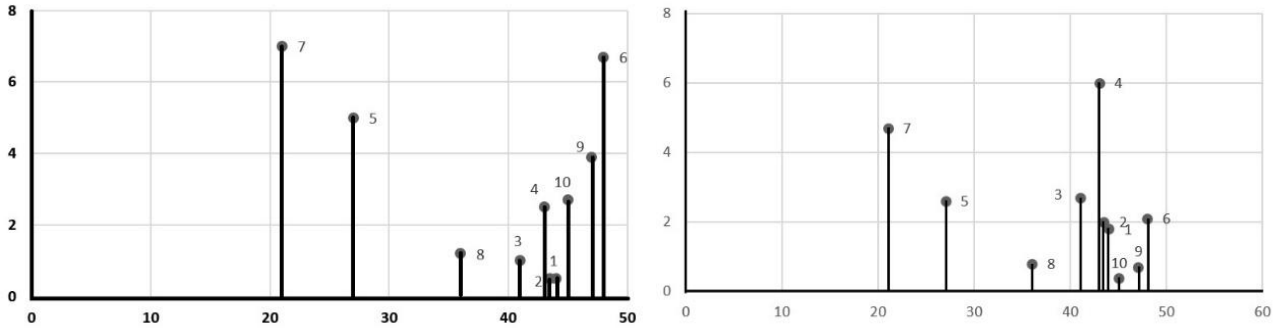
где σ_s- поверхностная энергия на границе раздела субстрат-воздух, эрг/см^2

σ_a – поверхностная энергия на границе раздела адгезив-воздух, эрг/см^2

Используя данные статей [8, 10] были выполнены расчёты по приведённым формулам 2 и 3 для изучаемых полимеров и составляющих лигноуглеводного комплекса древесинного вещества. Результаты приведены на рис. 2. Как видно между отдельными составляющими древесинного вещества (целлюлозой, гемицеллюлозами и лигнином) и полимерами наблюдается относительно низкая свободная энергия их поверхности раздела, колеблющаяся в пределах от 0,2 до 11,97 эрг/см^2. Это подтверждает условие достижения достаточной адгезионной прочности между древесным субстратом и полимерными адгезивами, используемыми в технологии отделки.

а) б)

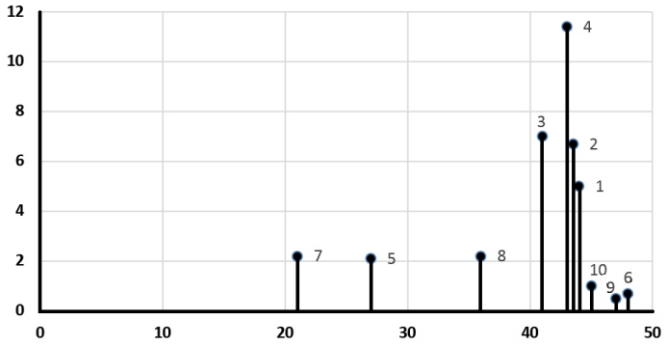
σ_{sa}, эрг/см^2σ_{sa}, эрг/см^2



Поверхностная энергия адгезива, эрг/см^{2}Поверхностная энергия адгезива, эрг/см^2

в)

σ_{sa}, эрг/см2



Поверхностная энергия адгезива, эрг/см^2

Рис. 2. Свободная энергия на поверхности раздела субстратов: а) целлюлозы; б) гемицеллюлозы; в) лигнина и адгезивов: 1-ПС; 2-ПММА; 3-ПВАЦ; 4-ПВХ; 5-КФ; 6-ФФ; 7-МФ; 8-НЦ; 9-ПУР; 10-ПН

При определении адгезионной прочности между субстратом и адгезивом иногда трудным является определить характер отрыва или характер разрушения. Многие исследователи поддерживают, что в некоторых случаях невозможно отличить адгезионный тип отрыва от когезионного. Имеется мнение [1], что адгезионный отрыв вообще невозможен, а имеет место лишь когезионный и наоборот. То и другое мнение отражает крайние случаи разнообразных форм отрыва: адгезионного, когезионного и адгезионо-когезионного.

Одна из теорий признающая только когезионный отрыв, является теория «слабых граничных слоёв» [1]. В ней адгезионная прочность рассматриваться как механическое понятие, а внешнее воздействие по отрыву адгезива от субстрата связывают с механической характеристикой этих материалов. Силы адгезионного взаимодействия адгезива и субстрата во внимание не применяются. Адгезиясводится к слабым граничным слоям. Согласно [1] молекулярное взаимодействие является средним геометрическим между взаимодействием молекул каждой фазы. Адгезия (W_a) – есть среднее геометрическое когезии контактирующих тел

$$W_a=(W_к^S*W_к^a)^{1/2}, \quad (4)$$

где $W_к^S$- когезия субстрата, МДж/ м^3;

$W_к^a$- когезия адгезива, МДж/м^3.

Хотя авторы считают, что рассматриваемое условие справедливо лишь при взаимодействии молекул двух фаз, находящихся в газообразном состоянии, оценим качественно адгезию рассматриваемых полимеров к древесинному веществу с позиции этой теории. Все выводы, которые будут получены будем считать качественными.

На рисунке 3 приведены значения адгезионной прочности полимеров к древесинному веществу от их когезии. Адгезия рассчитывалась по приведенной формуле (4), где когезионная прочность древесинного вещества была принята по [10] 551 МДж/м^3. Как видно полученная зависимость носит линейный характер. С увеличением когезии полимеров адгезия их к древесинному веществу возрастает. В результате обработки исходных данных, десяти исследуемых полимеров, по методике, и зложенной в [13,14] была получена зависимость следующего вида

$$W_a=0,45*W_к^a+292,9, \quad (5)$$

где W_a и $W_к^a$- соответственно адгезия полимеров к древесинному веществу и их когезия, МДж/м^3

Коэффициент корреляции составляет величину 0,99 и его значения значимо.

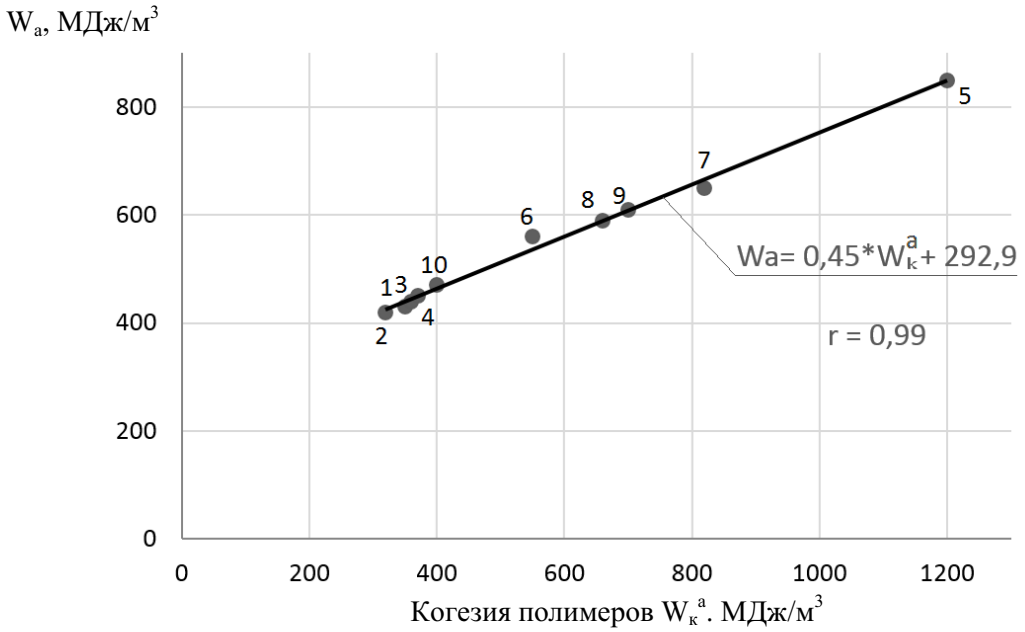


Рис. 3. Зависимость адгезии полимеров к древесинному веществу от их когезии 1-ПС, 2-ПММА; 3-ПВАЦ; 4-ПВХ; 5-КФ; 6-ФФ; 7-МФ; 8-НЦ; 9-ПУР; 10-ПН

Полученная зависимость подтверждает данные приведённые на рис. 1 по параметру совместимости изучаемых полимеров к древесинному веществу. Адгезия полимеров в целом зависит от совместимости их с различными химическими составляющими лигноуглеводного комплекса древесинного вещества: целлюлозой, гемицеллюлозами и лигнином [15].

Рассмотрение явления адгезии изучаемых полимеров и древесинного вещества, основанные на выявлении параметра совместимости контактирующих тел, оценки свободной энергии поверхности раздела адгезива и субстрата, а также качественной оценки адгезионной прочности на основе «слабых граничных слоёв». Полученные данные подтверждают наличие возможной достаточной адгезии исследуемых полимеров к поверхности древесинного вещества.

Оценим величину адгезии полимеров к древесинному веществу с использованием метода решетчатых надрезов. На рис. 4 представлена схема разрушенного участка покрытия в виде решетчатого надреза: а) вид сверху и б) объемное изображение. В результате разрушения образуются участки покрытия в виде усеченных пирамид. Оценим линейные размеры отдельных элементов рисунка решетчатого надреза. Для этого рассмотрим на рис. 5 схему разрушенного участка покрытия клиновым

режущими лезвиями адгезиометра полученную в одном направлении. Ширина разрушенной верхней границы покрытия ЕД можно определить по формуле

$$ЕД=КМ+2*МД, \quad (6)$$

Величина КМ=АВ=50 мкм. Где АВ является затуплением лезвия режущей кромки.

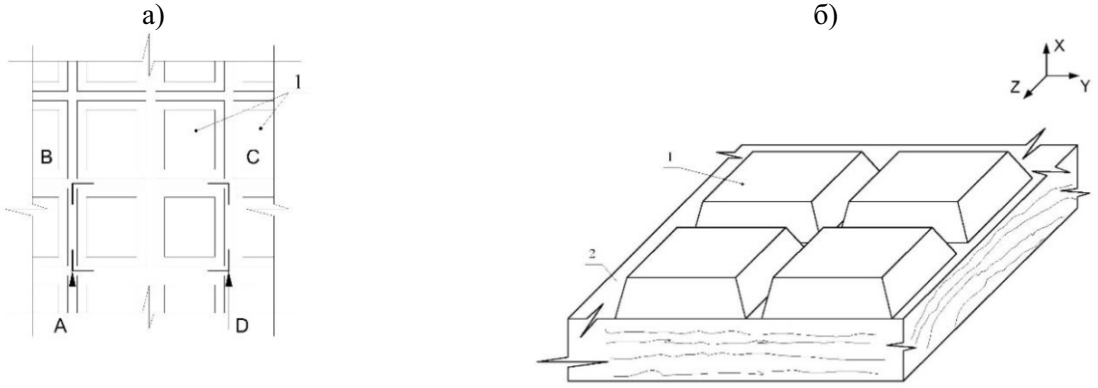


Рис. 4. Схема разрушенного участка покрытия в виде решетчатого надреза: а) вид сверху; б) объёмное изображение по АВСД. 1-участки покрытия в виде усеченных пирамид после разрушения; 2-древесина или древесиный материал

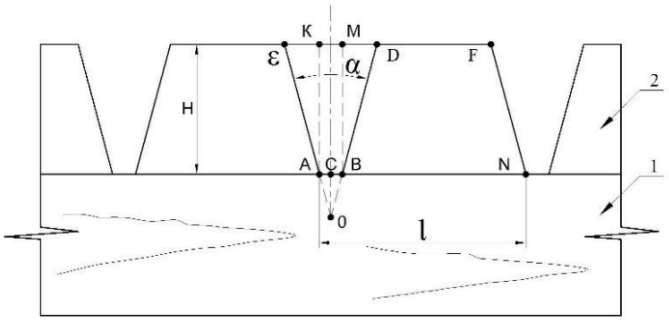


Рис. 5. Схема разрушенного участка покрытия клиновыми режущими лезвиями адгезиометра: 1-древесная подложка; 2-участок разрушенного покрытия; Н-толщина покрытия; α-угол заточки режущей части лезвия адгезиометра; L-расстояние между лезвиями адгезиометра

Величина МД определяется по формуле

$$МД=H*tg(\alpha/2), \quad (7)$$

где Н-толщина покрытия, мкм;

α-угол режущей кромки лезвия фрезы, град.

Окончательная формула для определения величины ЕД с учётом формул 6 и 7 будет иметь следующий вид

$$ЕД=50+2*H*tg(\alpha/2) \quad (8)$$

Ширина неразрушенной нижней границы покрытия BN, прилегающей к древесине, определяется по формуле

$$BN=L-50, \quad (9)$$

где L- расстояние между режущими кромками лезвий фрезы, мкм

Адгезиометр снабжен фрезами, у которых расстояние между режущими кромками лезвий соответствует 1; 2; и 3 мм. Отсюда BN_1=950 мкм, BN_2=1950 мкм и BN_3=2950 мкм.

Ширина неразрушенной верхней границы покрытия ДF определяется по формуле

$$ДF=L-50-2*МД \ . \quad (10)$$

С учётом формулы (7) и задаваясь различным расстоянием L между режущими кромками лезвий получим следующие формулы для ДF

$$ДF_1=950-2*H*tg(\alpha)\ , \quad (11)$$

$$ДF_2=1950-2*H*tg(\alpha)\ , \quad (12)$$

$$ДF_3=2950-2*H*tg(\alpha)\ . \quad (13)$$

На рисунке 6 представлены графика зависимости ширины неразрушенной верхней границы покрытия ДF, с учётом различного расстояния между режущими кромками лезвия ($ДF_1$; $ДF_2$ и $ДF_3$), от толщины покрытия и график изменение разрушенной верхней границы ЕД. от толщины покрытия.

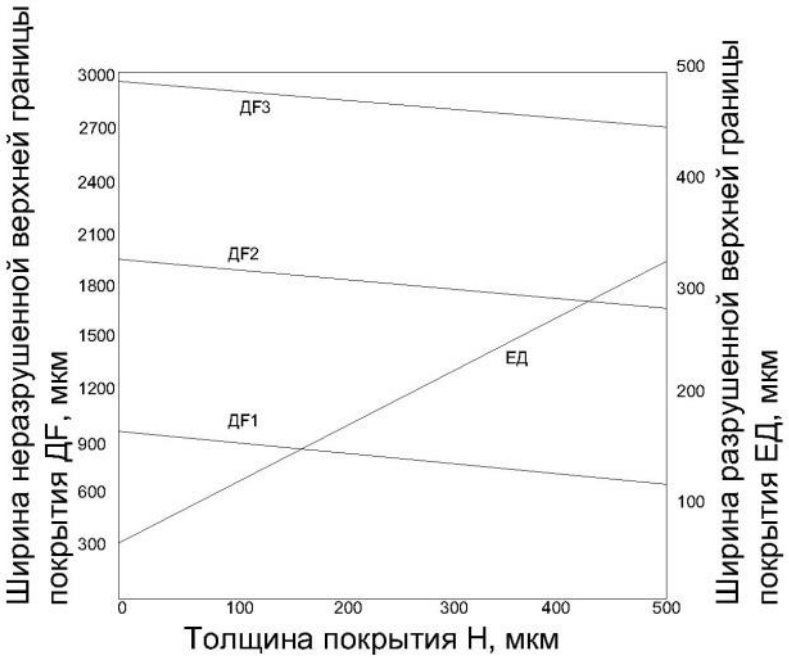


Рис.6. Зависимость ширины, неразрушенной и разрушенной границ от толщины покрытия

Контролирование ширины, разрушенной и неразрушенной верхней границы покрытия позволяет судить о разрушении покрытия до древесины. Такой контроль обязателен, т.к. в противном случае будет не выполнено условия полного разрушения покрытия по методу решетчатых надрезов.

Следующим этапом является определение силовых нагрузок, возникающих при нанесении решетчатых надрезов. Задача решается, используя теорию упругости. На рисунке 7 приведена схема действия силовой нагрузки при разрушении покрытия клиновым лезвием адгезиометра. Рассмотрим сосредоточенную вертикальную силу Р, приложенную к горизонтальной прямолинейной границе MN бесконечной пластинки. Предположим, что лезвие кромки адгезиометра имеет полное заострение и внедряется в подложку на величину ОС. Распределение нагрузки по толщине покрытия является однородным. Величина АВ характеризует затупление кромки лезвия адгезиометра и составляет 50 мкм.

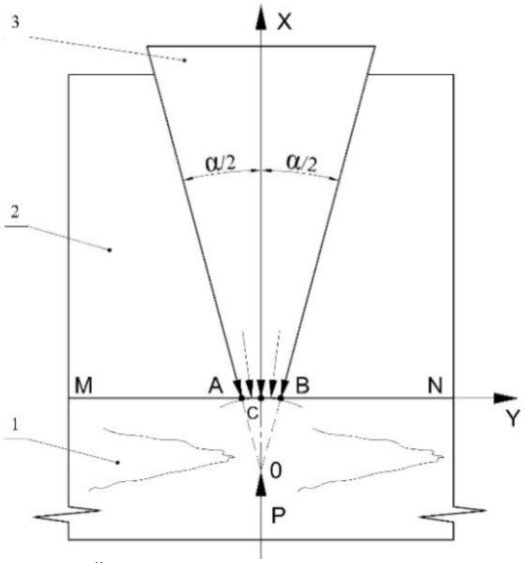


Рис. 7. Схема силовой нагрузки, действующей при разрушении покрытия клиновым лезвием адгезиометра: 1-древесная подложка; 2-покрытия; 3-клинловое лезвие адгезиометра

Из теории упругости используем фундаментальное решение, называемое простым радиальным распределением напряжений. Нормальные (σ_x) и (σ_y) и касательная (τ_{xy}) компоненты напряжений определяются из условия простого сжатия в радиальном направлении [16] по следующим формулам:

$$\sigma_x=-((2*P)/\pi*OC*BN))*Cos^4(\alpha/2), \quad (14)$$

$$\sigma_y=-((2*P)/\pi*OC*BN))*Sin^2(\alpha/2)*Cos^2(\alpha/2), \quad (15)$$

$$\tau_{xy}=-((2*P)/\pi*OC*BN))*Sin(\alpha/2)*Cos^2(\alpha/2). \quad (16)$$

Величина ОС определяется из ΔОСВ по формуле

$$OC=CB/tg(\alpha/2). \quad (17)$$

При СВ=25 мкм и α=30° величина ОС составляет 93,31 мкм.

Значение величины BN зависит от расстояния между режущими кромками лезвий фрезы и соответствует BN_1=950 мкм, BN_2=1950 мкм и BN_3=2950 мкм.

Значение вертикальной силы Р, позволяющей выполнить разрушение покрытия по методу нанесения решетчатых надрезов, было выбрано по методическим документам ГОСАНЭПИД надзора, исходя из условий труда при проведении исследовательских работ средней физической нагрузки и составило 15 кг [17].

При подстановки указанных значений Р, ОС и BN в формулы (14), (15) и (16) для σ_x, σ_y и τ_{xy} получим следующие значения напряжений. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения нормальных и касательных напряжений при разрушении покрытия по методу решетчатых надрезов

Значения величин, мкм		Значения напряжений, МДж/м^3		
ОС	BN	σ_x	σ_y	τ_{xy}
93,31	950	920,29	65,99	255,30
93,31	1950	448,34	32,15	124,37
93,31	2950	296,36	21,25	82,21

Приведенные значения нормальных (σ_x и σ_y) и касательного (τ_{xy}) напряжений позволяет определить величины главных максимальных напряжений σ_{max} и τ_{max} по следующим формулам [18]

$$\sigma_{max}=((\sigma_x+\sigma_y)/2))+0,5*((\sigma_x-\sigma_y)^2+4*(\tau_{xy})^2)^{1/2}, \quad (18)$$

$$\tau_{max}=0,5*((\sigma_x-\sigma_y)^2+4*(\tau_{xy})^2)^{1/2}. \quad (19)$$

В таблице 2 приведены значения нормальных и касательных главных максимальных напряжений при различном шаге между лезвиями адгезиметра.

Таблица 2 – Значения нормальных и касательных главных максимальных напряжений при различном шаге между лезвиями адгезиометра

Величина шага между лезвиями, мкм	Значение главных максимальных напряжений, МДж/м^3	
	Нормальных	Касательных
950	990,76	497,62
1950	482,56	242,42
2950	319,04	160,24

Полученные значения главных максимальных нормальных и касательных напряжений в таблице 2 хорошо коррелируется со значениями адгезии, приведённые на рисунке 3. Как видно по графику адгезионная прочность покрытий, сформированных на основе различных полимеров, изменяется от 431 (полиметилметакрилат) до 827 МДж/м3 (карбамидоформальдегид). Этот диапазон значений адгезии перекрывается значениями главных максимальных нормальных и касательных напряжений при уменьшении условий надреза покрытий лезвиями, установленными с различным шагом. Малый шаг (950 мкм) рекомендуется для надреза тонких покрытий, большие шаги (1950 и 2950 мкм) для более толстых покрытий.

Представленные значения нормальных и касательных напряжений, согласованные с адгезионной прочностью различных покрытий на древесине и древесной подложке, могут стать основой разработки нормативных показателей для метода решетчатых надрезов. Это позволит дополнить стандартный метод испытаний количественной оценкой адгезии защитно-декоративных покрытий на древесине.

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что древесинное вещество, представляющее собой лигноуглеводный комплекс, состоящий из целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина, имеет хороший результат совместимости с полимерами, используемыми в технологии формирования защитно-декоративных покрытий в качестве пленкообразователей. Это подтверждается параметром совместимости плотности энергии древесинного вещества и изучаемых полимеров. Отсюда на поверхности контакта древесинное вещество – полимер должна наблюдаться достаточная адгезионная прочность, позволяющая формировать защитно-декоративные покрытия.

Для оценки адгезионной прочности контактирующих тел разработано значительное количество методов. Пригодность их для определения адгезии покрытий на древесине и древесных материалах вызывает некоторые трудности. Одни методы непригодны, так как покрытия должны формироваться не на древесине, а на металлической и др. подложках. Другие оценивают адгезию при закрытом контакте адгезив – субстрат, что противоречит сути получения защитно-декоративного покрытия на древесине. Многие из предлагаемых методов оценки адгезии требует использования сложных методик и точного оборудования, что относит их в разряд научно-исследовательских.

Метод решетчатых надрезов является одним из перспективных методов оценки адгезии покрытия на древесине и древесных материалах. Простота его методики проведения исследования, а также возможность использования, как в лабораторных, так и в цеховых условиях делает его предпочтительным перед всеми другими методами. Полученные предварительные оценочные показатели позволяют сделать вывод о возможности разработки нормативной базы для оценки адгезии покрытий древесины и древесных материалов на основе метода решетчатых надрезов.

Литература

1. Берлин А. А, Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1969. 320 с
2. Берлин А. А, Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. Изд. 2, доп. М.: Химия, 1974. 392 с.
3. Зимон А. А., Адгезия плёнок и покрытий. М.: 1977. 284 с.

4. Зотов А. А., Крисанов В.Ф., Санаев В. Г., Овчаренко Е. Е. Управления физико -механическими свойствами покрытий древесины: Учебное пособие. М.: МГУЛеса, 1998. 218с.

5. Москвитин Н. И. Физико-химические основы процессов склеивания и применение. М.: Лесная промышленость. 1974. 192 с.

6. Яковлев А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий / Учебное пособие для вузов. А.:Химия. 1981. 352 с.

7. Басин В. Е. Адгезионная прочность. М.: Химия, 1981. 208 с.

8. Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. Определение физических показателей полимеров для деревообработки по аддитивным функциям групповых вкладов химических структурных звеньев. //Лесной вестник/ ForestryBulletin. 2018. Т.22 №2. с. 68-75.

9. Якубович С. В. Испытания лакокрасочных материалов и покрытий. А.: Государственное научно - техническое издательство химической литературы. 1952. 482 с.

10.Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. Определение физических показателей лигноуглеводного комплекса древесинного вещества. // Лесной вестник/ ForestryBulletin. 2018. Т.22 №5. с. 94-102.

11.ВанКревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров. / пер. с англ. Ф. Ф. Ходжевановой: под ред. А. Я. Малкина. М.: Химия. 1976. 416 с.

12.Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивания. М.: Химия. 1974. 416 с.

13.Леонтьев Н. А. Технология статических вычислений. Изд. Второе, испр и доп. М.: Лесная промышленность, 1966. 246 с.

14.Пижурин А. А. Современные методы исследований технологических процессов в деревообработке. М.: Лесная промышленость, 1972. 248 с.

15.Зотов А. А., Игнатова Н. И. Повышение адгезии полиэфирных покрытий к натуральной древесине. М.: Деревообрабатывающая промышленность, 1985. №2. с. 9.

16.Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Г. С. Шапиро. 2 е изд. М.: Главная редакция физико-математической литературы. 1979. 500 с.

17.Бюллетень нормативных и методических документовГОССАНЭНПИД надзора. Выпуск 3(21), сентябрь. 2005.

18.Беляев Н.М. Сопротивления материалов/учебник для вузов. Издание седьмое, испр. и доп. М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1951. 855 с.

© Рыбин Б.М. – д-р техн. наук, профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки ФГБОУ ВО ««Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал» (МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)); e-mail:rybin@mgul.ac.ru; **Завражнова И.А.** – доцент кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал); e-mail: zavrazhnova@mgul.ac.ru; **Рыбин Д. Б.** — технолог ООО «Тимберланд», e-mail: wood@yandex.ru

UDC 684.4.059.1

ON THE ISSUE OF ASSESSING THE ADHESION OF COATINGS ON WOOD AND WOOD MATERIALS BY LATTICE INCISIONS

B. M. Rybin, I. A. Zavrazhnova, D. B. Rybin

In the technology of woodworking for the formation of protective and decorative coatings on wood and wood materials using a variety of film-forming substances. They are all polymers of a different tion of the method of curing. These include: polystyrene, polymethyl methacrylate, polyvinyl acetate, polyvinyl chloride, carbamide, phenolic resins and melamine-formaldehyde, nitrocellulose, polyurethane, and poliatilenglikol-maleate. The creation of high-quality coatings using them is primarily associated with obtaining sufficient adhesive strength at the junction of polymer-wood layers. This phenomenon is observed if there is physical compatibility between the materials in contact. It can be proved by using the thermodynamic compatibility parameter, which depends on the energy densities of the cohesion of the adhesive and the substrate. When considering substance as limnogeology complex you can define which polymers has yut compatibility with cellulose and hemicellulose, and some lignin. This approach has shown that almost all of these polymers are compatible with individual elements of the ligocarbon complex and gain in contact with them sufficient

adhesive strength with the wood substance. The assessment of adhesion strength in General should be carried out in reliable ways using the simplest methods. From this point of view, the preferred method of assessing the adhesive strength of polymers on wood is the method of lattice cuts. The method is easy to use both in the laboratory and in the shop floor. It has long been used in woodworking technology as one of the main methods of assessing the adhesion of polymers on wood and wood materials. Its disadvantage is the assessment of adhesion strength by qualitative indicators in the form of appropriate points. Preliminary standards of adhesive strength of polymer coatings on wood and wood materials were obtained in the work. For this purpose, an integrated approach was used to consider the complex issues of compatibility of the studied polymers with a chemical, the method of weak boundary layers of two contacting bodies, as well as elements of the theory of control. The obtained normative indicators of adhesive strength, although preliminary, are recommended for use in fundamental studies of the study of the contact of polymer compositions with wood substance.

Keywords: drevesine substance, polymeric resins, adhesion method of lattice cuts.

References

1. Berlin A. A, Basin V. E. Osnovy adgezii polimerov. M. : Himiya, 1969. 320 s

2. Berlin A. A, Basin V. E. Osnovy adgezii polimerov. Izd. 2, dop. M.: Himiya, 1974. 392 s.

3. Zimon A. A., Adgeziya plyonok i pokrytij. M.: 1977. 284 s.

4. Zotov A. A., Krisanov V.F., Sanaev V. G., Ovcharenko E. E. Upravleniya fiziko-mekhanicheskimi svojstvami pokrytij drevesiny: Uchebnoe posobie. M.: MGULesa, 1998. 218 s.

5. Moskvitin N. I. Fiziko-himicheskie osnovy processov skleivaniya i primene-nie. M.: Lesnaya promyshlenost'. 1974. 192 s.

6. YAkovlev A. D. Himiya i tekhnologiya lakokrasochnyh pokrytij / Uchebnoe posobie dlya vuzov. A.: Himiya. 1981. 352 s.

7. Basin V. E. Adgezionnaya prochnost'. M.: Himiya, 1981. 208 s.

8. Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Rybin D.B. Opredelenie fizicheskih pokazatelej polimerov dlya derevoobrabotki po additivnym funkciyam gruppovyh vkladov himicheskih strukturnyh zven'ev. //Lesnoj vestnik/ Forestry Bulletin. 2018. T.22 №2. c. 68-75.

9. YAkubovich S. V. Ispytaniya lakokrasochnyh materialov i pokrytij. A.: Gosudar-stvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo himicheskoj literatury. 1952. 482 s.

10.Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Rybin D.B. Opredelenie fizicheskih pokazatelej lignouglevodnogo kompleksa drevesinnogo veshchestva. // Lesnoj vestnik/ Forestry Bulletin. 2018. T.22 №5. c. 94-102.

11. Van Krevelen D.V. Svojstva i himicheskoe stroenie polimerov. / per. s angl. F. F. Hodzhevanovoj: pod red. A. YA. Malkina. M.: Himiya. 1976. 416 s.

12.Zimon A. D. Adgeziya zhidkosti i smachivaniya. M.: Himiya. 1974. 416 s.

13.Leont'ev N. A. Tekhnologiya staticheskih vychislenij. Izd. Vtoroe, ispr i dop. M.: Lesnaya promyshlennost', 1966. 246 s.

14.Pizhurin A. A. Sovremennye metody issledovanij tekhnologicheskih processov v derevoobrabotke. M.: Lesnaya promyshlenost', 1972. 248 s.

15.Zotov A. A., Ignatova N. I. Povyshenie adgezii poliefirnyh pokrytij k natu-ral'noj drevesine. M.: Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost', 1985. №2. s. 9 .

16.Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti: Per. s angl. / Pod red. G. S. SHa-piro. 2e izd. M.: Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury. 1979. 500 s.

17.Byulleten' normativnyh i metodicheskih dokumentov GOSSANENPID nadzora. Vypusk 3(21), sentyabr'. 2005.

18.Belyaev N.M. Soprotivleniya materialov/uchebnik dlya vuzov. Izdanie sed'moe, ispr. i dop. M.-L.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoj literatury. 1951. 855 s.

© **Rybin B.M.** - Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Wood Science and Wood Technology, Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education «Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University), Mytishchi branch» (MSTU named after N. E. Bauman (Mytishchi branch), e-mail: rybin@mgul.ac.ru; **Zavrazhnova LA.** - PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Wood Science and Wood Technology, Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education MSTU named after N. E. Bauman (Mytishchi branch), e-mail: zavrazhnova@mgul.ac.ru; **Rybin D.B.** - technologist of Ltd «Timberland», e-mail: wood@yandex.ru.

УДК 674.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУХОСТОЙНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АРБОЛИТА

В.Ф. Краснова, Д.А. Зотов

В работе рассмотрен вопрос возможности использования сухостойной древесины в качестве сырья для производства арболита. Изучено влияние сухостойной древесины на цементное тесто и её взаимодей-ствие с химическими добавками. Также произведено сравнение образцов с использованием сырья из сухостойной и здоровой древесины.

Ключевые слова: *древесные композиционные материалы, арболит, сухостойная древесина, цементное тесто, химические добавки*

Введение

Древесина с древних времен использовалась человечеством в различных сферах жизни. Постоянно растущее потребление древесины и её нерациональное применение привели к недостатку этого возобновляемого ресурса, поэтому перспективным направлением в настоящее время является использование и переработка древесных отходов и низкосортной древесины.

На сегодняшний день особенно остро стоит проблема сухостойных лесов (рис.1). Большие объемы ценной древесины усыхают по всей стране. Зачастую такая древесина не рассматривается как ликвидный материал, а просто сжигается, ввиду своей низкой рентабельности и сложности в обработке.

Рис. 1. Сухостойный лес

Сухостой – это засохшие, прекратившие жизнедеятельность, но стоящие на корне деревья. Сухостой может быть в виде одиночных деревьев или групп, бывают случаи усыхания целых лесных массивов. Причины усыхания деревьев: предельный возраст растений (естественная старость), засуха, понижение уровня грунтовых вод, заболачивание, морозы, заморозки, солнечные ожоги, уплотнение почвы при неправильной пастьбе скота в лесу, лесные пожары, массовое распространение вредных насекомых и грибных болезней [1].

Одним из немногих материалов, который зарекомендовал себя как хороший строительный и теплоизоляционный материал, является арболит.

Арболит – это разновидность легкого бетона, изготовленного из смеси органических целлюлозных заполнителей растительного происхождения (дробленых отходов деревообработки, костры конопли, льна, сечки стеблей хлопчатника, камыша, стружки - отходов и т.д.), минерального вяжущего (обычно портландцемента), химических добавок и воды.

Изделия из арболита, имея сравнительно невысокую среднюю плотность– 400-850 кг/м^3, обладают отличными строительными, физико-техническими свойствами. Они легко поддаются сверлению,

обработке режущим инструментом и оштукатуриванию. В них можно забивать гвозди и ввинчивать шурупы. Арболитимеет низкую теплопроводность, обладает отличной воздухопроницаемостью и звукоизоляцией, плохо поддерживает горение, морозо- и биостоек и долговечен [2].

Основной проблемой при производстве арболита является наличие в древесине «цементных ядов», которые негативно влияют на цементное тесто и препятствуют повышению прочности материала.

К числу компонентов древесины, которые отрицательно воздействуют на цемент, следует отнести гемицеллюлозу, крахмал и экстрактивные вещества.

Воздействие водорастворимых веществ древесины на твердеющий цемент проявляется в стабилизирующем эффекте. «Цементные яды», состоящие в основном из углеводных групп HOCH, осаждаясь на поверхности частичек минералов цемента $3CaO \cdot SiO_2$ (трехкальциевый силикат) и $3CaO \cdot Al_2O_3$ (трехкальциевый алюминат), образуют тончайшие оболочки, которые затрудняют ход процессов гидратации цемента.Для уменьшения отрицательного влияния водорастворимых экстрактивных и легкогидролизуемых веществ на прочность деревоцементных композиций были предложены различные способы и технологические приемы, сущность которых заключалась в частичном удалении этих веществ из древесного заполнителя, в переводе простейших сахаров в нерастворимые или безвредные для цемента соединения, в ускорении твердения портландцемента (т.е. в сокращении времени их воздействия на процессы твердения). В большинстве своем предложенные способы "минерализации" древесного заполнителя предусматривают достаточно сложные технологические процессы, требующие многоступенчатой обработки заполнителя различными химикатами с последующим кипячением или промывкой, выдержки для стабилизации в силосах или сушки и др.[3].

Виды применяемых химических добавок в арболит рассматривались в работе [4]. Так универсальными являются добавки - ускорители, они способствуют более быстрому набору прочности и дешевы в производстве. К ним относятся: сульфат натрия, нитрат натрия, хлорид кальция, нитрат кальция. Для снижения негативного влияния «цементных ядов» применяют добавки - минерализаторы, в основном, жидкое натриевое стекло. Суть его действия заключается в образовании пленки вокруг древесины для снижения влияния сахаров на цементное тесто.

Одним из способов снижения содержания сахаров в древесине был предложен в работе[5]. В ней рассматривалась процедура предварительной термомодификации древесного наполнителя путем нагрева ВЧ-плазмой. Авторами [5] было выявлено, что термомодификация древесного наполнителя не только снижает количество «цементных ядов» в древесине, но и повышает её адгезионные свойства за счет расширения и упорядочивания пор в древесине.

Вопрос о возможностях переработки сухостойной древесины рассматривался в работах [6,7].

В работе авторов [6], рассматриваются свойства беленой целлюлозы полученной из усыхающей древесины сосны. Ими было выявлено, что сухостойная древесина со сроком усыхания до 5 лет мало уступает, по качеству древесине растущего дерева.

В исследованиях [7], была рассмотрена переработка сухостойной и усыхающей древесины ели бисульфитным способом. В результате исследования было установлено, что при усыхании значительно изменяется содержание экстрактивных веществ и легкогидролизуемых полисахаридов.

Влажность сухостойной древесины по итогам работы [7], примерно одинакова по всей длине ствола и составляет 23…25%, тогда как у здоровых деревьев влажность увеличивается от комля к вершине и составляет более 90%. Это может положительно сказаться на сокращении времени выдержки древесного сырья для производства арболита.

Методы и материалы

Для проведения испытаний были изготовлены образцы теплоизоляционного арболита марки М10 с классом прочности на сжатие В0,75 по ГОСТ 19222-84 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия» [8].

В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» [9].

В качестве древесного наполнителя использовались отходы от производства оцилиндрованного бревна (рис. 2) из здоровой и сухостойной древесины с фракционным составом на контрольных ситах диаметром 20, 10 и 5 мм.

Наполнитель из здоровой древесины выдерживался при комнатной температуре в течение 3 месяцев. Перед изготовлением образцов из наполнителя вручную была удалена кора. В наполнителе из сухостойной древесины кора отсутствовала.

Рис. 2. Отходы от производства оцилиндрованного бревна

Определение предела прочности при сжатии проводилось на разрывной машине типа Р-10 (рис. 3) по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»[10].

Рис. 3. Испытание арболита напредел прочности при сжатии на разрывной испытательной машине типа Р-10

В качестве химических добавок использовались:

– Хлорид кальция, представляющий собой вещество в виде кристаллов белого цвета. Он оказывает влияние на цемент, ускоряя его твердение, и тем самым снижает время негативного влияния «цементных ядов» находящихся в древесине;

– Жидкое натриевое стекло представляет собой бесцветный или слегка окрашенный взелёный или жёлтый цвета, прозрачный затвердевший расплав, состоящий из щелочных силикатов. Жидкое натриевое стекло, оказывает влияние на древесную щепу, образуя вокруг нее пленку препятствующую выходу «цементных ядов» из древесины.

Результаты исследований

Проведены экспериментальные исследования влияния сухостойной древесины на качество арболита.

Для испытаний было изготовлено 3 партии по 5 образцов в каждой. В первой партии в качестве наполнителя использовали отходы от производства оцилиндрованного бревна из здоровой древесины и жидкое натриевое стекло в качестве химической добавки. Во второй партии использовалиотходы от производства оцилиндрованного бревна из сухостойной древесины, а в качестве химической добавки хлорид кальция. В третьей партии использовалиотходы от производства оцилиндрованного бревна из сухостойной древесины, а в качестве химических добавок использовали смесь из хлорида кальция и жидкого натриевого стекла в соотношении 1:1. Образцы готовые к испытаниям представлены на рисунке 4.

Рис. 4. Арболитовые образы в форме куба

По полученным данным (табл. 1) видно, что наибольшийпредел прочность при сжатии имеют образцы на основе отходов от производства оцилиндрованного бревна из сухостойной древесины с добавлением жидкого натриевого стекла и хлорида кальция.

Более низкие показатели предела прочности при сжатии арболита из сухостойной древесины с применением хлорида кальция могут быть обусловлены тем, что полностью «цементные яды» не пропадают из древесины и добавление жидкого натриевого стекла значительно повышает конечную прочность блоков.

Таблица 1 – Результаты испытаний

№ п/п	Усилие сжатия при разрушении P, Н	Площадь поперечного сечения F, мм^2	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа
1	2	3	4
Арболит из здоровой древесины с применением жидкого натриевого стекла			
1	24500	21016	1,05
2	24400	21754	1,01
3	27146	21404	1,14
4	15778	22500	0,65
5	20188	22200	0,82
$R_{сж}^{ср}$			0,93
Арболит из сухостойной древесины с применением хлорида кальция			
1	15400	22350	0,68

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
2	17600	22350	0,76
3	17600	22344	0,76
4	22600	23104	0,92
5	15200	22484	0,67
$R_{сж}^{ср}$			0,76
Арболит из сухостойной древесины с применением жидкого натриевого стекла и хлорида кальция			
1	20700	21300	0,97
2	24300	22185	1,09
3	23700	22500	1,05
4	23100	22644	1,02
5	22600	22344	1,01
$R_{сж}^{ср}$			1,03

Плотность теплоизоляционного арболита по ГОСТ 19222-84 должна быть в пределах 450-550 кг/м^3. Наивысшую плотность (535 кг/м^3) показали образцы из сухостойной древесины с добавлением хлорида кальция и жидкого натриевого стекла. Средняя плотность образцов из сухостойной древесины с добавлением хлорида кальция составила 460 кг/м^3. Контрольные образцы из здоровой древесины показали среднюю плотность 510 кг/м^3.

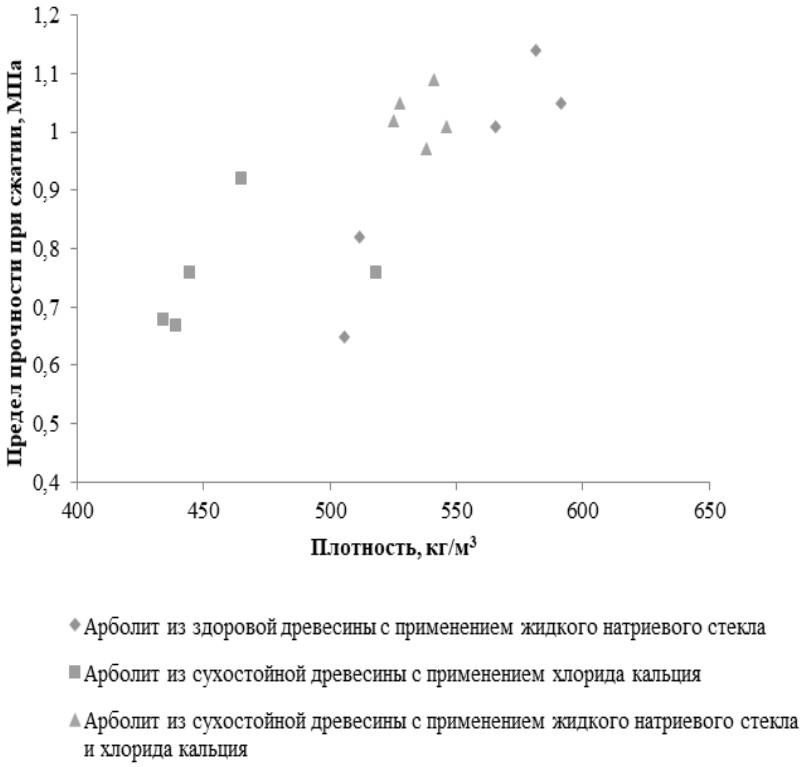


Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии от плотности арболитовых образцов

Согласно графику (рис. 5) можно сделать вывод о том, что арболит из сухостойной древесины с добавлением смеси из хлорида кальция и жидкого натриевого стекла обладает более высокими и постоянными физико-механическими показателями, в сравнении с образцами в которых использовался только ускоритель (хлорид кальция) или минерализатор (жидкое натриевое стекло).

Выводы

Результаты исследования о возможности использования сухостойной древесины в качестве сырья для производства арболита показали, что изготовленные образцы с применением в качестве

наполнителя отходов от производства оцилиндрованного бревна из сухостойной древесины соответствуют требованиям ГОСТ 19222-84 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

В качестве химических добавок рекомендуется использовать смесь из минерализатора (жидкое натриевое стекло) и добавки-ускорителя (хлорид кальция).

Литература

1. Большая Советская Энциклопедия. - М.: Советская Энциклопедия, 1970. - 933 с.
2. Мельникова Л. В. Технология композиционных материалов из древесины: Учебник для студентов спец. «Технология деревообработки» 2-е изд., испр. и доп. / Л. В. Мельникова – Москва : МГУЛ, 2004. - 234 с.: ил.
3. Наназашвили И.Х. Арболит – эффективный строительный материал. – М.: Стройиздат, 1984. – 121 с.
4. Зотов Д.А. Применение химических добавок для изготовления арболита / Д.А. Зотов, В.Ф. Краснова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Воронеж. – 2018. Т.6. №40. С. 38-41.
5. Сафин, Р.Р. Экспериментальное исследование физического эффекта обработки древесных отходов ВЧ-плазмой/ Р.Р. Сафин, Л.И. Аминов, Е.Ю. Разумов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность, 2009г. - №1 - С.24-26.
6. Севастьянова Ю.В., Фетюкова Н.Н., Невзорова И.М. О возможности использования древесины усыхающей ели для производства бисульфитной целлюлозы высокого выхода. -Лесной журнал, 2014, №1, с. 133-139.
7. Матюшкина А.П., Агеева М.И. Свойства древесины и целлюлозы из сухостоя сосны. В сб. Физико-химические исследования древесины и ее комплексное использование. Изд-во Карельского филиала АН СССР, Институт леса, Петрозаводск, 1978, с.24-38.
8. ГОСТ 10180 – 2012.Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Москва:Стандартинформ, 2013. – 30 с.
9. ГОСТ 31108 – 2016. Цементы общестроительные. Технические условия – Москва: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
10. ГОСТ 19222 – 84. Арболит и изделия из него. Общие технические условия – Москва: Изд-во стандартов, 1985. – 22 с.

© **Краснова В.Ф. –** канд. техн. наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»), e-mail: KrasnovaVF@volgatech.net; **Зотов Д.А. –** магистрант, ФГБОУ ВО «ПГТУ», e-mail: zotov.dmitrij2012@yandex.ru.

UDC 674.8

THE USE OF DEAD WOOD AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF THE WOOD CONCRETE

V.F. Krasnova, D.A. Zotov

The paper considers the possibility of using dead wood as a raw material for the production of arbolite. The effect of dead wood on cement dough and its interaction with chemical additives was studied. Also, the samples were compared using raw materials from dead and healthy wood.

Keywords: *wood composite materials, cement wood, dead wood, cement paste, chemical additives.*

References

1. Bol'shaya Sovetskaya Enciklopediya. - M.: Sovetskaya Enciklopediya, 1970. - 933 s.
2. Mel'nikova L. V. Tekhnologiya kompozicionnyh materialov iz drevesiny: Uchebnik dlya studentov spec. «Tekhnologiya derevoobrabotki» 2-e izd., ispr. i dop. / L. V. Mel'nikova – Moskva : MGUL, 2004. - 234 s.: il.
3. Nanazashvili I.H. Arbolit – effektivnyj stroitel'nyj material. – M.: Strojizdat, 1984. – 121 s.

4. Zotov D.A. Primenenie himicheskih dobavok dlya izgotovleniya arbolita / D.A. Zotov, V.F. Krasnova // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. Voronezh. – 2018. T.6. №40. S. 38-41.

5. Safin, R.R. Eksperimental'noe issledovanie fizicheskogo effekta obrabotki drevesnyh othodov VCH-plazmoj/ R.R. Safin, L.I. Aminov, E.YU. Razumov [i dr.] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost', 2009g. - №1 - S.24-26.

6. Sevast'yanova YU.V., Fetyukova N.N., Nevzorova I.M. O vozmozhnosti ispol'zovaniya drevesiny usyhayushchej eli dlya proizvodstva bisul'fitnoj cellyulozy vysokogo vyhoda. -Lesnoj zhurnal, 2014, №1, s. 133-139.

7. Matyushkina A.P., Ageeva M.I. Svojstva drevesiny i cellyulozy iz suhostoya sosny. V sb. Fiziko-himicheskie issledovaniya drevesiny i ee kompleksnoe ispol'zovanie. Izd-vo Karel'skogo filiala AN SSSR, Institut lesa, Petrozavodsk, 1978, s.24-38.

8. GOST 10180 – 2012.Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam. – Moskva:Standartinform, 2013. – 30 s.

9. GOST 31108 – 2016. Cementy obshchestroitel'nye. Tekhnicheskie usloviya – Moskva: Standartinform, 2016. – 12 s.

10. GOST 19222 – 84. Arbolit i izdeliya iz nego. Obshchie tekhnicheskie usloviya – Moskva: Izd-vo standartov, 1985. – 22 s.

© **Krasnova V.F.–** PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Woodworking production «Volga State University of Technology» («VSUT»), e-mail: KrasnovaVF@volgatech.net; **Zotov D.A. –** master's Degree student, «VSUT», e-mail: zotov.dmitrij2012@yandex.ru.

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 х 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 х 5 см (шрифт «Times New Roman»).

Образец оформления статьи указан в конце журнала.

Химическая технология древесины

УДК 66.046

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО МАТЕРИАЛА, АКТИВИРОВАННОГО ПАРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Д.Б. Просвирников, Р.Р. Сафин, Р.Р. Козлов

В данной статье приведены результаты исследований физико-химических свойств и структуры лигноцеллюлозного материала, активированного паровзрывной обработкой. При проведении исследований применяли следующие методы: дифференциально-сканирующая калориметрия с применением калориметра DSC 823e итермогравиметрического анализатора (дериватографа) TGA/DSC1, микроскопия с применением микроскопа LEXT4000, ИК-Фурье спектрометрия с применением спектрометра Spectrum BX II, ретгенофазный анализ с применением порошкового дифрактометра D2 PHASER. Получены научные знания о деструкции лигноуглеводного комплекса в условиях паровзрывной обработки и изменении аморфно-кристаллической структуры волокна. Полученные данные позволят направленно регулировать свойства композитов, получаемых на основе активированного материала, а также режимы термопластического воздействия на сам материал.

***Ключевые слова**: паровзрывная обработка, активированный материал, термический анализ, морфология, структура, лигнин, гемицеллюлозы, целлюлоза*

Введение

Проблема утилизации растительных отходов, образование значительного объема которых в лесозаготовительной, деревообрабатывающей и сельскохозяйственной отраслях обуславливается нерациональным использованием растительного, в частности древесного сырья на предприятиях соответствующего профиля, является весьма актуальной [2,7, 11-13]. Наряду с этим в современном мире с каждым годом растет спрос на новые экологически безопасные технологии переработки растительного сырья. Растительная биомасса, в том числе и древесина, обладая уникальными свойствами, строением и компонентным составом, является органическим сырьем, при грамотном воздействии на которое возможно получить как ценнейшие химические продукты, так и волокнистые полуфабрикаты. Использование современных высокоэффективных технологических подходов при организации данных потенциально востребованных производств позволит существенно развить новые технологии комплексной переработки возобновляемого растительного сырья [9].

Одним из направлений использования растительных отходов является производство композиционных материалов - древесноволокнистых и древесностружечных плит, применяемых в строительстве и мебельной промышленности. Однако производство подобных материалов обладает рядом недостатков, например:

- в качестве адгезивов для связывания волокон и частиц используются синтетические термореактивные смолы, оказывающие неблагоприятное воздействие на окружающую среду и человека, как в процессе производства, так и при дальнейшей эксплуатации;
- синтетические связующие очень дороги - их стоимость составляет большую часть стоимости готового изделия [5].

Одним из путей практического применения подхода эффективной утилизации древесных отходов является организация экологически чистого процесса высокотемпературной паровзрывной обработки [15], результирующим продуктом которого является освобожденное от гемицеллюлоз лигноцеллюлозное волокно с высокой удельной поверхностью и реакционной способностью [3,6, 14]. Данный метод может быть реализован в способе получения плитных композиционных материалов из отходов древесины без использования вводимых извне связующих веществ, что значительно удешевляет их получение и придает им улучшенные технические характеристики. Применение процесса паровзрывной обработки при получении плитных композиционных материалов базируется на том, что основой этого способа является глубокая физико-химическая модификация лигноуглеводного

комплекса перегретым водяным паром, благодаря чему образуются вещества, способствующие «самосклеиванию» частиц в процессе последующего горячего прессования композита.

Чтобы достичь высоких качественных показателей плитных материалов и снизить затраты на их производство, необходимо выявить закономерности процессов, происходящих в древесине при паровзрывной обработке, а именно: физико-химические преобразования лигноуглеводного комплекса и структуры материала в целом. Эти данные позволят направленно регулировать свойства композитов, получаемых на основе активированного материала, а также режимы термопластического воздействия на сам материал.

Методы и материалы

Образцы лигноцеллюлозного материала, активированного паровзрывной обработкой, получали на установке, описанной в [1,4], при следующих режимах: температура паровзрывной активации 160-240 °С, время обработки 5 мин, среда – насыщенный водяной пар, материал – древесина осины и сосны с размером частиц 5х5х10 мм.

Для установления разницы тепловых потоков в образцах диспергированного капиллярно-пористого лигноцеллюлозного материала с целью определения теплофизичеких свойств, получения ценной информации о составе, термической стабильности, фазовых переходах и кинетике химических реакций использовали термоаналитический метод с применением дифференциального сканирующего калориметра DSC 823e и термогравиметрического анализатора (дериватографа) TGA/DSC1. Были проведены исследования термогравиметрии / масс-спектрометрии (ТГ/МС) для изучения различий в термическом разложении исходного, промытого горячей водой лигноцеллюлозного материала и активированного паровзрывной обработкой лигноцеллюлозного материала при 220 °С. Определялась динамика разложения, а также термическая стабильность обработанных и необработанных образцов. Образцы необработанного, промытого и активированного лигноцеллюлозного материала (древесина сосны и осины) были измельчены до размера менее 1 мм с последующим измельчением до размера частиц менее 0,12 мм на роторной мельнице. Часть образцов исходного лигноцеллюлозного материала промывали при 60 °С горячей водой в течение 2 часов. После обработки горячей водой образцы отфильтровывали и сушили при 105 °С. Примерно 3 мг образцов были выдержаны в атмосфере аргона при скорости потока 140 мл/мин. Образцы нагревали со скоростью 20 °С/мин от 25 до 950 °С в платиновом сосуде для образцов. Продукты термообработки были введены через металлический капилляр со стеклянной футеровкой, нагретый до 300 °С, в ионный источник масс-спектрометра, который работал при энергии 70 эВ.

Дифференциальный сканирующий калориметр DSC 823e использовался также для определения тепловых эффектов, наблюдающихся при гидротермической обработке лигноцеллюлозного материала. Порции измельченных до состояния крошки сухих образцов лигноцеллюлозного материала (древесина осины) смешивали с определенным количеством воды или разбавленной серной кислоты. Смешанные образцы загружали в специальные ячейки калориметра из нержавеющей стали с уплотнительными кольцами и плотно герметизировали. Нагрев проводили при скорости 5 °С/мин от 0 до 220 °С. При этом верхняя температура нагрева была выбрана так, что она совпадала с максимально безопасным рабочим давлением ячеек. Дополнительный контрольный образец исходного лигноцеллюлозного материала загружали в алюминиевый поддон с перфорированной крышкой. Его предварительно нагревали до 100 °С для удаления остаточной влаги, повторно охлаждали и затем нагревали со скоростью 5 °С/мин до 350 °С.

Оценку качественного состава диспергированных и модифицированных капиллярно-пористых материалов, в том числе наличие и содержание функциональных групп в образцах активированной древесины проводили методом ИК-Фурье спектрометрии на спектрометре Tensor 27 – для получения спектральных характеристик компонентов диспергированного капиллярно-пористого лигноцеллюлозного материала с целью оценки кинетики реакций (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлоз). Регистрацию спектров образцов проводили на отражение. Для съемки прессовали таблетки с применением KBr.

Экспериментальные исследования изменения энергетической структуры связей компонентов в лигноцеллюлозном материале проводили по степени полимеризации и индексу кристалличности целлюлозосодержащих продуктов в пробах полученного материала. Для данной оценки применялся метод ретгенофазного анализа дисперсных и кристаллических свойств модифицированных капиллярно-

пористых материалов на порошковом дифрактометре D2 PHASER. Кривые интенсивности рентгеновского рассеяния исходных и порошковых целлюлоз снимали на данном дифрактометре при излучении CuKα, в диапазоне углов 2θ=4-40°C. Образцы использовали без дополнительной обработки после прессования в виде таблеток. По рентгенограммам оценивали изменения индекса кристалличности, средние размеры кристаллитов определяли микроскопическим методом.

Экспериментальные исследования изменения структуры клеточной стенки после паровзрывной обарботки проводили путем косвенного анализа морфологических свойств капиллярно-пористых материалов с применением методов микроскопии с использованием конфокального лазерного сканирующего 3D микроскопа LEXT4000.

Результаты

На рисунке 1 приведены кривые ТГА для образцов необработанного, промытого и активированного паровзрывной обработкой лигноцеллюлозного материала (сосна, температура обработки - 220 °C). На выход полукокса образцов материала большое влияние оказывает два фактора: содержание лигнина и содержание щелочных ионов. Лигнин производит около 30 % полукокса, в то время как целлюлоза дает только около 5 %, а гемицеллюлоза имеет около 5-10 %. Содержание щелочных ионов оказывает каталитическое влияние на реакции обугливания: чем выше содержание щелочных ионов в материале, тем выше выход полукокса и выделение газа во время термического разложения. Количество углеродистого остатка образцов, обработанных горячей водой ниже, чем у исходных образцов, так как большая часть щелочных ионов растворилась при промывке горячей водой. Деполимеризация является основным механизмом при термическом разложении целлюлозы, поэтому более низкий выход наблюдается в промытых образцах. Хотя большая часть ионов калия и натрия была устранена насыщенным водяным паром во время паровзрывной обработки, во время термогравиметрического измерения образовалось больше полукокса. Это наблюдение можно объяснить изменением состава образцов древесины во время паровзрывной обработки: относительное количество лигнина было увеличено из-за значительного уменьшения фракции гемицеллюлозы. Рис. 2 показывает значительные изменения в механизме разложения для образцов, активированных паровзрывной обработкой. Основной пик ДТГ можно отнести к термическому распаду целлюлозы. Значения максимальной скорости термического разложения ($ДТГ_{max}$) исходных образцов составляет 0,347 % $с^{-1}$ при 391 °C.

После промывки разложение сдвигается до чуть более высокого температурного диапазона с более высоким значением $ДТГ_{max}$ - 0,407 % $с^{-1}$ при 397 °C.

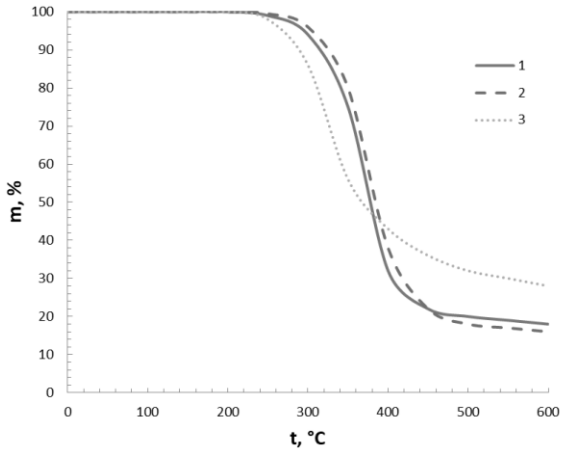


Рис. 1. ТГ кривые необработанного (1), промытого (2) и активированного (3) лигноцеллюлозногоматериала

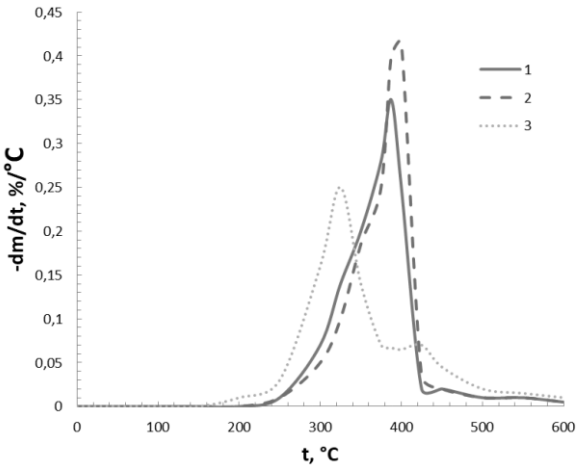


Рис. 2. ДТГ-кривые необработанного (1), промытого (2) и активированного (3) лигноцеллюлозногоматериала

Плечо на пике ДТГ можно отнести к разложению гемицеллюлоз, которые намного лучше отделяются после обработки горячей водой. Большая часть фракции гемицеллюлоз была удалена во время паровзрывной обработки, поэтому относительное количество модифицированной фракции лигнина и целлюлозы увеличилась в составе образцов. Максимальная скорость термического

разложения наблюдается при температуре около 330 °С ($Т_{пик}$) в случае образцов активированного лигноцеллюлозного материала. Внутри- и межмолекулярные водородные связи были разорваны во время паровзрывной обработки, а кристалличность целлюлозы была изменена во время предварительной обработки. Молекулы целлюлозы, вероятно, также были фрагментированы. В связи с этими изменениями в структуре целлюлозы, $Т_{пик}$ и соответствующее значение $ДТГ_{max}$ снизились. Термическое разложение активированной сосны кончается выше 500 °С. Плечо при температуре около 420 °С на кривых ДТГ активированных образцов можно отнести к относительно увеличенному количеству лигнина.

Рисунок 3, (а – в) иллюстрирует кривые ДТГ, а также профили выхода нескольких важных продуктов (фрагменты ДТГ) термического разложения необработанного, промытого и активированного лигноцеллюлозного материала сосны. Фрагменты *m/z 95* и *m/z 96* можно отнести к фурфуролу, образованному как из гемицеллюлозы, так и из целлюлозы.

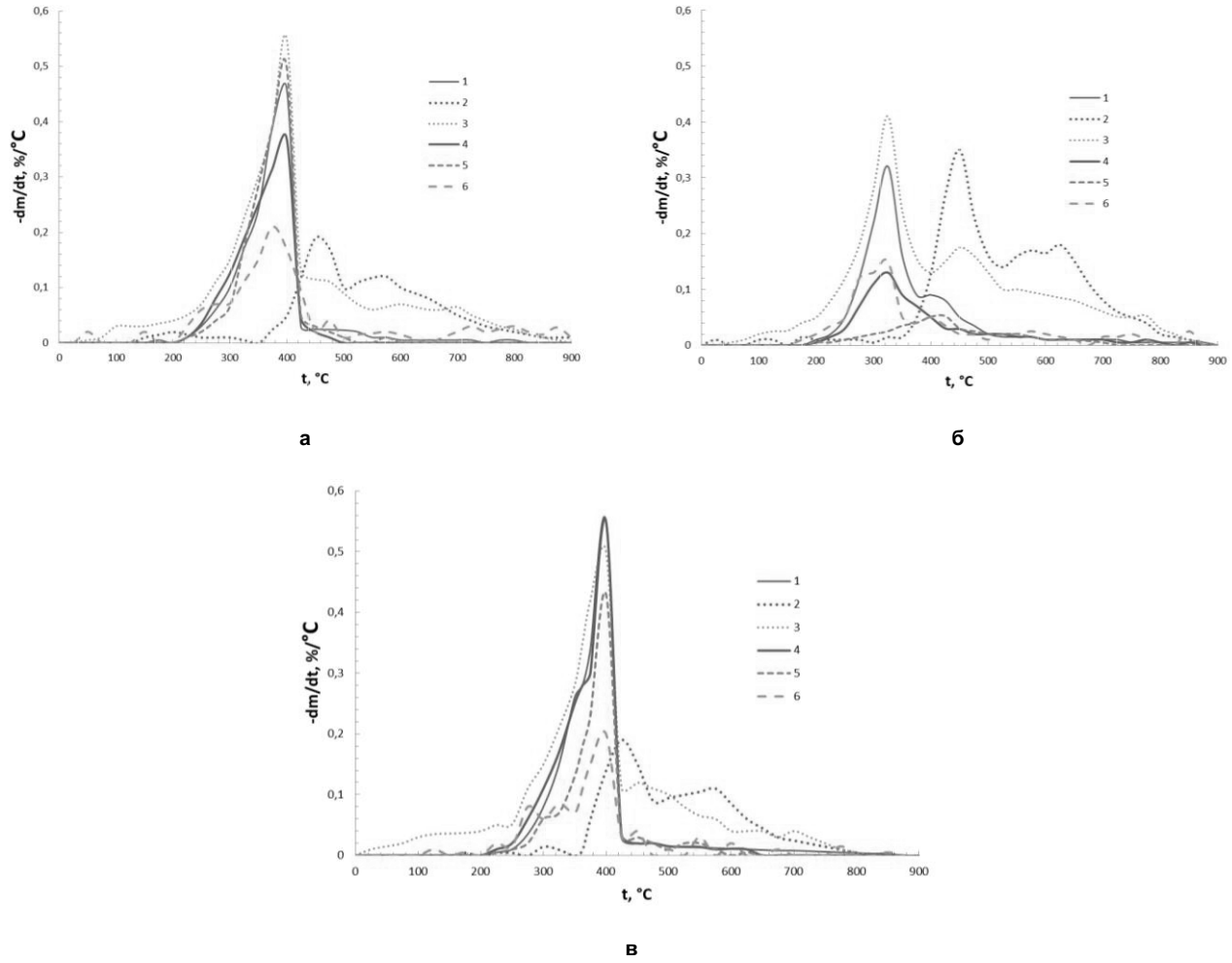


Рис. 3. Кривые ДТГ и их фрагментов для сосны: а) исходной, б) промытой, в) активированной паровзрывной обработкой (1- ДТГ, 2 - m/z 16, 3 - m/z 18, 4 - m/z 30, 5 - m/z 31, 6 - m/z 95 и m/z 96)

Относительно высокий выход воды (*m/z 18*) наблюдается во время термического разложения древесины из-за большого количества гидроксильных групп, присутствующих в углеводах и лигнине. Вероятно, что фрагмент *m/z 30* представляет собой в основном формальдегид. К фрагментам других молекул можно отнести интенсивность фрагмента *m/z 30* в меньшей степени, поскольку продукты с высокой молекулярной массой не могут быть проанализированы данным методом.

Формальдегид (*m/z 30*) представляет собой продукт деструкции по большей части гемицеллюлоз, а также возможно целлюлозы и лигнина. Фрагмент *m/z 31* образуется в основном в результате выделения метанола во время термического разложения.

С другой стороны, этот фрагмент может быть образован из продуктов разложения, например, гидроксиацетальдегида, который высвобождается из целлюлозы. Образование метана контролируется его молекулой фрагмента (*m/z 16*). Масс-спектрометрическая кривая *m/z 16* может быть отнесена исключительно к метану, потому что *m/z 16* фрагментов воды, окиси углерода и диоксида углерода были вычтены программой анализа. Образование фрагментов метилиона (*m/z 15*) параллельно с образованием молекулы метана *m/z 16* в интервале температур 350-750 °C, который может образовываться в течение двух основных реакций. Первый пик метана (от 350 до 470 °C) на масс-спектрометрической кривой необработанного образца сосны (рис. 3, а) можно отнести к термическому разложению фракции лигнина. Процессы медленного обугливания начинаются примерно при 470 °C и продолжаются ориентировочно до 750 °C с выделением метана. Эти процессы замечены на масс-спектрометрической кривой метана во время термического разложения промытого образца сосны (рис. 3, б). Во время термического разложения сосны, активированной паровзрывной обработкой (рис. 3, в), усилилось выделение метана между 370 и 510 °C, что объясняется повышенным соотношением лигнина в образце активированной сосны.

Плечо на кривых ДТГ при температуре около 340 °C, характеризующееся масс-спектрометрическими пиками (метанол, формальдегид, фурфурол и вода на рис. 3, а и б), демонстрирует наличие гемицеллюлозы в исходных и обработанных горячей водой образцах. Это плечо исчезает во время термического разложения активированного образца, так как в процессе паровзрывной активации происходит глубокий гидролитический распад гемицеллюлоз (рис. 3, в). Образование воды, формальдегида и фурфурола показывает, что распад целлюлозы в активированном образце под действием температуры сместился в сторону более низкой температуры (от 200 до 400 °C), что указывает на уменьшение молекулярной массы или изменение кристаллической структуры целлюлозы в процессе паровзрывной обработки (рис. 3, в).

Таким образом, результаты показывают, что содержание гемицеллюлозы при паровзрывной обработке снижается, в то время как относительные количества целлюлозы и лигнина увеличиваются. Пониженная термостойкость активированного образца древесины сосны указывает на изменение структуры целлюлозы (например, кристалличность, степень полимеризации).

На рисунке 4 представлены термограммы образцов. Сухая лигноцеллюлозная масса (кривая 1), размещенная на поддоне, показала прогрессирующую экзотерму с начальной температурой около 240 °C, которая связана с реакциями пиролиза и выделением летучих продуктов из гемицеллюлозного компонента.

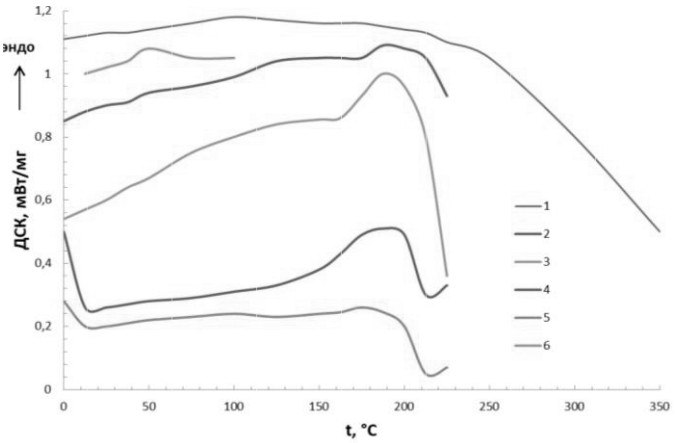


Рис. 4. ДСК-кривые образцов: 1) - измельченного и предварительно высушенного исходного лигноцеллюлозного материала, 2) измельченный лигноцеллюлозный материал в герметичной ячейке среднего давления при содержании воды 0,10 мл / г, 3) то же при 0,25 мл / г содержании воды, 4) то же при смачивании 1 мл / г 0,1 М H_2SO_4, 5) то же при смачивании 1 мл / г 0,15 М H_2SO_4, 6) пример пика релаксации лигнина

Смачивание лигноцеллюлозного материала привело к развитию острой экзотермы (кривая 2) со значительно более низким началом около 190 – 195 °C, что свидетельствует о влиянии гидролитической среды в отличие от сухих термических реакций гемицеллюлозы. Гидротермический экзотермический эффект усиливался с увеличением содержания воды (кривая 3), при этом начальная температура относительно кривой 2 оставалась постоянной, хотя максимум пика был выше предела 220 °C для

герметичных ячеек калориметра. Такой характер экзотермы влажного лигноцеллюлозного материала также подтверждает, что гидротермические реакции активируются при относительно высоком содержании твердых веществ.

Влажный лигноцеллюлозный материал также показал экзотермическое проявление около 150–175 °C, которая сместилась к более низкой температуре и стала немного больше с увеличением содержания воды. Возможно, это связано с неоднородным смешиванием, так как структура самой клеточной стенки достигает достаточной тепловой подвижности, необходимой для обеспечения проникновения воды. Приблизительная интеграция пика дала энтальпию около -20 Дж/г сухой массы, что слишком мало для полной теплоты смачивания, что составляет приблизительно -130 Дж/г для целлюлозы. Эндотермическое событие последовало при более высокой температуре - около 160–180 °C, и это событие предшествовало основной экзотерме, что также наблюдалось для материалов, подвергающихся пиролизу. Такой характер обычно относится к реакциям типа плавления или сжижения, где разрушается структурный порядок и повышается энтропия, которая может возникнуть в гемицеллюлозе или лигнине.

Основная экзотерма, вероятно, имеет химическое происхождение, сходное с экзотермическим событием, наблюдаемым при более высоких температурах после пиролиза сухих полисахаридов и сахаров. Эти сложные реакции трудно проследить, что в конечном итоге приводит к разложению сахаров до муравьиной, уксусной и других кислот, воды и углекислого газа, включая образование ароматических смолистых атомов. Однако, дегидратация ксилозы с образованием фурфурола является важной промежуточной реакцией, которая согласно простому расчету энергий связи имеет изменение энтальпии около -800 Дж/г. Следовательно, эта или связанные реакции дегидратации составляют, по меньшей мере, часть основной гидролитической экзотермы во влажном состоянии.

Вода, как показали исследования, способствует растворению реагентов и/или продуктов и может действовать как дополнительный реагент в образовании активированных промежуточных соединений. Точный баланс реакций и связанной с ними кинетики будет зависеть от уровня гидратации клеточной стенки лигноцеллюлозы и, возможно, от способа предварительного смачивания.

Высвобождение уксусной и муравьиной кислот во время гидротермической обработки вызывает автокаталитический эффект. Однако прямое добавление минеральной кислоты будет оказывать гораздо большее влияние на скорость реакции и, возможно, также на механизм реакций. В этом исследовании для измерений готовили серию смесей измельченного лигноцеллюлозного материала с добавлением концентраций серной кислоты 0,05, 0,1 или 0,2 М для получения содержания жидкости 1 мл/г. В результате этого исследования было выявлено, что экзотерма гидротермических реакций смещается к более низкой температуре при увеличении концентрации кислоты, при этом максимум пика находится примерно при 212 ° С для смеси материала в 0,1 М кислоте. Сдвиг экзотермического процесса разложения к более низкой температуре соответствует ожидаемому снижению энергии активации вследствие кислотного катализа. Возможно, присутствие кислоты вызывает ранние реакции конденсации и образование большей доли смолистого материала, снижая концентрацию реагента, доступную для последующего экзотермического разложения.

Несоблюдение условий реакции, необходимых для автокаталитического гидролиза гемицеллюлозы, приводит к образованию ряда продуктов разложения, которые ингибируют деструкцию, включая органические кислоты, фенольные смолы и фураны. Кроме того, эксплуатация при высоких температурах и давлениях пара предъявляет высокие требования к конструкции реакторов. Поэтому работа при более низких температурах и давлениях в автоклаве в кислотных каталитических условиях была бы привлекательна для этих технологических соображений. Тем не менее, сложность процесса будет обусловлена повышенной кислотностью среды.

Данные экспериментов по паровзрывной обработке лигноцеллюлозного материала в реакторе подтверждают, что катализируемая кислотой деполимеризация гемицеллюлозы эффективна при 121 °C в 0,1 М H_2SO_4, хотя отсутствие детектируемого теплового потока в этом температурном интервале по данным калориметра означает, что энтальпия гидролиза имеет низкое значение (кривая 4). В некоторых исследованиях [8,10] энтальпия гидролиза *β-1-4*-гликозидной связи целлюлозы, гидролизованной в водной минеральной кислоте, была косвенно оценена как -4 Дж/г, наложенная на большую экзотермическую деградацию глюкозы, около -770 Дж/г. Было установлено, что энтальпия ферментативного гидролиза гликозидных связей *α-* и *β-1–4* ряда дисахаридов составляет от –24 до +35 Дж/г с использованием реакционной калориметрии, поэтому гидролиз связи *β-1–4* ксилана может также

привести к низкому изменению энтальпии. Простое рассмотрение энергий связи позволяет предположить, что энтальпия гидролиза гликозидной связи будет равна нулю, так как число связей С – О и О – Н остается неизменным. В условиях гидротермической обработки реакции автогидролиза могут совпадать с меньшими характеристиками смешивания и плавления, которые предшествуют основной экзотерме разложения, и, следовательно, могут быть связаны с процессами типа фрагментации и сжижения. Предполагается, что некоторые из этих реакций связаны как с лигнином, так и с гемицеллюлозой, хотя данные калориметрических исследований не являются окончательными.

Изменения в структурах волокон осины, обработанной паровзрывным методом, были также исследованы ИК-Фурье спектрометрией (рис. 5).

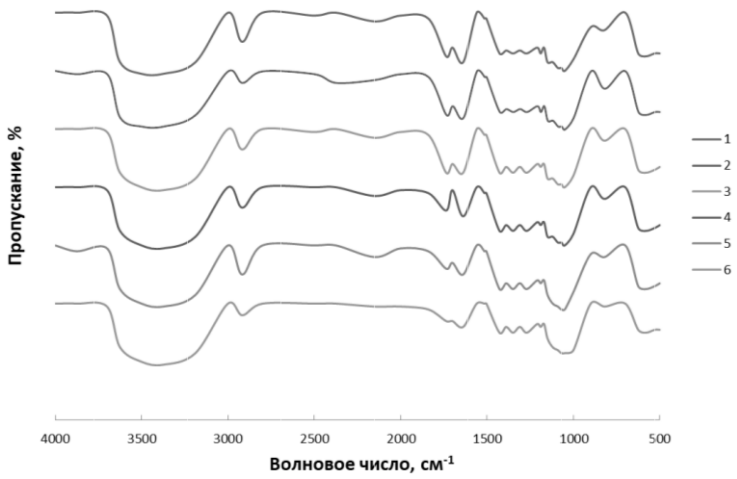


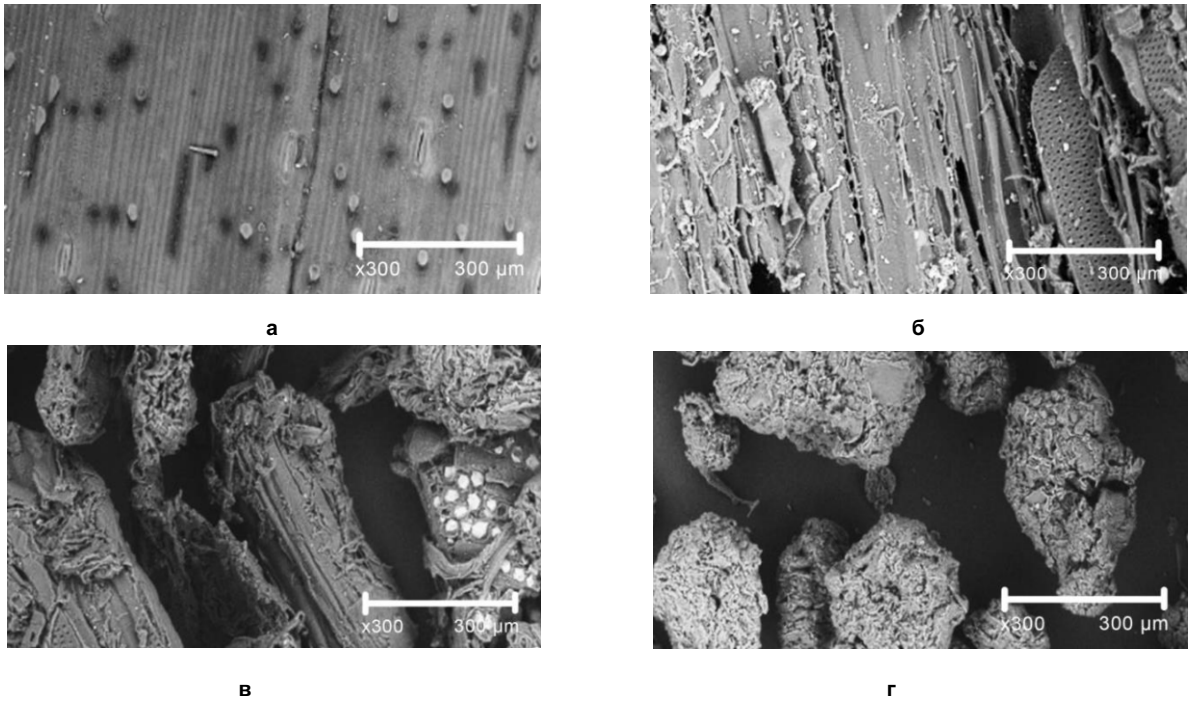
Рис. 5. ИК-спектры образцов осины: 1- исходный, 2- АЛМ при $t_{по}$=160 °С, 3- АЛМ при $t_{по}$=180 °С, 4- АЛМ при $t_{по}$=200 °С, 5- АЛМ при $t_{по}$=220 °С, 6- АЛМ при $tn_{о}$=240 °С)

Результаты не показали значительных изменений в макромолекулярной структуре волокон. Гидрофильность обработанных и необработанных образцов была обнаружена в широкой полосе поглощения от 3500 $см^{-1}$ до 3300 $см^{-1}$, которая связана с –ОН группами основных компонентов лигноцеллюлозы. Пик при 2917 $см^{-1}$ связан с растягивающими колебаниями алифатических связей С-Н, которые показаны небольшими изменениями в поглощении образцами после паровзрывной обработки. Эти изменения очевидно связаны с частичным удалением лигнина из волокон. Два пика при 1504 $см^{-1}$ и 1428 $см^{-1}$ соответствуют ароматическим пикам С-С связей ароматического кольца лигнина.

Характерный пик при 1737 $см^{-1}$ в необработанном волокне относится либо к эфирным связям ацетиловых и уроновых групп гемицеллюлоз, эфирной связи карбоксильных групп гемицеллюлоз, или эфирных связей карбоксильных групп феруловой и п-кумаровой кислот лигнина. Интенсивность этого пика снижается в волокнах, обработанных паровзрывной активацией, особенно при 3 МПа. Этим условия обработки приводят к удалению большей части гемицеллюлоз и части лигнина из волокон. Поглощение при 1638 $см^{-1}$ очевидно вязано с поглощением воды. Снижение интенсивности этого пика в обработанном волокне осины связано с частичным удалением гемицеллюлоз. Поглощения при 1058 $см^{-1}$ и 896 $см^{-1}$ связаны с растягивающими колебаниями С-О связей и качающими колебаниями С-Н связей целлюлозы.

Морфологические свойства древесины, активированной паровзрывной обработкой, оценивали по изображениям поверхности диспергированного лигноцеллюлозного материала (рис. 6). Как видно из изображений, образцы, которые были предварительно обработаны при более высоких температурах, подвергались большей фрагментации, и эти изменения способствовали увеличению удельной поверхности частиц. Кроме того, эти морфологические изменения хорошо согласуются с наблюдаемой потерей массы. При уменьшении размера частиц лигноцеллюлозного материала с увеличением температуры обработки наблюдаются более высокие концентрации соединений с низкой молекулярной массой, например, в случае ксилозы и арабинозы. Таким образом, паровой взрыв способствует обширной фрагментации волокон биомассы, при увеличении температуры паровзрывной обработки происходит увеличение удельной поверхности материала. Это в первую очередь связано с химическими

преобразованиями, происходящими при паровом гидролизе. Так, влияние температуры при паровом гидролизе способствует деструкции гемицеллюлоз до моно- и олигосахаридов, а также частичной деструкции лигнина до низкомолекулярных фрагментов. При этом целлюлоза, как макромолекула, практически не подвергается деструкции. Однако, плотноупакованные кристаллические цепочки целлюлозы, чередующиеся с аморфными областями, подвергаются гидролитической деструкции в неустойчивых некристаллических областях.



а б в г

Рис. 6. Микрофотографии древесины осины: а) необработанная, б) активированной паровзрывной обработкой при 160 °С, в) то же при 190 °С, г) то же при 220 °С

Все эти моменты в клеточной стенке способствуют увеличению внутренней удельной поверхности. В макрокартине после паровзрывной обработки наблюдается отделение волокон растительного материала друг от друга за счет перепада давления, образующегося при разгерметизации реактора. Это связано с тем, что влага, находящаяся в материале, находится в перегретом состоянии, и при снижении давления над ней резко вскипает с выделением большого количества энергии, которая оказывает растягивающее усилие на волокна, тем самым отделяя их друг от друга.

Структуры образцов исходной древесины осины и активированной паровзрывной обработкой были исследованы с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра (рис. 7).

Результаты дифрактограммы на рисунке 7 показывают, что все образцы целлюлозных волокон образованы аморфными и кристаллическими областями и имеют типичные кристаллические участки целлюлозы I и аморфные участки целлюлозы II при 2θ=26° и 2θ=19°, соответственно. Для необработанных образцов кристаллический пик преобладает над аморфным пиком, вероятно, из-за присутствия более высокого содержания кристаллической целлюлозы, которая менее доступна для гидролиза.

Материал, активированный паровзрывной обработкой демонстрирует более высокую кристалличность по сравнению с необработанными волокнами, что очевидно объясняется частичным удалением нецеллюлозных полисахаридов и растворением аморфных фракций при паровом гидролизе.

Индекс кристалличности $I_{кр}$ образцов целлюлозы определяли по рентгенограммам на основе следующего соотношения:

$$I_{\text{кр}} = \frac{I_{max} \cdot I_{min}}{I_{max}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_{max} представляет максимальный пик интенсивности для целлюлозы при 2θ около 26°, I_{min} представляет минимальный пик интенсивности для аморфной области (целлюлозы II) при 2θ около 19°.

Рисунок 8 показывает влияние давления паровзрывной обработки на индекс кристалличности волокон, в котором давление 0 МПа соответствует исходному материалу.

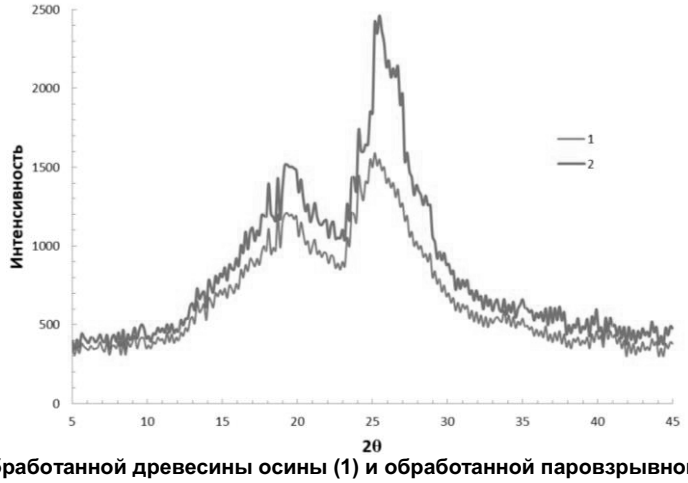


Рис. 7. Рентгенограммы необработанной древесины осины (1) и обработанной паровзрывной обработкой (2)

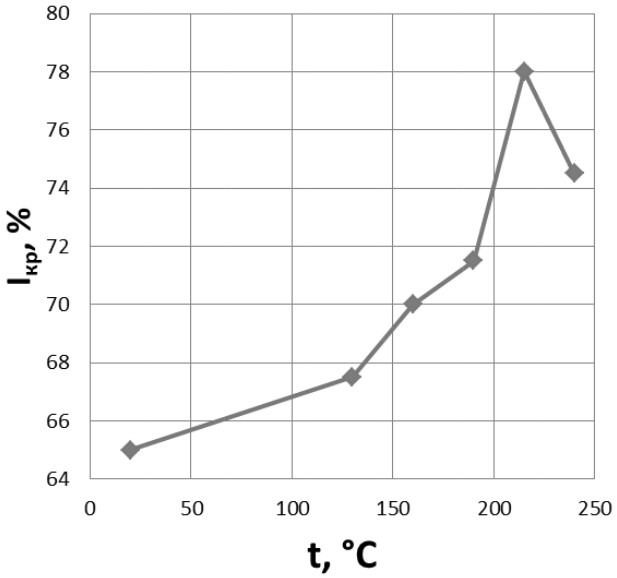


Рис. 8. Зависимость индекса кристалличности от давления паровзрывной обработки, %

Значение индекса кристалличности исходного сырья составило 65,3%. До давления 3 МПа индекс кристалличности повышается до 78,16%. При 3 МПа значение индекса кристалличности отклонилось, что вероятно объясняется разрушением клеточной стенки материала. Это также было отмечено в анализе компонентного состава с дальнейшей демонстрацией деструкции целлюлозы.

Заключение

Таким образом, результаты показывают, что содержание гемицеллюлозы при паровзрывной обработке снижается, в то время как относительные количества целлюлозы и лигнина увеличиваются. Пониженная термостойкость активированного образца древесины сосны указывает на изменение структуры целлюлозы (например, кристалличность, степень полимеризации). Вода, как показали исследования, способствует растворению реагентов и/или продуктов и может действовать как дополнительный реагент в образовании активированных промежуточных соединений. Точный баланс реакций и связанной с ними кинетики будет зависеть от уровня гидратации клеточной стенки лигноцеллюлозы и, возможно, от способа предварительного смачивания.

Влияние температуры при паровом гидролизе способствует деструкции гемицеллюлоз до моно- и олигосахаридов, а также частичной деструкции лигнина до низкомолекулярных фрагментов, что приводит к увеличению внутренней удельной поверхности волокна. При этом целлюлоза, как макромолекула, практически не подвергается деструкции. Однако, плотноупакованные

кристаллические цепочки целлюлозы, чередующиеся с аморфными областями, подвергаются гидролитической деструкции в неустойчивых некристаллических областях.

Результаты, представленные в работе, получены при поддержке Стипендии Президента Российской Федерации (СП-4422.2018.1).

Литература

1. Timerbaev N. F., Saldaev V. A., Prosvirnikov D. B. Dynamics Pressure Measurement in the Unit for Continuous Steam Explosion Treatment of Wood Biomass with a System of Plunger Hydraulic Locks //2019 International Science and Technology Conference" EastConf". – IEEE, 2019. – С. 1-3.

2. Prosvirnikov D. B., Timerbaev N. F., Safin R. G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2019. – Т. 945. – С. 911-918.

3. Prosvirnikov D. B., Safin R. G., Zakirov S. R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications, 2018. – Т. 284. – С. 773-778.

4. Просвирников, Д.Б. Разработка аппаратурного оформления технологии непрерывного получения порошковой целлюлозы / Д. Б. Просвирников [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – С. 156-159.

5. Скурыдин, Ю. Г. Влияние компонентов древесного композиционного материала на температуру фазовых переходов / Ю. Г. Скурыдин, Е. М. Скурыдина // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – №. 4. – С. 57-62.

6. Prosvirnikov, D. B. Modelling heat and mass transfer processes in capillary-porous materials at their grinding by pressure release / D. B. Prosvirnikov [et al.] // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). International Conference on. – IEEE– 2017. – P. 1-7.

7. Springer, E. L. Rate studies of the hydrotropic delignification of aspenwood / E. L. Springer, J. F. Harris, W. K. Neill // Tappi. – 1963. – Vol. 46. – №. 9. – 551p.

8. Taghizadeh, M. Effect of molecular weight on the ultrasonic degradation of poly(vinylpyrrolidone) / M. T. Taghizadeh, T. Asadpour // Ultrason. Sonochem. – 2009. – Vol. 16. – № 2. – P. 280-286.

9. Timerbaev, N. F. Application of the Method of Statistical Modeling and Parametric Identification for Automation of the Processes of Wood Treatment / N. F. Timerbaev, D. B. Prosvimikov, A. R. Sadrtdinov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE. – 2018. – P. 1-5.

10. Chen, X. Hemicellulose pre-extraction of wood with water in a cstr / X. Chen, A. Heiningen // The materials of forest bioproducts research initiative, Department of chemical and biological engineering, University of Maine, Orono, ME. – 7 p.

11. Shamim H. M. et al. Bioconversion of water-hyacinth to nutritionally enriched animal feed by solid state fermentation using Pleurotus sajor-caju //Journal of Microbiology, Biotechnology & Food Sciences. – 2017. – Т. 6. – №. 5.

12. Prosvirnikov D. B. et al. Multifactorial modelling of high-temperature treatment of timber in the saturated water steam medium //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012088.

13. Terrone C. C. et al. Agroindustrial biomass for xylanase production by Penicillium chrysogenum: Purification, biochemical properties and hydrolysis of hemicelluloses //Electronic Journal of Biotechnology. – 2018. – Т. 33. – С. 39-45.

14. Vega, A. y Bao, M. (1993). Organosolv fractionation of Ulex europaeus with dilute hydrochloric acid and phenol. Two simple kinetic models for prehydrolisis and delignification. Wood Science and Technology, 27, 1, 61-68.

15. Wright, B. Steam Explosion Pilot Plant / B. Wright. - Matherials of Department of wood science and forest products, 2008

© **Просвирников Д.Б.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; **Сафин Р.Р.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектуры и дизайна изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cfaby@mail.ru; **Козлов Р.Р.** – аспирант, ассистент кафедры «Архитектуры и дизайна изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ».

UDC 66.046

RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF LITHICELLOUS MATERIAL, ACTIVATED BY BLASTING

D.B. Prosvirnikov, R.R. Safin, R.R. Kozlov

This article presents the results of studies of the physicochemical properties and structure of lignocellulosic material activated by steam blasting. Gained scientific knowledge about the destruction of the ligno-carbohydrate complex under conditions of vapor-blasting treatment and changes in the amorphous-crystalline structure of the fiber. The obtained data will allow to control the properties of composites obtained on the basis of an activated material, as well as the modes of thermoplastic effects on the material itself.

Keywords*: steam blasting, activated material, thermal analysis, morphology, structure, lignin, hemicellulose, cellulose*

References

1. Timerbaev N. F., Saldaev V. A., Prosvirnikov D. B. Dynamics Pressure Measurement in the Unit for Continuous Steam Explosion Treatment of Wood Biomass with a System of Plunger Hydraulic Locks //2019 International Science and Technology Conference" EastConf". – IEEE, 2019. – C. 1-3.

2. Prosvirnikov D. B., Timerbaev N. F., Safin R. G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2019. – T. 945. – C. 911-918.

3. Prosvirnikov D. B., Safin R. G., Zakirov S. R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications, 2018. – T. 284. – C. 773-778.

4. Prosvirnikov, D. B. Development of hardware design technology for continuous production of powdered cellulose / D. B. Prosvirnikov [et al.] // Bulletin of Kazan Technological University. - 2015. - V. 18. - p. 156-159.

5. Skurydin, Yu. G. Influence of the components of a wood composite material on the temperature of phase transitions / Yu. G. Skurydin, E. M. Skurydina // Physics and Chemistry of Materials Processing. - 2016. - №. 4. - pp. 57-62.

6. Prosvirnikov, D. B. Modelling heat and mass transfer processes in capillary-porous materials at their grinding by pressure release / D. B. Prosvirnikov [et al.] // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). International Conference on. – IEEE– 2017. – P. 1-7.

7. Springer, E. L. Rate studies of the hydrotropic delignification of aspenwood / E. L. Springer, J. F. Harris, W. K. Neill // Tappi. – 1963. – Vol. 46. – №. 9. – 551p.

8. Taghizadeh, M. Effect of molecular weight on the ultrasonic degradation of poly(vinylpyrrolidone) / M. T. Taghizadeh, T. Asadpour // Ultrason. Sonochem. – 2009. – Vol. 16. – № 2. – P. 280-286.

9. Timerbaev, N. F. Application of the Method of Statistical Modeling and Parametric Identification for Automation of the Processes of Wood Treatment / N. F. Timerbaev, D. B. Prosvimikov, A. R. Sadrtdinov // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE. – 2018. – P. 1-5.

10. Chen, X. Hemicellulose pre-extraction of wood with water in a cstr / X. Chen, A. Heiningen // The materials of forest bioproducts research initiative, Department of chemical and biological engineering, University of Maine, Orono, ME. – 7 p.

11. Shamim H. M. et al. Bioconversion of water-hyacinth to nutritionally enriched animal feed by solid state fermentation using Pleurotus sajor-caju //Journal of Microbiology, Biotechnology & Food Sciences. – 2017. – T. 6. – №. 5.

12. Prosvirnikov D. B. et al. Multifactorial modelling of high-temperature treatment of timber in the saturated water steam medium //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – T. 124. – №. 1. – C. 012088.

13. Terrone C. C. et al. Agroindustrial biomass for xylanase production by Penicillium chrysogenum: Purification, biochemical properties and hydrolysis of hemicelluloses //Electronic Journal of Biotechnology. – 2018. – T. 33. – C. 39-45.

14. Vega, A. y Bao, M. (1993). Organosolv fractionation of Ulex europaeus with dilute hydrochloric acid and phenol. Two simple kinetic models for prehydrolisis and delignification. Wood Science and Technology, 27, 1, 61-68.

15. Wright, B. Steam Explosion Pilot Plant / B. Wright. - Matherials of Department of wood science and forest products, 2008

© **Prosvirnikov D.B.** - Ph.D., Associate Professor of the Department «Processing of wood materials», Kazan National Research Technological University, prosvirnikov_dmi@mail.ru; **Safin R.R.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University, cfaby@mail.ru; **Kozlov R.R.** - postgraduate student, Assistant of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University.

УДК 615.89

КОГЕНЕРАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ И ТБО НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Т.Х. Галеев, А.Р. Садртдинов, Р.Г.Сафин

Актуальность вопросов использования низкосортных органических топлив и отходов, в частности твердых бытовых отходов (ТБО), обуславливается современными тенденциями энергосбережения и повышения энергоэффективности. Это непосредственно относится к направлению возобновляемой энергетики, отвечающее за вовлечение в топливный энергетический баланс всех отходов, таких как ТБО, для обеспечения тепловой и электрической энергией районов децентрализованного энергоснабжения. В работе рассматривается процесс высокотемпературного термического разложения ТБО в паровоздушной среде плазмы под избыточным давлением для выработки электрической энергии. Высокая энтальпия и большая химическая активность плазменного газифицирующего агента позволяет осуществить процесс термического разложения в автотермичном режиме. Высокотемпературный режим и применение плазменного дутья обеспечивает высокую степень конверсии отходов в горючие компоненты (CO, CH_4, H_2), образующейся газовой смеси. Технологический процесс значительно снижает образование потенциально опасных веществ, влияющих на кинетику процесса. После выработки электрической энергии, отработанные газы подвергаются комплексной очистке от продуктов сгорания и когенерации остаточной тепловой энергии. В частности происходит очистка от токсичных окислов азота (NOx), предотвращается образование диоксинов, фуранов и других опасных производных хлористых соединений. Тепловая энергия, отводимая на различных участках установки, практически полностью используется для нужд когенерационной установки и ее узлов, что позволяет достичь суммарного КПД не менее 86 %. Способность когенерационной установки работать на различных видах твердых отходах дает широкий спектр применения и эксплуатационных возможностей

***Ключевые слова**: биомасса, ТБО, термическая переработка, горючий газ, когенерация, возобновляемая энергетика*

Введение

В последние годы практически во всех странах пристальное внимание уделяется проблеме использования образующихся отходов производства и потребления, в том числе твёрдых бытовых отходов (ТБО). ТБО относятся к техногенным ресурсам и несет опасность окружающей среде, а при возгорании образуются диоксины, фураны и прочие токсичные вещества. При этом состав ТБО неодинаков и изменяется в зависимости от климатических условий [1-2].

Одним из путей переработки ТБО - использование в качестве источников вторичного сырья, позволяющего достичь повышения эффективности производства за счет экономии материалов и обеспечения расширения сырьевой базы. Государственная политика в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года предусматривает развитие ряда направлений таких, как

вовлечение отходов в повторный хозяйственный оборот посредством максимально полного использования исходного сырья и материалов; использования образовавшихся отходов путем переработки, регенерации, рекуперации, рециклинга; внедрение и применение малоотходных и ресурсосберегающих технологий и оборудования [3-6].

Одним из ориентиров в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, является устойчивое развитие энергетики которое включает экологическую безопасность и инновационное развитие. В документе также отмечена неоправданно низкая доля использования местных видов топлива (в том числе ТБО) в региональных энергетических балансах. В комплекс предлагаемых мер, способствующих преодолению, сложившейся практики, входят: стимулирование сокращения образования новых и утилизации накопленных отходов производства; стимулирование научных исследований и поддержка разработки перспективных технологических решений, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду и экологических рисков; новые технологии газификации различного сырья, включая биомассу, ТБО и др. [7-11].

Освоение инновационных технологий энергетического использования органических отходов в малой энергетике является актуальной задачей соответствующей современным тенденциям. Это связано с формированием нового рынка распределенной энергетики с целью обеспечения электрической и тепловой энергией районов децентрализованного энергоснабжения. Существующий уровень исследований в области вопросов газификации позволяет создавать установки, перерабатывающие как качественные угли, так и низкосортные топлива, однако имеются ограничения по переработке органических отходов к которым относятся твердые бытовые отходы (ТБО) [12-13]. Внедрение подобных установок ограничено конкурентными преимуществами действующих крупных станций и отсутствием решенных научно-технических проблем переработки ТБО.

Выбор технологий газификации с плазменным источником тепла обоснован особенностями процесса. Способ химико-термической обработки отходов, обусловлен интенсификацией процесса плазмохимическими превращениями и высокой концентрацией энергии в единице объема [14]. Газификация с плазменным источником тепла может быть использована для решения широкого круга задач, в том числе для переработки 98% любых видов отходов. В основу плазменной газификации положен высокотемпературный процесс (до 1100 °С), который позволяет получить максимальные показатели выхода энергетического газа, а дальнейшее повышение температуры (от 1200 °С и выше) дает возможность получить синтез-газ с минимальным содержанием смол и вредных примесей [15-16]. Следует вывод, что с повышением температуры наблюдается рост процентного содержания горючих составляющих в газе, а соответственно теплотворной способности.

В результате основной задачей, преследуемой при разработке инновационных технических решений по созданию когенерационных установок, является получение горючего энергетического газа высокой калорийности с практически полным отсутствием смол и токсичных компонентов в получаемой смеси.

Методика и оборудование

При утилизации ТБО особый интерес вызывает процесс термической переработки с использованием в качестве источника тепловой энергии плазмогенератора и вести процесс при избыточным давлении в реакторе. Из литературных источников известно, что плазма имеет температуру не менее 3000 °С, что позволяет деструктурировать практически все ТБО, а избыточное давление уменьшает выход смол, повышает производительность и благоприятно влияет на образование метана (CH_4) в газовой смеси [17-20].

Большинство газовых электрогенераторов в составе когенерационных установок рассчитаны на работу с природным газом (на метане), и требуют значительных доработок в случае использования иной газовой смеси. При этом с увеличение в составе газовой смеси метана уберет потребность в модернизации агрегата, что также будет благоприятно сказывается на эффективность работы энергетической установки.

Для изучения данного вопроса и подтверждения выдвинутых предположений была разработана экспериментальная установка для высокотемпературного термического разложения ТБО и растительной биомассы в среде плазмы под избыточным давлением (рис.1). Установка предназначена для исследования получения горючего газа высокой калорийности и его влияния на эффективность выработки электрической энергии.

Экспериментальная установка выполнена из жаропрочной коррозионностойкой стали, что позволяет работать под избыточным давлением до 2 МПа и температурой до 1500°С и состоит из следующих основных элементов: реактор 1, скруббер 2, газораспределительный блок 3, плазмогенератор 8, электрогенератор 9.

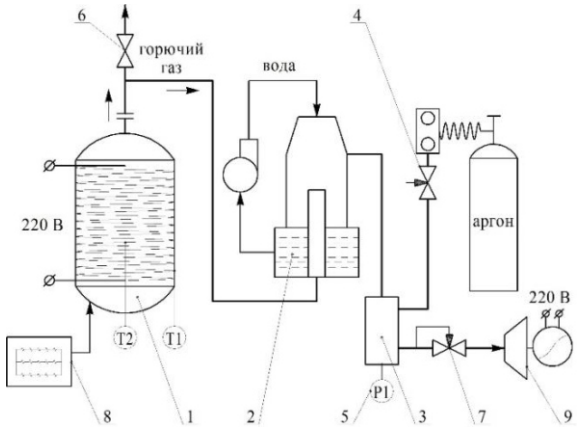


Рис. 1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка работает следующим образом. В реактор 1 происходит загрузка исследуемого материала и его герметичное закрытие. После проверки соединений, осуществляется процесс нагнетания давления в реакторе 1 и трубопроводной системе установки. Нагнетающей давление средой является аргон, подаваемый из баллонов через коллекторную систему 4. Создаваемое давление зависит от условий эксперимента, но не превышает 2 МПа. Система нагнетания давления связана с основным газопроводом через газораспределительный блок 3, который нужен для контроля давления в реакторе 1, через датчик 5. По достижении требуемого давления в системе подача аргона прекращается, а давление в системе удерживается и регулируется клапаном 6 и дросселирующим устройством 7. После создания требуемого давления запускается плазмогенератор для нагрева реактора 1 до требуемой температуры, которая контролируется и регулируется терморегулятором. Образующиеся газы отводятся через дроссель 7, а часть газов направляется на газоанализ.

Продолжительность экспериментов варьировалась от 2 до 3 часов.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлен внешний вид экспериментальной установки.

Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки термической переработки отходов под давлением

На экспериментальной установке были получены данные по образованию метана при термической переработке растительной биомассы (древесные опилки) и ТБО под различным давлением с использованием плазменного источника тепла.

Полученные графические зависимости (рис.3) подтверждают выдвинутые предположения. Видно, что с увеличением давления содержание метана в смеси газов растет. Характер зависимостей также сопоставляется с литературными источниками. Отмечено, что при увеличении давления содержание смол в газе значительно ниже. Это объясняется увеличенной продолжительностью пребывания газов в реакционной зоне и ускорением тепло-массообменных процессов в следствии создания избыточного давления.

Далее был проведен полный компонентный анализ получаемой смеси газов из разного сырья при одинаковых условиях процесса с наибольшим давлением. Проводилось сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

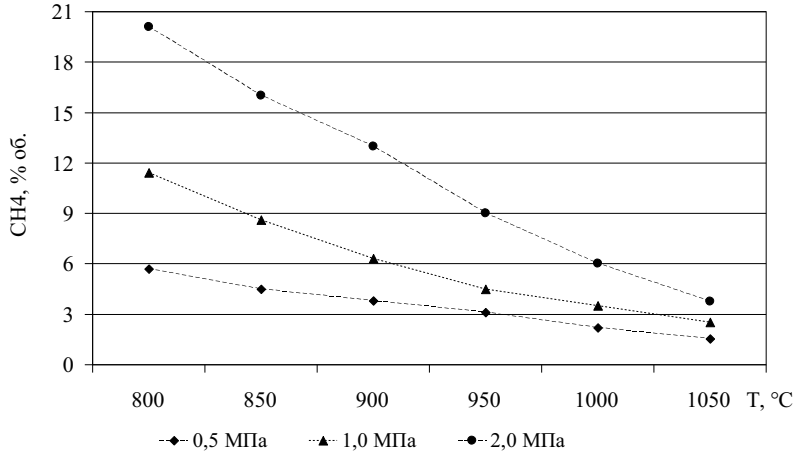


Рис. 3. Зависимость объемного содержания метана в смеси газов от температуры при различном давлении

Анализ проб газов выполнялся на хроматографе «Кристал-5000», на колонке с активированным углем. При этом на хромотограмме кислород и азот показывался одним пиком. По площади всех пиков определялось содержание компонентов в смеси газов (использовалась абсолютная градуировка).В следствии малого содержания в смеси горючих газов балластных компонентов (менее 1%), они учитывались как азот. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Компонентный состав газов

Отходы	Компонентный состав газов, % об.				
	CO_2	CO	H_2	N_2	CH_4
ТБО (расчет)	5,4	38,4	31,9	0,7	23,6
Растительная биомасса (расчет)	7,1	44,6	29,7	0,5	18,1
ТБО (эксперемент)	10	35	27	8	20
Растительная биомасса (эксперемент)	13	41	25	7	14

Сравнительный анализ показывает незначительное расхождение между данными, но при этом общий характер образования компонентов смеси газов у всех схожий. Также можно отметить, что при средней температуре процесса 1200 ^{o}C расчет показывает большее количество горючих компонентов в газовой смеси. Данный факт позволяет сделать вывод, что еще имеется возможность повысить калорийность генерируемого газа, а следовательно его энергетический потенциал.

Как отмечалось ранее плазмогенератор служит как источник тепла для обеспечения стабилизации процесса термохимической переработки отходов. При этом плазмогенератор потребляет электрическую энергию. Для выявления энергетических затрат на переработку было проведено моделирование и получена зависимость производительности газификатора от мощности плазмогенератора (рис.4).

Смоделированная зависимость имеет линейный характер и показывает, что производительность газогенератора пропорциональна мощности плазмогенератора. Для наглядности моделирование проводилось для сырья с различной влажностью, что хорошо отражено на графике (рис.4). Для оценки энергетических затрат полученные данные был приведен к 1 кг перерабатываемого сырья. Расход электроэнергии в среднем составил 0,81 кВт•ч/кг (при 55 %), 0,7 кВт•ч/кг(при 47 %) и 0,39 кВт•ч/кг (при 22 %).

Нужно отметить, что моделирование производилось для стационарного режима работы газогенератора. При реальной работе установки до достижения стационарного режима предшествует длительный процесс прогрева. В ходе запуска и прогрева расход электроэнергии естественно выше. В ходе экспериментальных исследований замечено, что в нестационарном режиме работы (газогенератор еще не прогрелся), струи плазмы непосредственно взаимодействуют с сырьем. Это говорит о том, что основная часть энергии плазмы непосредственно вкладывается в процесс термической переработки.

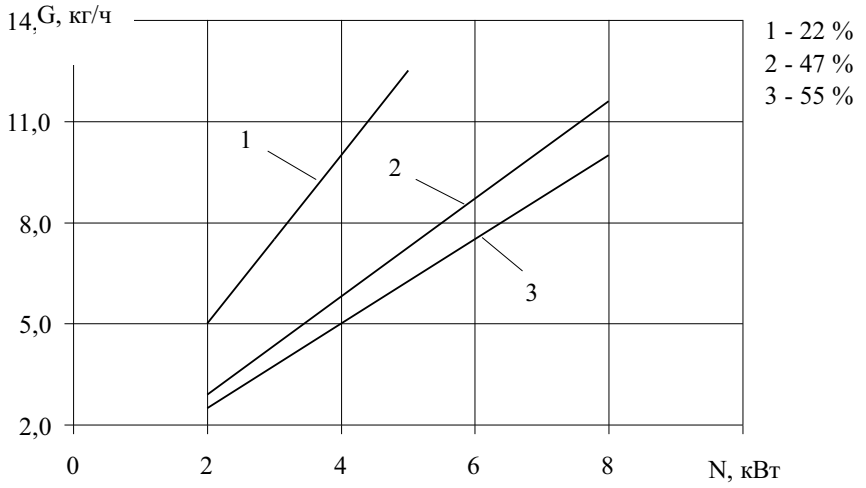


Рис. 4. Изменение производительности газификатора от мощности плазмогенератора при различной влажности сырья: 1 – 22%; 2 – 47%; 3 – 55%

Был проведен сравнительный анализ экспериментальных данных по производительности стандартного газогенератора и газогенератора с плазменным источником тепла. При условии работы в автотермическом режиме и одинаковой температуре, производительность газогенератора с плазменным источником тепла примерно в 1,8 раза выше. Экспериментально в газогенераторе с плазменным источником тепла достигнут режим при котором с 1 кг ТБО получено 14 МДж энергии при энергетических затратах 2,5 МДж/кг. Теоретическая оценка использования когенерационной установки на базе газогенератора с плазменным источником тепла показала, что удельный выход электроэнергии может составить 6,5 МДж/кг, а эффективность преобразования первичной энергии ТБО в электрическую энергию составит не менее 45 %.

В процессе исследований полученные газы с лучшими показателями по калорийности и содержанию метана, после охлаждения и очистки от мелкодисперсных частиц подавались в стандартный газовый электрогенератор мощностью 2 кВт (модель GROUP SH3000SE). В качестве источника нагрузки и выполнения измерений использовался стенд с приборами учета и возможностью создания домашних условий работы электроприборов с регулированием нагрузки.

Для оценки эффективности работы электрогенератора на получаемой смеси газов в начале была проанализирована работа на природном газе (метане). Полученные данные были приняты в качестве эталонных. В результате, при работе на природном газе, электрогенератор выдавал мощность больше заявленной около 2,1 кВт•ч, после чего срабатывала защитная автоматика. При работе на полученной смеси газов с низким содержанием метана электрогенератор работал не стабильно, выдавал мощность в пределах от 1,1 до 1,4 кВт•ч и периодически отключался. Это подтверждало тезис о необходимости модернизации устройства. Однако при работе на смеси газов с содержанием метана (около 18 %) электрогенератор работал относительно стабильно и выдавал мощность в пределах от 1,4 до 1,6 кВт•ч.

С увеличением в смеси газов содержания метана, даже до 18 %, позволило повысить стабильность работы электрогенератора и увеличить эффективность выработки электроэнергии до 72 % относительно

эталона. При использовании газовой смеси без метана эффективность составляла 57 %, что являет критически низким показателем для энергоустановки.

Полученные результаты работы говорят о необходимости увеличения в смеси газов содержания метана, что приводит к получению горючих газов содержащих метан посредством термохимической переработки сырья под давлением с использованием плазменного источника тепла. Однако, применение повышенного давления имеет ряд минусов - повышается металлоемкость и стоимость оборудования. Так же повышаются требования к безопасности эксплуатации. Решение этих проблем является дополнительным стимулом для дальнейшего продолжения исследования в области термической переработки сырья при повышенном давлении.

Заключение

Применение плазмотронов для переработки ТБО и растительных отходов позволяет провести переработку органической составляющей с получением высококалорийного горючего газа. В тоже время осуществление процесса под избыточным давлением, позволяет ускорить тепло-массообменные процессы, увеличить производительность и уменьшить габариты оборудования. Кроме того, становится возможным применение способов очистки газов, которые экономически не рентабельны в при атмосферном давлении. При этом исключается образование особо вредных веществ, оказывающих негативное влияние на окружающую среду. Хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных по переработке ТБО и растительного сырья позволяет использовать полученные результаты для прогнозирования состава горючего газа и удельных энергозатрат исследуемой технологии.

Полученный в газификаторах с плазменным источником тепла газ содержит до 90% горючих компонентов и является высококачественным сырьем для нужд малой энергетики. Данный показатель позволяет достичь суммарного КПД когенерационной установки не менее 86 %. Способность когенерационной установки работать на различных видах твердых отходах обеспечивает широкий спектр применения и эксплуатационных возможностей.

Работа выполнена в рамках программы «Старт» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сферепри реализации проекта на тему: «Создание электрокогенерационной установки, основанной на комбинированном процессе пиролиза-газификации растительной биомассы и ТБО» (договор №3060ГС2/39029).

Литература

1. Safin R.R. et al. Research of heating rate while thermo modification of wood // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Т. 30. – №. 11. – С. 1618-1621.

2. Сафин Р.Г. и др. Современные направления переработки лесных ресурсов //Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 15. – С. 90-93.

3. Лаверов Н.П. Топливно-энергетические ресурсы: состояние и рациональное использование //Труды научной сессии Российской академии наук.–М.: Наука. – 2006. – С. 21-29.

4. Садртдинов А. Р. и др. Тенденции образования и потенциал использования отходов растительного происхождения лесопромышленного и агропромышленного комплексов //Деревообрабатывающая промышленность. – 2017. – №. 2. – С. 8-17.

5. Игнатьева Г.И. и др. Изучение свойств теплоизоляционных материалов на основе отходов деревообработки // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – №4. – С. 6-8.

6. АгабабовВ.С.Бестопливные установки для производства электроэнергии, теплоты и холода на базе детандер–генераторных агрегатов // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 1. – С. 48–50.

7. Исмагилова Л. М., Садртдинов А. Р. Математическое описание стадии пиролиза с кондуктивным подводом тепла при газификации древесного сырья // В сборнике: Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – №. 5-4 (10-4). – С. 115-119.

8. Гашо Е. Г. Три порога энергоэффективности //Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. – №. 3. – С. 16-20.

9. СадртдиновА.Р. Совершенствование техники и технологии процесса газификации отходов деревообработки :дисс. канд. тех. наук. – Казанский государственный технологический университет. Казань, 2011. – С. 139.

10. Тимербаев Н.Ф. и др. Технологии газификации древесины: перспективы и инновации // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 15. – С. 221-226.

11. Ковалев Л. И. Эффективность газодвигательных мини-ТЭЦ //Энергетик. – 2009. – №. 3. – С. 26-29.

12. Хисматов Р.Г. и др. Установка переработки низкокачественной древесины в уголь // Вестник казанского технологического университета. – 2014. – Т.17. – №22. – С. 297-300

13. Тунцев Д. В., Грачев А. Н., Сафин Р. Г. Математическая модель термического разложения древесины в условиях кипящего слоя и конденсации продуктов разложения // Вестник казанского технологического университета. – 2011. – Т. 143, – № 14. – С. 94-100

14. Патент 2400671 Российская Федерация, МПК7 F23G 5/027, F23G 5/14, F23J 15/00. Установка для термической переработки твердых отходов / Н.Ф. Тимербаев, Д.Ф. Зиатдинова, Р.Р. Сафин, А.Р. Садртдинов, Р.Г. Сафин, И.А. Кузьмин, Е.Ю. Разумов, Р.Р. Миндубаев. – № 2009113401/03; опубл. 27.09.2010.

15. Тимербаев Н.Ф. и др. Исследование зависимости теплотворной способности твердых бытовых отходов (ТБО) от их морфологического состава // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2008. – Т.51. – №10. – С. 79-81.

16. Тунцев Д. В. и др. Промышленная установка двухэтапной термической переработки отходов лесного комплекса // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 15. – С. 132-134.

17. Сафин Р. Г., Садртдинов А. Р., Салдаев В. А. Влияние параметров процесса газификация древесных отходов под давлением на состав синтез газа //В сборнике: Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – №. 3-2. – С. 417-420.

18. Хузеев М. В., Саттарова З. Г., Петров В. И. Паровая конверсия древесного угля с получением генераторного газа // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №. 1. – С.94-96.

19. Tuntsev D.V. et al. Pyrolyzates: Products of plant biomass fast pyrolysis // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol.87. – №9. – pp. 1367-1370.

20. Грачев А. Н. и др. Технология быстрого пиролиза при энергетическом использовании низкокачественной древесины //Энергетика Татарстана. – 2008. – №. 4. – С. 16-20.

© Галеев Т.Х. – инженер кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: pdm.kstu@gmail.com; **Садртдинов А.Р. –** канд. техн.наук, доцент кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: almaz.sadrtdinov@gmail.com; **Сафин Р.Г.** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: safin@kstu.ru

UDC 615.89

COGENERATION POWER PLANT FOR THE PROCESSING OF BIOMASS AND MUNICIPAL SOLID WASTE BASED ON PLASMA HEAT SOURCE

T. Kh. Galeev, A. R. Sadrtdinov, R. G. Safin

The urgency of the use of low-grade organic fuels and wastes, in particular municipal solid (MSW), is due to recent developments in energy saving and energy efficiency. This directly relates to the direction of renewable energy, responsible for involving all wastes, such as MSW, in fuel energy balance to provide heat and electricity to decentralized power supply areas. This paper presents the process of high-temperature thermal decomposition of MSW in the steam-air medium of plasma under excessive pressure to generate electrical energy. The high enthalpy and great reactivity of the plasma gasifying agent makes it possible to carry out the process of thermal decomposition in the autothermal mode. The high-temperature mode and the use of plasma blast provides a high degree of conversion of waste into combustible components (CO, CH4, H2), the resulting gas mixture. The technological process significantly reduces the formation of potentially hazardous substances that affect the kinetics of the process. After generating electrical energy, the exhaust gases are subjected to complex purification from the products of combustion and cogeneration of residual thermal energy. In particular, purification from toxic nitrogen oxides (NOx) occurs, the formation of dioxins, furans and other dangerous derivatives of chloride compounds is prevented. Thermal energy, discharged at various sites of the plant, is almost completely used for the needs of the cogeneration plant and its units,

which allows to achieve a total efficiency of at least 86%. The ability of the cogeneration plant to work on various types of solid waste gives a wide range of applications and operational capabilities.

***Keywords**: biomass, MSW, thermal processing, combustible gas, cogeneration, renewable energy*

References

1. Safin R.R. et al. Research of heating rate while thermo modification of wood. World Applied Sciences Journal. – 2014. – T. 30. – №. 11. – P. 1618-1621.

2. SafinR. G. etal. [Modern direction of processing of forest resources] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. – 2015. – vol. 18. – №. 15. – P. 90-93.(In Russ.)

3. Laverov N. P. [Fuel and energy resources: state and rational use] Trudy nauchnoysessiiRossiyskoyakademiinauk [Proceedings of the scientific session of the Russian Academy of Sciences]. – 2006. – P. 21-29.(InRuss.)

4. Sadrtdinov A.R. et al. [Education trends and the potential use of plant-derived wastes from the timber and agro-industrial complexes] Derevoobrabatyvayushchayapromyshlennost [Wood industry]. – 2017. – №. 2. – P. 8-17. (InRuss.)

5. Ignatieva G.I. et al. [Studying the properties of heat-insulating materials based on wood waste] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost [Wood industry]. – 2012. – № 4. – P. 6-8.(InRuss.)

6. Agababov V. P. [Fuel-free installations for the production of electricity, heat and cold based on detander-generating units] Novostiteplosnabzheniya [News of heat supply]. – 2009. – № 1. – P. 48–50. (In Russ.)

7. Esmagilova L.M., Sadrtdinov A.R. [Mathematical description of the stage of pyrolysis with conductive heat input in the gasification of wood raw materials] V sbornike: Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriyaipraktika [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. – 2014. – vol. 2. – №. 5-4 (10-4). – P. 115-119. (In Russ.)

8. Gasho E. [Three thresholds of energy efficiency] Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: economy, technology, ecology]. – 2009. – №. 3. – P. 16-20. (InRuss.)

9. Sadrtdinov A.R. [Perfection of technology and technology of gasification of woodworking wastes] dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk – Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet, Kazan [dissertation of the candidate of technical sciences – Kazan State Technological University, Kazan]. – 2011. – P. 139. (In Russ.)

10. Timerbaev N. F. et al. [Wood gasification technologies: prospects and innovations] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. – 2014. – vol. 17. – № 15. – P. 221-226.(InRuss.)

11. Kovalev L. I. [Efficiency of gas mini-CHP] Energetik [Energetik]. – 2009. – №. 3. – P. 26-29. (In Russ.)

12. Khismatov R. G. et al. [Installation of processing low-quality wood into coal] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. – 2014. – vol. 17. – №22. – P. 297-300 (InRuss.)

13. Tuntsev D.V, Grachev A.N, Safin R.G. [Mathematical model of thermal decomposition of wood under fluidized bed conditions and condensation of decomposition products] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. – 2011. – vol. 143, – № 14. – P. 94-100 (InRuss.)

14. Patent 2400671 [Russian Federation, IPC 7 F23G 5/027, F23G 5/14, F23J 15/00. Installation for thermal processing of solid waste – N.F. Timerbaev, D.F. Ziatdinova, R.R. Safin, A.R. Sadrtdinov, R.G. Safin, I.A. Kuzmin, E.Yu. Razumov, R.R. Mindubaev]. - No. 2009113401/03; Publ. 27.09.2010. (In Russ.)

15. Timerbaev N.F. et al. [Study of the dependence of the calorific value of municipal solid waste (MSW) on their morphological composition] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiyaikhimicheskayatekhnologiya [Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology] – 2008. – vol. 51. – №10. – P. 79-81. (InRuss.)

16. Tuntsev D. V. et al. [Industrial installation of two-stage thermal processing of forest complex waste] VestnikKazanskogotekhnologicheskogouniversiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. – 2015. – vol. 18. – №. 15. – P. 132-134. (In Russ.)

17. Safin R. G., Sadrtdinov A. R., Saldaev V. A. [Influence of process parameters on gasification of wood

waste under pressure on the composition of synthesis gas] V sbornike: Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriyaipraktika [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. – 2014. – vol. 2. – №. 3-2. – P. 417-420. (In Russ.)

18. Khuzeev, M. V.,Sattarova Z. G., Petrov V. I. [Steam conversion of charcoal] VestnikKazanskogotekhnologicheskogouniversiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. – 2014. – vol. 17. – №. 1. – P. 94-96. (InRuss.)

19. Tuntsev D.V. et al. Pyrolyzates: Products of plant biomass fast pyrolysis. Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol.87. – №9. – pp. 1367-1370.

20. Grachev A.N.et al. [Technology of fast pyrolysis in the energy use of low-quality wood] Energetika Tatarstana [Energy of Tatarstan.]. – 2008. – №. 4. – P. 16-20. (In Russ.)

©T. Kh. Galeev – engineer of Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, pdm.kstu@gmail.com; **A.R. Sadrtdinov –**candidate of technical sciences, associate professorof Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, almaz.sadrtdinov@gmail.com; **R.G. Safin** – doctor of technical sciences, professor, headof Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, safin@kstu.ru

УДК 676.026

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗМОЛЬНО-ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО ОТДЕЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ БУМАГИ И КАРТОНА

Д.Н. Жирнов, Е.В. Дернова, Д.А. Дулькин

В настоящее время существует несколько подходов к определению эффективности работы промышленного предприятия («ОЕЕ», система «Кайдзен» и др.). Данные подходы являются широко распространёнными и основываются на экономических показателях работы без учета технологических особенностей каждой отдельной единицы оборудования. В статье представлена апробация метода определения ключевых показателей эффективности оборудования (КПЭ) применительно к размольно-подготовительному отделу типичной фабрики, выпускающей тарный картон. В основе метода лежит использование ключевого показателя оборудования в качестве основы для расчета эффективности как отдельной единицы, так и всейтехнологической цепочки. Для выполнения поставленной задачи был выполнен подбор лабораторного оборудования, разработан метод определения КПЭ и рассчитаны коэффициенты значимости каждой отдельной единицы оборудования. В заключении приводится оценка эффективности всей технологической цепочки размольно-подготовительного отдела с описанием достигнутых результатов.

Ключевые слова: *Эффективность оборудования, производительность, тарный картон, контроль процесса, макулатура.*

Введение

Использование макулатуры в качестве сырья для производства тарного картона имеет некоторые особенности. Макулатура,как вторичныйполуфабрикат, имеет пониженныебумагообразующие свойства [1, 2], в связи с чем основной целью при ее использовании в производстве тарного картона является восстановление утраченного потенциала волокон за счет применения специальных технологических операций (роспуск, очистка, фракционирование, размол и др.)[3, 4]. На предприятииООО «Сухонский КБК» в качестве сырья используется макулатура марки МС-5Б, средняя длина волокон которой, как один из важнейших бумагообразующих показателей, имеет тенденцию к снижению в результате многократных циклов переработки [5].Восстановление бумагообразующего потенциала в значительной степени зависитот эффективности работы технологического оборудования, которая является составляющей эффективности работы предприятия в целом.

Эффективность работы любого промышленного предприятия в настоящее время является залогом его конкурентоспособности на современном динамичном рынке тарного картона [6-8]. К сожалению, в

настоящее время подходы к оценке эффективности предприятия основываются на экономических составляющих (OEE, система «Кайдзен» и др.)[9, 10] без учета технологической особенности работы оборудования, которая влияет на финальные экономические результаты. В данной статье предлагается рассмотрение подхода к определению итогового ключевого показателя эффективности работы размольно-подготовительного отдела.

Методы и материалы

Авторами предлагается новый подход к определению эффективности работы технологического оборудования и предприятия в целом на основании оценки ключевых показателей их эффективности (КПЭ). Вычисление КПЭ заключается в расчете отношения достигнутого фактического значения ключевого показателя, полученного при эксплуатации единицы производственного оборудования, к максимально возможному значению данного ключевого показателя, полученному на лабораторном оборудовании, принятому в качестве эталона [11].

Формула расчета КПЭ должна учитывать направление изменения ключевого показателя. К примеру, если рассматривать линию тонкого сортирования, то для увеличения эффективности ее работы необходимо увеличивать количество удаляемых отходов, и, как следствие, с нижать количество отходов, попадающих в кондиционный очищенный поток. Таким образом, для расчета ключевого показателя эффективности необходимо следующее соотношение:

$$КПЭ = \frac{П_{произв}}{П_{лаб}}$$

где $П_{произв}$ – ключевой показатель, полученный на производственном оборудовании;

$П_{лаб}$ – ключевой показатель, полученный на лабораторном оборудовании.

С другой стороны, если для увеличения эффективности работы необходимо, наоборот, снизить ключевой показатель стадии (как, например, в случае перемешивания массы с химикатами, где таким показателем является расход крахмала при сопоставимом уровне физико-механических показателей), необходимо следующее соотношение:

$$КПЭ = \frac{П_{лаб}}{П_{произв}}$$

где $П_{лаб}$ – ключевой показатель, полученный на лабораторном оборудовании;

$П_{произв}$ – ключевой показатель, полученный на производственном оборудовании.

Подбор лабораторного оборудования с аналогичной целевой функциейзатруднен его ограниченным выбором и высокой конечной стоимостью. Для адекватного сопоставления лабораторного и производственного оборудования необходимо выполнение ряда условий:

- сопоставимые конструктивные особенности лабораторного и промышленного оборудования. К примеру, при подборе лабораторного аналога для оценки эффективности работы сортирующего оборудования необходимо подобрать одинаковый размер отверстий сортирующего сита, его особенности (щелевое/перфорированное) и т.д.;
- использование в лабораторных экспериментах образцов макулатурной массы, отобранных из технологического потока на момент фиксирования параметров работы промышленного оборудования.

Для вычисления КПЭ размольно-подготовительного отдела были использованы следующие единицы промышленного оборудования и соответствующие лабораторные приборы, выбранные в качестве эталонов (табл.1).

Узел роспуска макулатуры. Целевое предназначение гидроразбивателя – произвести разволокнение листовой макулатуры на отдельные волокна и пучки волокон. Основным рабочим органом гидроразбивателя является ротор с лопастями, расположенный над сортирующим ситом. Роспуск макулатуры в гидроразбивателе происходит благодаря комплексному механическому, гидродинамическому и сдвиговому воздействию на фрагменты макулатурного сырья различных сил, возникающих вследствие вращения лопастей ротора. Остаток на сите, включающий нераспустившиеся фрагменты макулатуры, отправляется в отходы.

Таблица 1 – Оборудование, используемое для проведения оценки КПЭ размольно-подготовительного отдела бумажной фабрики

Промышленная единица Оборудования	Лабораторный прибор, выбранный в качестве эталона
Узел роспуска макулатуры	
Вертикальный гидроразбивательLCV-50, сито перфорированное, диаметр отверстий 12 мм.	**Прибор для определения эффективности (ПЭО)** с набором перфорированных сортирующих сит. В качестве сравнения используется сито с диаметром отверстий 12 мм.
Линия грубого сортирования	
Напорная сортировка типа STU компании Papcel, оснащенная ситом с круглыми отверстиями диаметром 2,2 мм. **Турбосепаратор ГРСГ-200**, оснащенный перфоривованным ситом с диаметром отверстий 3,5 мм. **Периодический сепаратор VSV-30 ф. Papcel**, оснащенный перфорированным ситом с диаметром отверстий 2,2 мм.	**Прибор для определения эффективности (ПЭО)** с набором перфорированных сортирующих сит. В качестве сравнения используется сито с диаметром отверстий 2,5…3.5 мм.
Линия тонкого сортирования	
Напорная сортировка типа STU компании Papcel, оснащенная щелевым ситом, ширина щели 0,35 мм.	**Лабораторная сортировка «Соммервиль»** с щелевым ситом, ширина щели 0,25 мм.
Фракционирование макулатурной массы	
ФракционаторCF-10 с перфорированным ситом, диаметр отверстий 1,2 мм.	**4-хступенчатый лабораторный классификатор системы BauerMcNett**, оснащенный сетками с размерами ячеек 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 мм.
Размол макулатурной массы	
Дисковая мельница МД-31 **Коническая мельница JulhaConfloJC-03**	**Центробежный размалывающий аппарат**
Составление композиции бумажной массы по химикатам	
Классический смеситель (до модернизации), система Trumpjet (после модернизации)	Магнитная мешалка MS-3000 с частотой вращения 3000 об/мин

Эффективность работы узла определяется по степени роспуска макулатуры, т.е. чем больше нераспущенных фрагментов макулатуры будет оставаться на поверхности сортирующего сита, тем ниже эффективность работы гидроразбивателя. Ключевой показатель эффективности узла роспуска ($КПЭ_Р$) может быть рассчитан как отношение фактической степени разволокнения к максимальному практически возможному результату.

Сущность метода заключается в отборе проб волокнистой суспензии непосредственно в ванне ГРВ, а также после прохождения массы через сортирующее сито гидроразбивателя, с последующим сортированием отобранных проб на приборе для определения эффективности (ПЭО) через сито с диаметром отверстий 12 мм (табл. 1), т.е. аналогичном ситу промышленного ГРВ. После испытания в остатке на сите проводится количественное определение абсолютно сухого вещества.

Эффективность работы оборудования узла роспуска волокнистых полуфабрикатов рассчитывают по следующей формуле:

$$КПЭ_р = \frac{О_{вх} - О_{вых}}{О_{вх}}$$

где $КПЭ_Р$ – ключевой показатель эффективности при роспуске,

$О_{вх}$ – масса а.с. остатка на сите при сортировании проб массы, отобранных в ванне ГРВ;

$О_{вых}$ − масса а.с. остатка на сите при сортировании проб массы, отобранных после прохождения ее через сито гидроразбивателя.

Линия грубого сортирования. Это целевое направление представлено различными сепараторами для отделения легких включений (пенопласта, скотча, и т.д.), а также центробежными очистителями для удаления более плотных, минеральных и металлических включений (песок, скрепки, и т.п.). Данный

технологический узел представлен турбосепаратором ГРСГ-200 и сепаратором VSV-30 (до модернизации) и напорной сортировкой STU-381, ГРСГ-200 и VSV-30 (после модернизации).

Ключевым показателем эффективности ($КПЭ_О$) служит отношение достигаемой степени очистки массы к максимально возможной степени очистки. Методика определения подразумевает использование прибора для определения эффективности ПЭО с ситом, диаметр отверстий перфорации у которого составляет 2,2 мм, аналогичном сортирующему ситу промышленного турбосепаратора ГРСГ-200 или напорной сортировки STU-381.

Эффективность работы оборудования для грубого сортирования макулатурной массы рассчитывают по следующей формуле:

$$КПЭ_О = \frac{m_{вх} - m_{вых}}{m_{вх}}$$

где $КПЭ_О$ – ключевой показатель эффективности стадии очистки,

$m_{вх}$ – масса а.с. остатка на сите при сортировании проб массы, поступающей в турбосепаратор;

$m_{вых}$ – масса а.с. остатка на сите при сортировании проб массы, отобранных после прохождения ее через сито турбосепаратора.

Линия тонкого сортирования.

Методика определения КПЭ подразумевает использование лабораторной щелевой сортировки «Соммервиль». Ключевой показатель эффективности ($КПЭ_С$) может быть вычислен подобно $КПЭ_О$:

$$КПЭ_С = \frac{m_{вх} - m_{вых}}{m_{вх}}$$

где $КПЭ_С$ – ключевой показатель эффективности при тонком сортировании,

$m_{вх}$ – масса а.с. остатка на сите при сортировании проб массы, поступающей на линию тонкого сортирования;

$m_{вых}$ – масса а.с. остатка на сите при сортировании проб массы, отобранных после прохождения ее через сито промышленной щелевой сортировки.

Фракционирование макулатурной массы. Назначение – разделение потока массы на длинно- и коротковолокнистую фракции, что позволяет снизить удельный расход электроэнергии на размол, улучшить параметры обезвоживания бумажной массы на БДМ, а также повысить показатели механической прочности готовой продукции.

В результате фракционирования определяется процентное содержание каждой фракции, остающейся на соответствующем сите. В качестве длинноволокнистой фракции используются фракции на ситах 1,2 и 0,6 мм, коротковолокнистой фракции – 0,3 и 0,15 мм.

Ключевые показатели эффективности данного технологического узла ($КПЭ_{ДВФ}$ и $КПЭ_{КВФ}$) должны учитывать уровень фракционирования, достигаемый на данном оборудовании, по отношению к максимально возможному качественному разделению потока на фракции, и рассчитываются следующим образом:

$$КПЭ_{ДВФ} = \frac{L_{произв.}}{L_{лаб.}}$$

$$КПЭ_{КВФ} = \frac{L_{лаб.}}{L_{произв.}}$$

$$КПЭ_{ф} = КПЭ_{ДВФ} \cdot КПЭ_{КВФ}$$

где $КПЭ_{ДВФ}$ и $КПЭ_{КВФ}$– ключевой показатель эффективности для длинно- и коротковолокнистой - фракции;

$КПЭ_{Ф}$ – ключевой показатель эффективности при фракционировании;

$L_{произв.}$ – длина волокна ДВФ/КВФ, полученных в производственных условиях;

$L_{лаб.}$ – длина волокна ДВФ/КВФ, полученных при лабораторном моделировании процесса фракционирования.

Размол длинноволокнистой фракции. Процесс размола макулатурной массы является основным технологическим приемом, способствующим восстановлению и регулированию ее бумагообразующих

свойств. Длинноволокнистая фракция макулатурной массы характеризуется заметно большей средней длиной волокна, низкой степенью помола и потенциально высокими прочностными свойствами. Для наиболее полного раскрытия бумагообразующего потенциала длинных волокон без существенного их укорочения требуется обеспечение оптимальных постоянных факторов размола (вид мельниц, схема их подключения, тип и рисунок гарнитуры и др.). Ключевой показатель эффективности процесса размола ДВФ ($КПЭ_{разм}$) должен базироваться на оценке отношения уровня физико-механических характеристик образцов из массы, размолотой в лабораторной мельнице и в производственных условиях при существующей настройке оборудования. При этом сопоставление свойств образцов необходимо проводить при одинаковой степени помола массы.

Из образцов массы, размолотой в промышленных условиях и на ЦРА до аналогичной степени помола, изготавливаются отливки массой 1 $м^2$ 125 г, которые подвергаются стандартным физико-механическим испытаниям. Для расчета ключевого показателя эффективности используется следующая формула:

$$КПЭ_{разм} = \frac{П_{произв.}}{П_{лаб.}}$$

где $КПЭ_{разм}$ – ключевой показатель эффективности при размоле;

$П_{произв.}$ – физико-механические показатели отливок, изготовленных из макулатурной массы, прошедшей стадию размола в производственных условиях;

$П_{лаб.}$ – физико-механические показатели отливок, изготовленных из макулатурной массы, прошедшей стадию размола в лабораторных условиях (на ЦРА).

Составление композиции бумажной массы по химикатам. На данной стадии присутствуют всевозможные типы смесителей для перемешивания макулатурной массы с химикатами. В наиболее простом случае – это одиночный смеситель, выполненный в виде врезки в массный трубопровод под углом 90°. Он представляет из себя шаровый кран, который одним концом присоединяется к штуцеру трубопровода, другим концом присоединяется к трубопроводу подачи химикатов. Эффективность перемешивания в этом случае сильно зависит от объемного расхода химиката, его вязкости и т.д. Поэтому, если объемный расход химиката незначительный, то прибегают к его дополнительному разбавлению перед дозированием. Основная цель данных устройств – обеспечить максимальное и быстрое перемешивание макулатурной массы с химикатами. В настоящее время данный аспект пренебрегается многими предприятиями, в результате чего происходит значительное увеличение расхода химических вспомогательных веществ, их накопление в коротком цикле и снижение производительности оборудования. Вследствие увеличения расхода химикатов снижается ключевой показатель эффективности на данной стадии, который рассчитывается относительно лабораторных данным по расходам химикатов.

Перемешивание на эталонной мешалке осуществляется в течение 30 сек для обеспечения максимальной сорбции химиката.

Для проведения эксперимента отбирается образец массы непосредственно из напорного ящика после введения всех химикатов. Из данного образца массы изготавливаются стандартные лабораторные отливки массой 1 $м^2$ 125 г с последующим определением стандартных физико-механических показателей продукции. В качестве эталонного образца в лабораторных условиях моделируется проба аналогичной композиции бумажной массы с точки зрения соотношения ДВФ и КВФ, которые отбираются из технологического потока до добавления химикатов. Перед лабораторным моделированием композиции по химикатам проба разбавляется регистровой водой до концентрации массы, соответствующей фактической концентрации в напорном ящике. После этого в массу добавляется химикат, для которого при разных расходах определяется ключевой показатель эффективности при перемешивании, и осуществляется перемешивание на магнитной мешалке. Далее изготавливают лабораторные отливки массой 1 $м^2$ 125 г с последующим определением физико-механических показателей. В качестве референсного расхода химиката принимают такой, при котором наблюдается сопоставимый уровень показателей качества лабораторных отливок и, полученных из бумажной массы промышленного приготовления.

Для расчета ключевого показателя эффективности используется следующая формула:

$$КПЭ_х = \frac{Р_{лаб.}}{Р_{произв.}}$$

где $Р_{лаб.}$ – расход химиката, полученный в лабораторных условиях, кг/т;

$Р_{произв.}$ – расход химиката, полученный в производственных условиях, кг/ т.

Ранее [12-16] были проведены расчетывышеуказанныхпоказателейдля каждой отдельной единицы технологического оборудования размольно-подготовительного отдела ООО «Сухонский КБК».

Ключевой показатель эффективности для технологической цепочки должен учитывать вклад каждой стадии технологического процесса, т.к. уменьшение КПЭ на предыдущей стадии влияет на эффективность работы последующей стадии. Данное влияние прекрасно отражает функция произведения КПЭ каждой стадии.

Например, для размольно-подготовительного отдела (РПО) данная формула могла бы выглядеть следующим образом:

$$КПЭ_{РПО} = КПЭ_р \cdot КПЭ_с \cdot КПЭ_ф \cdot КПЭ_{разм} \cdot КПЭх$$

где $КПЭ_р$ – ключевой показатель эффективности узлароспуска;

$КПЭ_{гс}$ – ключевой показатель эффективности узлагрубого сортирования;

$КПЭ_с$ – ключевой показатель эффективности узлатонкого сортирования;

$КПЭ_ф$ – ключевой показатель эффективности узла фракционирования;

$КПЭ_{разм}$ – ключевой показатель эффективности узларазмола;

$КПЭ_х$ – ключевой показатель эффективности узласоставления композиции бумажной массы по химикатам.

При обычном перемножении коэффициентов, которые заведомо меньше 1, фактический результат будет отражать недостоверные данные, т.к. необходимо учитывать вклад каждой стадии процесса в качество готовой продукции.

Вклад в качество готовой продукции предлагается рассматривать с позиции причин, которые привели к образованию брака готовой продукции или ее перевода в более низкие марки.С этой целью все причины образования брака готовой продукции или ее переводов были разделены на 2 группы:

1 группа – качество внешнего вида продукции, которое отражает вклад стадий роспуска и сортирования макулатурной массы. Основные виды брака:

– сорность;
– пятна (битумные, просвечивающие и др.);

2 группа – физико-механические показатели продукции, за исключением таких показателей как «поверхностная впитываемость при одностороннем смачивании», масса 1 $м^2$ и ее колебания по ширине полотна, влажность и ее колебания по ширине бумажного полотна, т.к. на них в первую очередь оказывают влияние параметры работы БДМ, а также расход функциональных химикатов.

Для определения вклада причин образования брака в качество готовой продукции был проведен статистический анализ с вычислением коэффициента значимости каждой группы.Для статистического анализа использована выборка причин переводов за двенадцать месяцев. Результаты представлены в таблице 2, 3.

Таблица 2 – Динамика изменения причин перевода

Группа	Месяц											
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*
1	0,0373	0,0154	0,0010	0,0037	0,0006	0,0209	0,0019	0,0054	0,0032	0,0040	0,0059	0,0006
2	0,0284	0,0038	0,0083	0,0029	0,0078	0,0081	0,0238	0,0202	0,0042	0,0085	0,0089	0,0133

Таблица 3 – Статистический анализ динамики изменения причин переводов с расчетом коэффициента значимости

Группа	Статистические данные				Коэф. значимости
	Среднее	*Мин*	*Макс*	*V, %*	
1	0,0083	0,0006	0,0373	133%	0,58
2	0,0115	0,0029	0,0284	72%	0,42

На основании данных таблиц 2, 3 можно отметить существенную вариацию вышеперечисленных групп переводов продукции (V составляет 133 и 72 %)

Расчет коэффициента значимости производился по формуле:

$$К_{з1} = 1 - \Gamma_1/(\Gamma_1 + \Gamma_2)$$

$$К_{з2} = 1 - \Gamma_1/(\Gamma_1 + \Gamma_2)$$

где $К_{з1}$ и $К_{з2}$ – коэффициент значимости 1 и 2 группы,

Γ_1 и Γ_2 – среднее значение доли 1 и 2 группы причин переводов по отношению к выработке.

Данная формула позволяет вычислить коэффициент значимости для каждой группы переводов. Фактические коэффициенты значимости по БДМ №1 и БДМ №2 составили 0,58 и 0,42 соответственно. Таким образом, формула расчета ключевого показателя эффективности для размольно-подготовительного отдела будет выглядеть следующим образом:

$$КПЭ_{РПО} = (КПЭ_р + (1 - КПЭ_р) * К_{з1}) * (КПЭ_{гс} + (1 - КПЭ_{гс}) * К_{з1}) * (КПЭ_с + (1 - КПЭ_с) * К_{з1}) * (КПЭ_ф + (1 - КПЭ_ф) * К_{з2}) * (КПЭ_{разм} + (1 - КПЭ_{разм}) * К_{з2}) * (КПЭ_х + (1 - КПЭ_х) * К_{з2})$$

где $КПЭ_р$ – ключевой показатель эффективности узлароспуска;

$КПЭ_{гс}$ – ключевой показатель эффективности узлагрубого сортирования;

$КПЭ_с$ – ключевой показатель эффективности узлатонкого сортирования;

$КПЭ_ф$ – ключевой показатель эффективности узлафракционирования;

$КПЭ_{разм}$ – ключевой показатель эффективности узларазмола;

$КПЭ_х$ – ключевой показатель эффективности узласоставления композиции бумажной массы по химикатам;

$К_{з1}$ и $К_{з2}$ – коэффициент значимости 1 и 2 группы.

Ключевые показатели эффективности работы оборудования должны иметь максимальное влияние на его целевое предназначение, причем для каждой единицы оборудования или узла технологической линии они будут индивидуальными. Оценка эффективности работы оборудования должна выявлять «узкие места» производства на основе измеряемых показателей, а также давать возможность для принятия оперативных мер по оптимизации каждой технологической операции. Результативный метод оценки эффективности работы оборудования должен учитывать его основные функциональные особенности с выявлением наиболее значимых КПЭ, наглядность и простоту их расчета, а также возможность *on-line* измерений наиболее значимых параметров работы оборудования и производства.

Результаты

В качестве примера приведен расчет ключевого показателя эффективности за трехлетний период с учетом коэффициентов значимости и проведенных модернизаций оборудования, которые включали:

- замену напорной сортировки грубого сортирования для увеличения производительности и снижения потерь волокна с отходами;
- замену сита фракционатора с целью увеличения эффективности разделения макулатурной массы на фракции по критерию «длина волокна»;
- установку конической мельницы для обеспечения фибриллирующего размола макулатурного волокна;
- установку системы перемешивания типа «Trumpjet» с целью увеличения эффективности взаимодействия катионного крахмала с макулатурной массой.

Исходные и расчетные данные представлены в таблице 3:

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

Ключевой показатель эффективности	До проведенных модернизаций	После проведенных модернизаций
1	2	3
$КПЭ_р$	0,92	0,92
$КПЭ_{гс}$	0,63	0,59
$КПЭ_{тс}$	0,64	0,64
$КПЭ_ф$	0,48	0,53

Продолжение таблицы 3

1	2	3
$КПЭ_{разм}$	0,83	0,85
$КПЭ_{х}$	0,50	0,78
$К_{з1}$	0,58	
$К_{з2}$	0,42	
$КПЭ_{РПО}$	0,31	0,39

Таким образом, расчетный ключевой показатель эффективности оборудования размольно-подготовительного отдела после проведенных мероприятий увеличился до 0,39 (т.е. на 29%). Фактический отклик от проведенных мероприятий составил:

- увеличение производительности линии грубого сортирования;
- снижение энергозатрат на размол и предотвращение дополнительного измельчения мелкой фракции макулатурного волокна, содержащегося в длинноволокнистой фракции (при обеспечении эффективного фракционирования);
- снижение себестоимости продукции за счет снижения удельной нормы расхода катионного крахмала на 51,8% и создание предпосылок для увеличения производительности бумагоделательной машины (снижение степени помола массы в напорном ящике на 38,9%, ускорение интенсивности обезвоживания массы на сеточном столе на 42,9% по критерию продолжительности водоотдачи массы). Экономический эффект при этом составил 10,118 млн. руб./год.

Процесс производства тарного картона является типичной системой в рамках понятия «системного анализа», поэтому оптимизация данных отдельных единиц оборудования привела к общему «системному эффекту», который выразился в увеличении качества готовой продукции и повышении производительности бумагоделательных машин на 23%.

Заключение

Разработанный метод определения ключевых показателей эффективности был успешно реализован применительно к оборудованию размольно-подготовительного отдела ООО «Сухонский КБК». В процессе анализа были выявлены «узкие» места производства с последующей их модернизацией. Результатом модернизации явилось увеличение производительности бумагоделательных машин на 23%, при увеличении качества готовой продукции.

Метод определения КПЭ может быть применен к любому виду оборудования при условии подбора лабораторного аналога, которое применяется в качестве эталона.

Литература

1. Pycraft C., Howarth P. Does better paper mean worse waste paper? // Paper Technology and Industry. – 1980. – Т. 21. – № 12. – С. 321-324.

2. Weise U. Hornification: mechanisms and terminology // Paperi ja puu. – 1998. – Т. 80. – № 2. – С. 110-115.

3. Hubbe M.A., VendittiR.A., Rojas O.J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? Areview / // BioResources. – 2007. – Т. 2. – № 4. – С. 739-788.

4. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги / Архангельск: Издательство Архангельского Государственного Университета, 2007. – 1118 с.

5. Жирнова И.М., Блинушова О.И., Дулькин Д.А., Севастьянова Ю.В. Основные тенденции изменения качества макулатуры марки МС-5Б // Сборник материалов, 16-я Международная научно-техническая конференция «Работа целлюлозно-бумажных предприятий в современных условиях». – 2015. С. 61-66.

6. Синчук А.В., Спиридонов В.А., Жирнов Д.Н., Овсянникова Е.А. Механическая оптимизация процессов при минимальном расходе химических добавок–лучший способ повышения прочности тарного картона из макулатуры //Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2012. – №. 10. – С. 56-60.

7. Синчук А.В., Блинушова О.И., Южанинова Л.А., Жирнов Д.Н. Влияние интенсивности перемешивания вспомогательных добавок с макулатурной волокнистой суспензией на физико-

механические показатели бумаги // материалы и доклады 14-й международной научно-технической конференции в п. Караваево, 23 – 23 мая 2013 г. С. 33-38.

8. Синчук А.В., Блинушова О.И., Овсянникова Е.А., Жирнов Д.Н. Значимость механической стабилизации процессов при изготовлении тарного картона из макулатуры // материалы II Международной Научно-технической конференции посвященной памяти профессора В.И. Комарова, Архангельск: САФУ, - 2013. С. 169-175.

9. Гринин А. Управление заводом в стиле кайдзен: Как снизить затраты и повысить прибыль. Москва: Альпина Паблишер– 2012. – 189 с.

10. Вумек Д., Джонс Д., Дэниел В. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании – Москва: Альпина Паблишер, 2011. – 476 с.

11. Жирнов Д.Н., Дулькин Д.А., Дьякова Е.В. Оценка эффективности работы бумажной фабрики //Вестник технологического университета». – 2015. – Т. 18. – №. 4. – С. 130-133.

12. Дулькин Д.А., Жирнов Д.Н., Блинушова О.И., Лавров И.В., Южанинова Л.А. Практическая реализация результатов исследований интенсивности перемешивания химических вспомогательных веществ с макулатурной массой // сборник материалов, 15-ая Международная научно-техническая конференция, пос. Караваево, 29 – 30 мая 2014 г. С. 32-38.

13. Жирнов Д.Н., Дьякова Е.В., Дулькин Д.А. Совершенствование технологии подготовки макулатуры на основе оценки ключевых показателей эффективности // материалы III Международной Научно-технической конференции посвященной памяти профессора В.И. Комарова. Архангельск: САФУ. – 2015. – С. 159-164.

14. Жирнов Д.Н., Дернова Е.В., Блинушова О.И. Определение ключевого показателя эффективности работы размалывающей гарнитуры // сборник материалов, 17-ая Международная научно-техническая конференция, пос. Караваево, 26 мая 2016 г. С. 30-33.

15. Жирнов Д.Н., Дернова Е.В. Определение эффективности работы оборудования для роспуска волокнистых полуфабрикатов с использованием ключевых показателей эффективности (КПЭ) //Теория и практика современной науки. – 2016. – №. 7. – С. 134-137.

16. Жирнов Д.Н., Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Использование ключевых показателей эффективности для оптимизации процесса подготовки массы при производстве тарного картона// сборник материалов IV Международной научно-технической конференции посвященной памяти В.И. Комарова «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», Архангельск: САФУ. - 2017. С. 189-194.

© **Жирнов Д.Н.** – инженер-технолог-химик, ООО «Сухонский картонно-бумажный комбинат», e-mail: d.n.zhirnov@gmail.com; **Дернова Е.В.** –канд. техн. наук, зам. генерального директора по научно-технологическим вопросам ООО «Управляющая компания «Объединенные бумажные фабрики», e-mail: edernova@ukobf.com; **Дулькин Д.А.** – д-р техн. наук, профессор, генеральный директор ООО «Управляющая компания «Объединенные бумажные фабрики», e-mail: ddulkin@ukobf.com.

UDC 676.026

DEVELOPMENT OF METHODS OF EVALUATING THE PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF STOCK PREPARATION IN THE PRODUCTION OF PAPER AND CARDBOARD

D.N. Zhirnov, E.V. Dernova, D.A. Dulkin

Nowadays, there are many different methods for evaluation of industrial production performance factory ("OEE", "Kaizen et al.). Those methods are widely used and based on economic indicators, without technological features of every equipment. This article is about the testing evaluation method of key performance indicators (KPI) applying to the typical stock preparation of the cardboard factory. KPI is based on using equipment key indicator as a base of performance evaluation individual equipment or the technological process. For this, the appropriate laboratory equipment was selected, the method KPI was developed and the individuals KPI was evaluated for every equipment. In the conclusion, total KPI of the whole technological process of stock preparation was evaluated.

Keywords: *equipment performance,productivity, cardboard, process control, wastepaper.*

References

1. Pycraft C., Howarth P. Do es better paper mean worse waste paper? // Paper Technology and Industry. – 1980. – T. 21. – № 12. – C. 321-324.

2. Weise U. Hornification: mechanisms and terminology // Paperi ja puu. – 1998. – T. 80. – № 2. – C. 110-115.

3. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review // BioResources. – 2007. – T. 2. – № 4. – C. 739-788.

4. Dul'kin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. [Current state and prospects of using recycled paper fibers in the global and domestic paper industry] –Arhangel'sk: Izdatel'stvo Arhangel'skogo Gosudarstvennogo Universiteta [Arkhangelsk: Publishing House Of Arkhangelsk State University], 2007. – p. 1118.

5. ZHirnova I.M., Blinushova O.I., Dul'kin D.A., Sevast'yanova YU.V. [Themaintrendin changing wastepaper quality MS-5B] Sbornikmaterialov, 16-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Rabota cellyulozno-bumazhnyh predpriyatij v sovremennyh usloviyah" [Collection of materials, 16th international scientific and technical conference "Work of pulp and paper enterprises in modern conditions"]. – 2015. pp. 61-66.

6. SinchukA.V., SpiridonovV.A., ZHirnovD.N., OvsyannikovaE.A.[Mechanical optimization of processes with a minimum consumption of chemical additives is the best way to increase the strength of cardboard from waste paper]Cellyuloza. Bumaga. Karton [Cellulose. Paper. Board]. – 2012. – №. 10. – pp. 56-60.

7. Sinchuk A.V., Blinushova O.I., YUzhaninova L.A., ZHirnov D.N. [Effect of mixing intensity of chemical additives with waste fiber suspension on physical and mechanical properties of paper] Materialy i doklady 14-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii v p. Karavaevo [Materials and reports of the 14th international scientific and technical conference in Karavaevo], - 2013. pp. 33-38.

8. Sinchuk A.V., Blinushova O.I., Ovsyannikova E.A., ZHirnov D.N. [The importance of mechanical stabilization of processes in the manufacture of cardboard from waste paper] Materialy II Mezhdunarodnoj Nauchno-tekhnicheskoj konferencii posvyashchennoj pamyati professora V.I. Komarova [Proceedings of the II International Scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor V. I. Komarov], Arkhangelsk: NARFU, - 2013. pp. 169-175.

9. Grinin A. [Kaizen-style plant management: How to reduce costs and increase profits] Moscow: Alpina Publisher – 2012. – p. 189.

10.Vumek D., Dzhons D., Deniel V. [Lean manufacturing: How to get rid of losses and achieve prosperity of your company] – Moscow: Alpina publisher, 2011. – p. 476.

11. ZHirnov D.N., Dul'kin D.A., D'yakova E.V. [Production performance evaluation of paper mill]Vestnik tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan technological University]. – 2015. – T. 18. – №. 4. – pp. 130-133.

12. ZHirnov D.N., Blinushova O.I., Lavrov I.V., YUzhaninova L.A. [Practical implementation of the results of studies of the intensity of mixing of chemical excipients with waste stock] Sbornik materialov, 15-aya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya, pos. Karavaevo [Collection of materials, 15th international scientific and technical conference in Karavaevo], 2014. pp. 32-38.

13. ZHirnov D.N., Dul'kin D.A., D'yakova E.V. [Improving the technology of waste paper preparation based on the assessment of key performance indicators] Materialy III Mezhdunarodnoj Nauchno-tekhnicheskoj konferencii posvyashchennoj pamyati professora V.I. Komarova [Proceedings of the III International Scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor V. I. Komarov], Arkhangelsk: NARFU – 2015. – pp. 159-164.

14. ZHirnov D. N., Dernova E. V., Blinushova O. I. [Determination of the key performance indicator of the grinding headset]Sbornikmaterialov, 17-aya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya, pos. Karavaevo [Collection of materials, 17th international scientific and technical conference inKaravaevo], 2016. pp. 30-33.

15. ZHirnov D.N., Dernova E.V.[Determination of the equipment efficiency for the waste paper pulping using key performance indicators (KPI)]Teoriya i praktika sovremennoj nauki [Theory and practice of modern science]. – 2016. – №. 7. – pp. 134-137.

16. ZHirnov D.N., Dernova E.V., Dul'kin D.A. [Use of key performance indicators to optimize the mass preparation process in the production of cardboard]MaterialyIVMezhdunarodnojNauchno-tekhnicheskojkonferenciiposvyashchennojpamyatiprofessora V.I. Komarova [Proceedings of the IV

International Scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor V. I. Komarov], Arkhangelsk: NARFU. - 2017. pp. 189-194.

© **ZHirnov D.N.** – engineer-technologist, LLC «The Sukhonsky Paperboard and Paper Mill», e-mail: d.n.zhirnov@gmail.com; **Dernova E.V.** –candidateoftechnicalscience, deputy general director for scientific and technological issues LLC «The Consolidated Paper Mills Management Company», e-mail: edernova@ukobf.com; **Dul'kin D.A.**–doctorofengineering, professor, general directorLLC«The Consolidated Paper Mills Management Company», e-mail: ddulkin@ukobf.com.

УДК 61.728.8

ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

Н.Х. Нгиа, Л.А. Зенитова, Д.Б. Просвирников, Р.Г . Сафин

Исследован процесс получения микрокристаллической целлюлозы из рисовой шелухи. Неорганические вещества и лигнин в рисовой шелухе удаляются после щелочной варки. Полученный твердый остаток используют для изготовления микрокристаллической целлюлозы в 3 этапа: отбеливание - гидролиз - дробление. В результате, была получена микрокристаллическая целлюлоза с размерами частиц в диапазоне от 300 до 450 нм, выход продукта составил 30% от исходного материала.

***Ключевые слова**: лигноцеллюлозные отходы, рисовая шелуха, микрокристаллическая целлюлоза, щелочная варка, лигнин, отбеливание*

Введение

В настоящее время растительная лигноцеллюлозная биомасса, включая древесное или недревесное сельскохозяйственное сырье, содержащее волокна, разнообразна и пригодна для производства многих полезных продуктов [11, 12]. Это возобновляемый материал, обеспечивающий получение химических веществ и материалов, необходимых для промышленности [1, 2].

Рисовая шелуха (РШ) - это внешний слой зерна, удаляемый после измельчения, масса которого составляет около 20% от массы зерна [3], является отходом производства риса. Каждый год в странах-производителях риса, таких как Китай, Тайланд, Филиппины, Вьетнам, Индия, образуется огромное количество сельскохозяйственных отходов. Расчетное годовое количество РШ в мире составляет около 800 000 тонн [4]. Из-за трудностей сбора, хранения и транспортировки, а также из-за отсутствия соответствующих технологий переработки, возможность использования потенциала этой возобновляемой биомассы все еще ограничена. Лишь небольшая часть РШ используется в качестве источника топлива для промышленности и бытовых целей. Большинство из них выбрасываются в реки или сжигаются, вызывая проблемы загрязнения окружающей среды.

В составе рисовой шелухи содержится 35 - 40% целлюлозы [5]. Поскольку длина целлюлозных волокон рисовой шелухи довольно короткая, использование ее для производства бумаги неэффективно [10]. В данном исследовании представлены результаты получения микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) из рисовой шелухи, которую можно использовать во многих различных областях: в фармацевтике, косметике, а также в качестве наполнителей при производстве композиционных полимерных материалов.

В мировой научной литературе описываются исследования по выделению ценных компонентов из РШ. Однако сведения, касающиеся технологии совместного получения полезных ингредиентов из РШ весьма ограничены. В этой связи целесообразно использовать РШ, являющуюся отходом производства, в качестве сырья для получения МКЦ и лигнина (Л).

Исследования по выявлению условий одновременного извлечения из отходов рисо вого производства (РП) РШ МКЦ и Л, отличающихся от существующих способов меньшими энергетическими затратами и экологичностью, являются актуальными и целесообразными [6, 7].

Методы и материалы

В качестве объекта исследования использовалась шелуха риса с производства переработки риса в провинции с ТхайБинь, Вьетнам. Содержание основных компонентов шелухи: 30,3% целлюлозы; 33,4% лигнина; 15,7% золы. Концентрации реагентов, использованных в работе: раствор NaOH - 100 г/л; раствор ClO_2 - 18,46 г/л; раствор H_2O_2 - 300 г/л; раствор H_2SO_4 - 40%. Эксперимент проводился со 100 г рисовой шелухи. На первом этапе для выделения неорганических соединений и лигнина из рисовой шелухи производили процесс варки раствором NaOH 17,5% при 100°C в течение 2,5 часов. Полученный твердый остаток после щелочной варки, использовался для получения МКЦ. На следующем этапе производили процесс отбеливания, включающий три основных этапа: Д0 - Щ0 - Д1. На стадиях Д0 и Д1 с целью удаления лигнина используется ClO_2. На стадии Щ0 используется H_2O_2 в щелочной среде. Условия процесса отбеливания: общий расход ClO_2 - 8%, расход H_2O_2 и NaOH 1%, температура 60 – 65°C, время отбеливания 50 – 60 минут для каждой стадии. После процесса отбеливания беленую целлюлозу гидролизовали серной кислотой при повышенных температурах для укорачивания длины целлюлозных волокон путем разложения аморфных участков в структуре волокон при следующих условиях:

- соотношение (исходный материал : раствор) составляло 1:10 (10 г материал на 100 мл раствора);
- расход 40% H_2SO_4: 5% по отношению к беленой целлюлозе (эквивалентно концентрации 0,5 г/100 мл раствора);
- температура обработки: 120 – 150 °C;
- время процесса: 2 часа.

Были использованы следующие методы исследования: ИК-спектрометрия (Фурье спектрометр Thermo Scientific Nikolet iS10); сканирующая электронная микроскопия на растровом микроскопе FESEM; рентгеновская дифракция (D8-Advance); анализ размеров частиц (ZetasizerNano-ZS, MalvernInstrumentsLtd). Определение зольности проводилось в соответствии с ГОСТ Р 56888-2016, содержание целлюлозы - азотно-спиртовым методом, содержание массовой доли Л в РШ – количественным методом, основанном на извлечении лигнина в виде твердого остатка после гидролиза углеводной части и удаления экстрактивных веществ органическими растворителями (сернокислотный метод).

Результаты и обсуждение

Рисовая шелуха - продукт биологического происхождения и представляет собой многокомпонентную композицию, как и другие древесные и недревесные материалы (бамбук, солома и т.д.). Основной химический состав РШ характеризуется полисахаридами (целлюлоза, гемицеллюлоза), лигнином, экстрактивными и неорганическими веществами, которые можно выделить [8].

Было проанализировано содержание компонентов в рисовой шелухе. Анализ состава РШ показал высокое содержание в ней лигнина и неорганических веществ. Из данных таблицы 1 видно, что содержание неорганических веществ (в основном диоксид кремния) в рисовой шелухе особенно высокое.

Таблица 1 – Компоненты РШ

Компоненты	Содержание, % масс.
Целлюлоза	36.0
Лигнин	33.4
Диоксид кремния	15.7

Процесс получения МКЦ состоит из нескольких этапов. Общая схема процесса показана на рис. 1. Из 100 г исходного материала после процесса щелочной варки получался 55 г твердого остатка (небеленая целлюлоза).

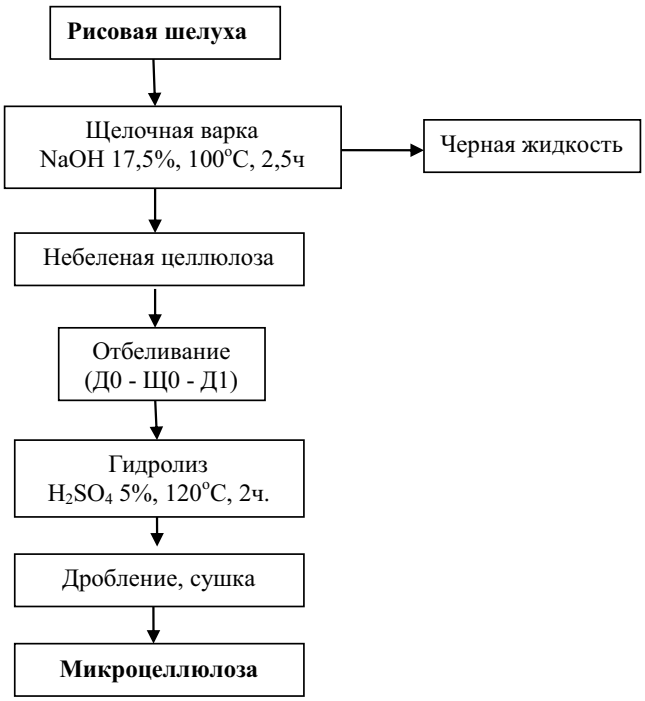


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема производства микроцеллюлозы из рисовой шелухи

На следующем этапе, производят процесс отбеливания для получения беленой целлюлозы. Чтобы получить высококачественную целлюлозу (выраженную через такие параметры, как белизна, содержание примесей в продукте), необходимо провести процесс отбеливания. По сути, это процесс удаления соединений лигнина и хромофоров, которые присутствуют в небеленой целлюлозе. Некоторые агенты, такие как хлор, гипохлорит NaClO, диоксид хлора ClO_2, пероксид водорода H_2O_2 в щелочной среде, могут быть использованы в процессе отбеливания [9]. Концентрация химических агентов и процессы отбеливания применяется в зависимости от характеристик обрабатываемого материала и требований к конечному продукту. Целью исследования является получение продуктов с белизной более 80% и высоким выходом. Схема разработанного процесса отбеливания с тремя основными этапами Д0 - Щ0 - Д1 приведена на рисунке 2.

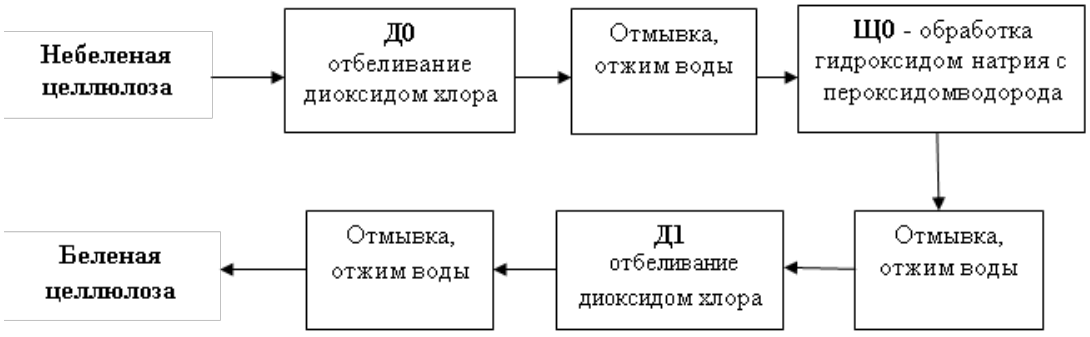


Рис. 2. Технологическая схема процесса отбеливания целлюлозы

На стадиях Д0 и Д1, ClO_2 используется с целью удаления лигнина. По сравнению с другими отбеливающими агентами ClO_2 незначительно влияет на полисахарид в клетках РШ и окружающую среду. Количество ClO_2 варьировалось в минимальном диапазоне 2-10 % по сравнению с исходными материалами с фиксированным распределением 60 % для периода Д0 и 40 % для периода Д1. Процесс отбеливания проводят при умеренной температуре 60-65 °С, время отбеливания 50-60 минут для каждой стадии.

На стадии Щ0 используется H_2O_2 в щелочной среде для окисления и превращения функциональных спиртовых, кетонных, метоксильных групп и хромофоров в кислоты: уксусную, малеиновую,

бензойную, фталевую и т.п. Эти соединения легко удаляются при отмывке водой. Расход H_2O_2 1% и расход NaOH 1% от массы исходного материала - небеленая целлюлоза.

Результаты исследования влияния расхода диоксида хлора на белизну и выход целлюлозы, приведенные на рисунке 3, показывают, что с ростом количества диоксида хлора и белизна, и выход увеличиваются. При расходе 8% ClO_2, белизна целлюлозы достигла 82,5%, а выход - 80%. Необходимо подчеркнуть, что даже при увеличении расхода диоксида хлора до 10%, выход целлюлозы оставался практически неизменённым. Поэтому использование диоксида хлора в количестве 8% является оптимальным.

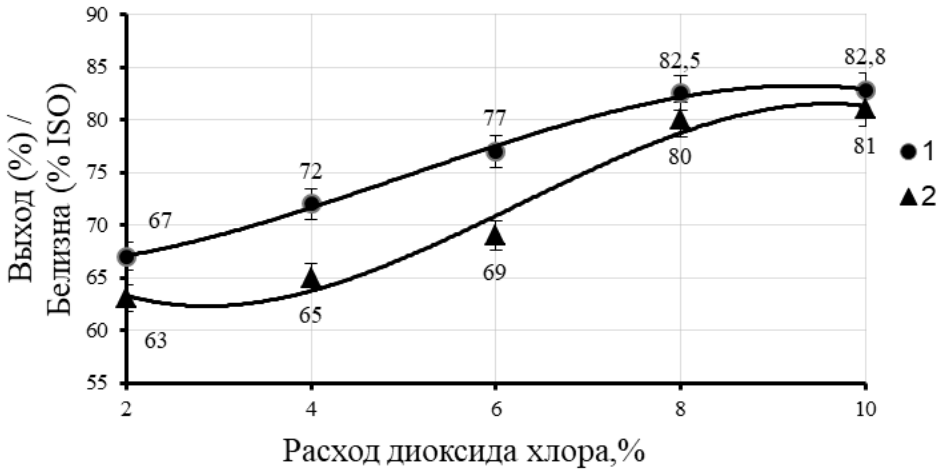


Рис. 3. Влияние количества диоксида хлора на белизну (1) и выход целлюлозы (2)

Свойства целлюлозы до и после отбеливания приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Свойства целлюлозы до и после отбеливания

Свойства	Небеленая целлюлоза	Отбеленная целлюлоза
Содержание целлюлозы,%	57,3	65,0
Содержание лигнина,%	2,72	1,42
Зольность,%	2,35	2,10
Белизна, %	–	82,5
Выход,%	55	45

Результаты исследования свойств целлюлозы до и после отбеливания, приведенные в табл. 2, показывают, что после процесса отбеливания содержание целлюлозы увеличилось, а содержание лигнина значительно уменьшилось, так как под воздействием химических реагентов и температуры лигнин подвергается деструкции и удаляется.

Уровень кристалличности (рассчитывается на основе анализа дифракционного спектра - рис. 4) беленой целлюлозы выше, чем у небеленой, из-за процессов разрушения аморфных участков целлюлозных волокон.

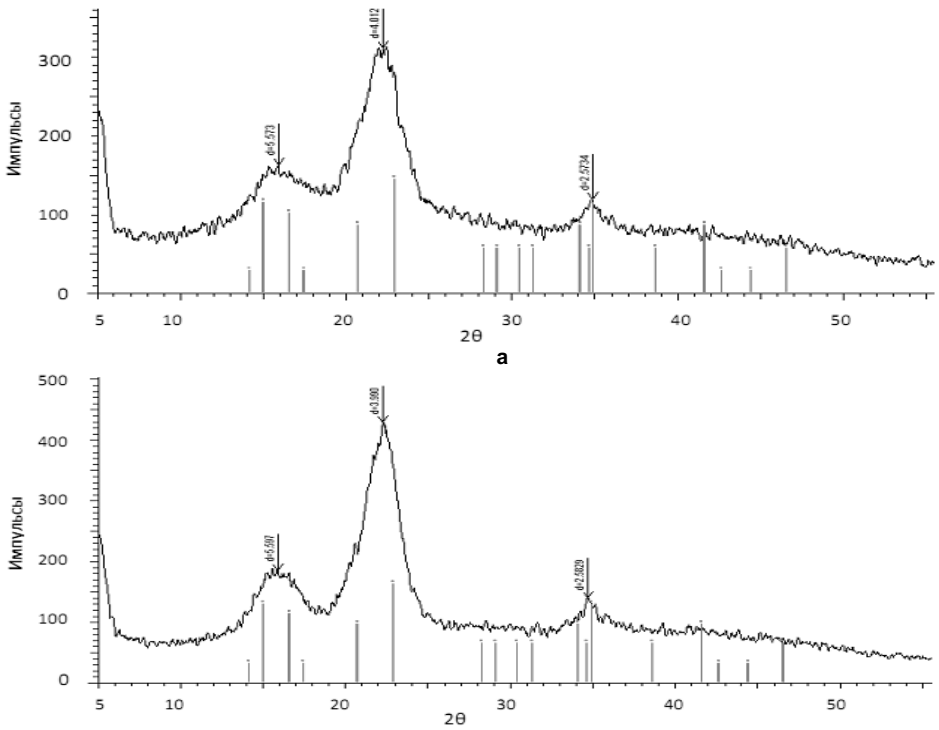


Рис. 4. Рентгеновский спектр небеленой целлюлозы (а) и беленой целлюлозы (б)

Анализ СЭМ-изображений образцов целлюлозы до и после отбеливания (рис. 5) показывает, что отбеливание изменило структуру волокон. В процессе отбеливания, под действием ClO_2, NaOH и H_2O_2 происходит отделения волокон целлюлозы.

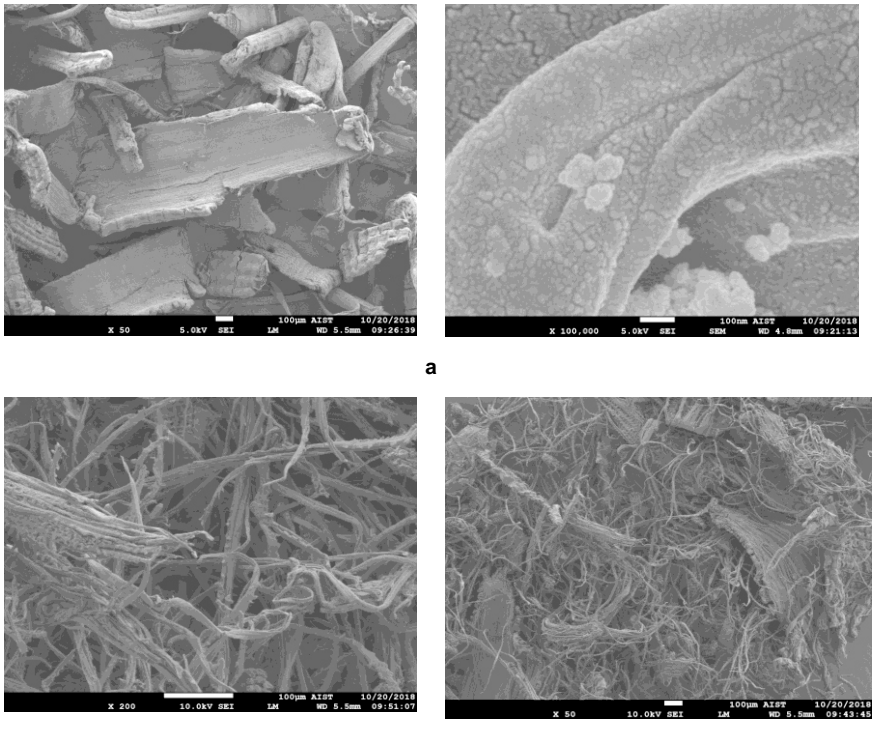


Рис. 5. СЭМ-изображения небеленой (а) и беленой целлюлозы (б)

Способ изготовления МКЦ является сочетанием химической обработки и механического дробления. Использование этого метода может значительно снизить затраты энергии на дробление. По сути, это процесс укорачивания длины целлюлозных волокон путем гидролитической деструкции аморфных участков в структуре целлюлозных волокон. На стадии обработки химическими агентами, беленую целлюлозу гидролизуют пероксидом водорода при высоких температурах в серной кислоте при следующих технологических параметрах:

- соотношение исходный материал : раствор = 1:10 (10г материал в 100мл. раствора);
- расход H2SO4: 5% по отношению к беленой целлюлозе (эквивалентно концентрации 0,5г/100мл раствора);
- температура обработки: 120 - 150оС
- время гидролиза: 2 часа.

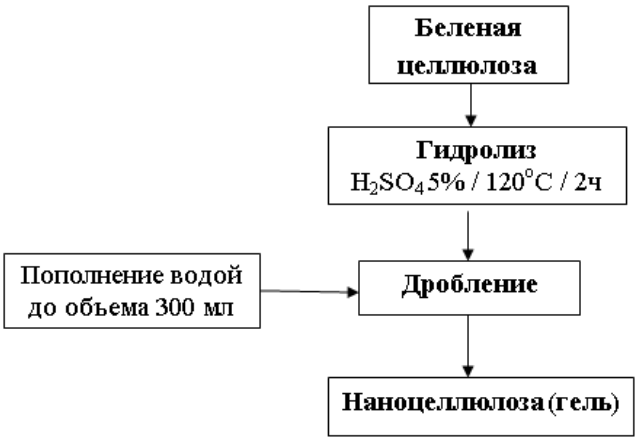


Рис. 6. Схема процесса получения МКЦ из беленой целлюлозы рисовой шелухи

В процессе гидролиза, серная кислота диффундирует в аморфный участок целлюлозы, где происходит разрушение гликозидных связей под действием SO^{3-}, что приводит к укорачиванию целлюлозных волокон.

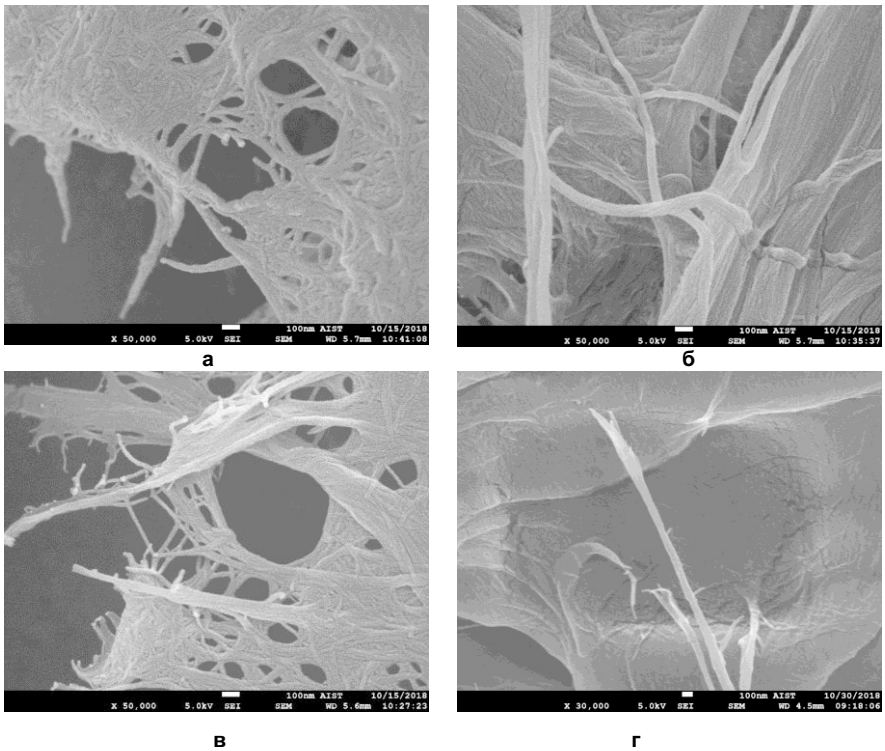


Рис. 7. СЭМ-изображения МКЦ, полученной при температуре обработки: а – 120 °С; б- 130 °С; в- 140 °С; г – 150 °С

Температура обработки выбрана в диапазоне температур от 120 до 150°С, поскольку при более низких температурах уровень гидролиза целлюлозы довольно низкий. Чем выше температура, тем больше деструкция гемицеллюлоз и целлюлозы на пентозу и глюкозу. Целью исследования является определение оптимальных температурных условий для получения МКЦ с наибольшим выходом.

После дробления, структуру МКЦ исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа с разрешением 30000 – 100000 раз для определения размера и морфологии волокна. Анализ электронной микрофотографии целлюлозы, которая обрабатывается при разных температурах, показывает, что, чем выше температура обработки, тем эффективнее дефибриляция волокна (в диапазоне от 120 до 150°С) (рис. 7).

Влияние температуры обработки на выход МКЦ представлено в табл. 3. Видно, что с ростом температуры, выход продукта значительно снижается. Таким образом, гидролиз целесообразно проводить при температуре 120 °С, что приводит к снижению энергетических затрат и снижению парникового эффекта.

Таблица 3 – Влияние температуры гидролиза на выход МКЦ

Выход,%	Температура гидролиза, °С			
	120	***130***	***140***	***150***
По отношению к беленой целлюлозе	68,25	56,70	46,60	38,25
По отношению к рисовой шелухе	30,71	25,15	21,14	17,05

Анализ инфракрасных спектров (рис. 8) показывает наличие всех наиболее характерных полос поглощения целлюлозы: 3300 – 3500, 2925, 1428, 1165 $см^{-1}$. В частности, полосы поглощения 1428 $см^{-1}$ и 2925 $см^{-1}$ характерны для изменения деформации и валентных колебаний звена –СН–, полоса поглощения 1165 $см^{-1}$ характерна для эфирной связи и полоса поглощения 3472 $см^{-1}$ характеризует валентное колебание гидроксильной группы.

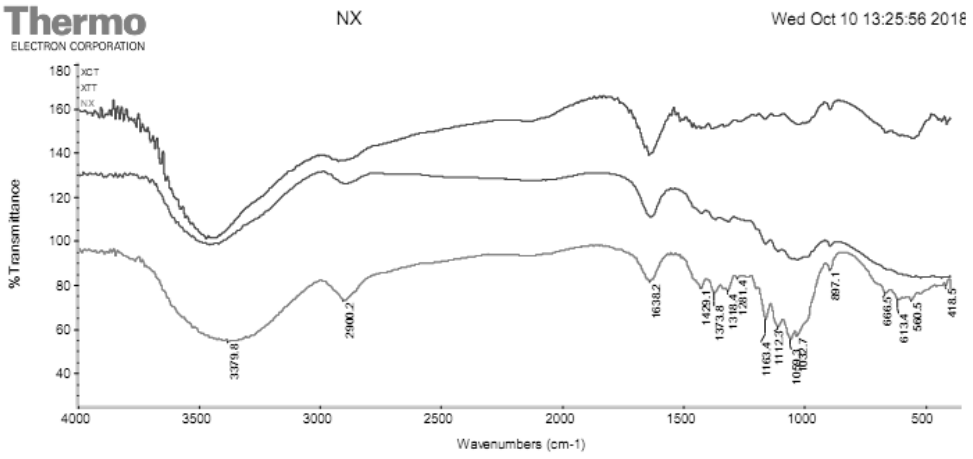


Рис. 8. ИК-спектр МКЦ, полученной при 120 °С в течение 2 ч (ХСТ), беленой целлюлозы (ХТТ) и небеленой целлюлозы (NX)

Результаты FTIR-спектрального анализа небеленой, беленой целлюлозы и МКЦ, полученной при 120 °С (рис. 8) показали, что полученный продукт имеет волокнистую структуру, а в процессе гидролиза не образуются новые связи.

Анализ кристаллического уровня МКЦ с помощью рентгеновских спектров (рис. 9) показал, что она имеет кристаллический уровень 65,2 %, что ниже, чем у беленой целлюлозы (71,9 %). Это доказывает, что гидролиз влияет не только на аморфные, но и на кристаллические участки волокна. Деструкция таких участков приводит к снижению уровня кристалличности.

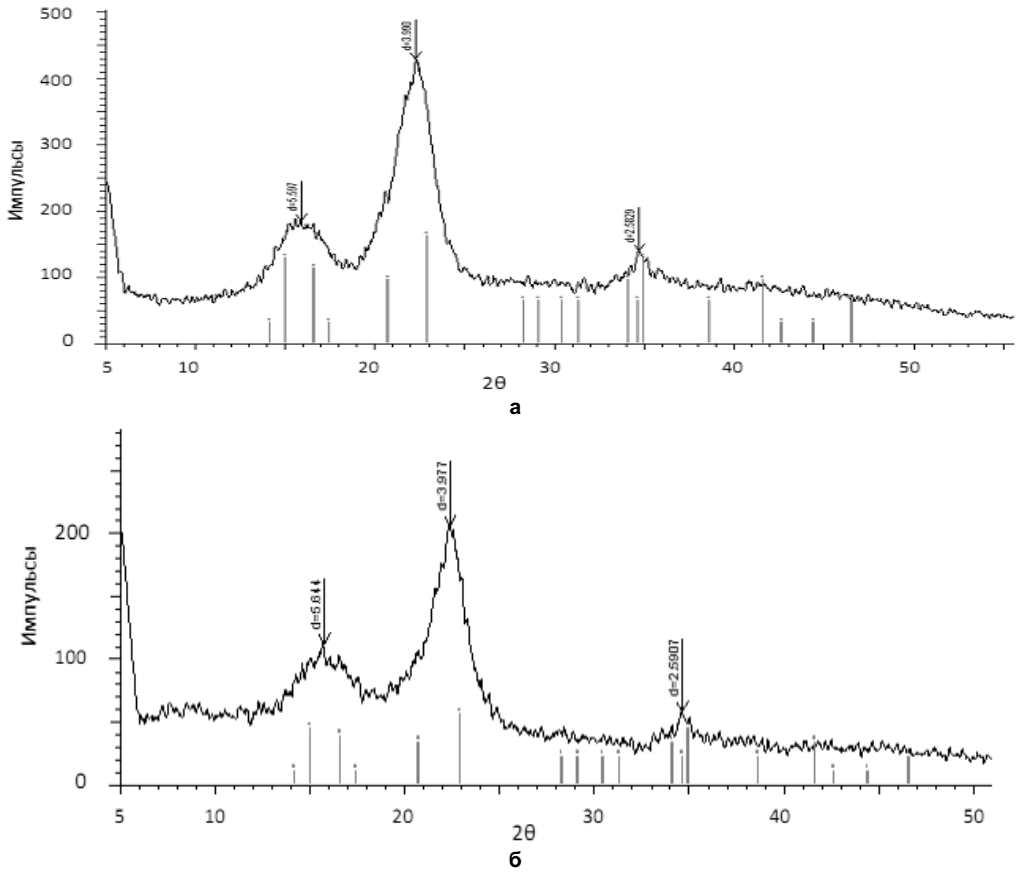


Рис. 9. Рентгеновский спектр беленой целлюлозы (а) и МКЦ (б)

Из результатов СЭМ - изображения МКЦ (рис. 7), а также определения среднего размера и распределения частиц по размерам (больше 95% частицы имеют размеры в диапазоне 300-400 нм) (рис. 10) по классификации, полученный продукт представляет собой МКЦ в форме коротких волокон.

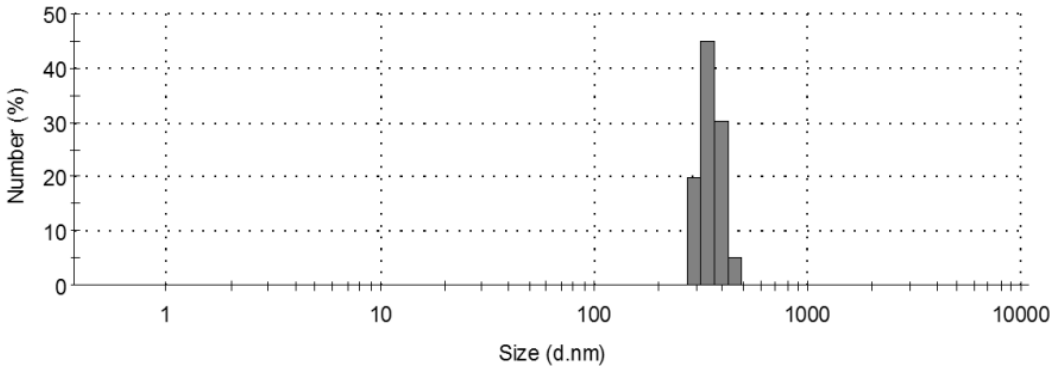


Рис. 10. Средний размер и распределения НЦ по размерам

Вывод

Таким образом, на основе комбинации нескольких этапов обработки, получена МКЦ, выход продукта составил 30,71 % масс. от исходной рисовой шелухи. Процесс получения МКЦ решает проблему утилизации сельскохозяйственных отходов - рисовой шелухи, и одновременно создает полезный продукт для дальнейшего использования.

Литература

1. J. Yu, J. Zhang, J. He, Z. Liu, and Z. Yu, “Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull,” Bioresour. Technol., vol. 100, no. 2, pp. 903–908, 2009.
2. P. N. Babaso and H. Sharanagouda, “Rice Husk and Its Applications: Review,” Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci., vol. 6, no. 10, pp. 1144–1156, 2017.
3. FAO, “FAO Rice Market Monitor (RMM), Volume XXI, Issue No. 1,” 2018.
4. D. B. Yahaya and T. G. Ibrahim, “Development of rice husk briquettes for use as fuel,” Res. J. Eng. Appl. Sci., vol. 1, no. 2, pp. 130–133, 2012.
5. K. A. Motghare, A. P. Rathod, K. L. Wasewar, and N. K. Labhsetwar, “Comparative study of different waste biomass for energy application,” Waste Manag., vol. 47, pp. 40–45, 2016.
6. V. I. Kuprianov, R. Kaewklum, K. Sirisomboon, P. Arromdee, and S. Chakritthakul, “Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk,” Appl. Energy, vol. 87, no. 9, pp. 2899–2906, 2010.
7. M. Fang, L. Yang, G. Chen, Z. Shi, Z. Luo, and K. Cen, “Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed,” Fuel Process. Technol., vol. 85, no. 11, pp. 1273–1282, 2004.
8. P. T. M. Thao, K. H. Kurisu, and K. Hanaki, “Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam,” Biomass and Bioenergy, vol. 35, no. 8, pp. 3656–3666, 2011.
9. P. Kumar, D. M. Barrett, M. J. Delwiche, and P. Stroeve, “Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production,” Ind. Eng. Chem. Res., vol. 48, no. 8, pp. 3713–3729, 2009.
10. T. Abitbol et al., “Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications,” Curr. Opin. Biotechnol., vol. 39, no. I, pp. 76–88, 2016.
11. Prosvirnikov D. B., Timerbaev N. F., Safin R. G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompanying its Preparation //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2019. – T. 945. – C. 911-918.
12. Prosvirnikov D. B., Safin R. G., Zakirov S. R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications, 2018. – T. 284. – C. 773-778.

© **Нгиа Н.Х.** – аспирант кафедры «Технологии синтетического каучука», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: ngohongnghia@gmail.com; **Зенитова Л.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: ngohongnghia@gmail.com; **Просвирников Д.Б.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; **Сафин Р.Г.** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: safin@kstu.ru

УДК 61.728.8

OBTAINING MICROCRYSTALLINE CELLULOSE FROM RICE HUSK

N.H. Ngia, Zenitova L.A., D.B. Prosvirnikov, R.G. Safin

The process of obtaining microcrystalline cellulose from rice husk is investigated. Mulberries are removed after alkaline cooking. The obtained solid residue is used for the manufacture of microcrystalline cellulose in 3 stages: bleaching - hydrolysis - crushing. The result is a microcrystalline cellulose with a particle size in the range from 300 to 450 nm, the product yield is 30% of the starting material.

***Keywords**: lignocellulosic waste, rice husk, microcrystalline cellulose, alkaline cooking, lignin, bleaching*

References

1. J. Yu, J. Zhang, J. He, Z. Liu, and Z. Yu, “Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull,” Bioresour. Technol., vol. 100, no. 2, pp. 903–908, 2009.

2. P. N. Babaso and H. Sharanagouda, “Rice Husk and Its Applications: Review,” Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci., vol. 6, no. 10, pp. 1144–1156, 2017.

3. FAO, “FAO Rice Market Monitor (RMM), Volume XXI, Issue No. 1,” 2 018.

4. D. B. Yahaya and T. G. Ibrahim, “Development of rice husk briquettes for use as fuel,” Res. J. Eng. Appl. Sci., vol. 1, no. 2, pp. 130–133, 2012.

5. K. A. Motghare, A. P. Rathod, K. L. Wasewar, and N. K. Labhsetwar, “Comparative study of different waste biomass for energy application,” Waste Manag., vol. 47, pp. 40–45, 2016.

6. V. I. Kuprianov, R. Kaewklum, K. Sirisomboon, P. Arromdee, and S. Chakritthakul, “Combustion and emission characteristics of a swirling fluidized-bed combustor burning moisturized rice husk,” Appl. Energy, vol. 87, no. 9, pp. 2899–2906, 2010.

7. M. Fang, L. Yang, G. Chen, Z. Shi, Z. Luo, and K. Cen, “Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed,” Fuel Process. Technol., vol. 85, no. 11, pp. 1273–1282, 2004.

8. P. T. M. Thao, K. H. Kurisu, and K. Hanaki, “Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam,” Biomass and Bioenergy, vol. 35, no. 8, pp. 3656–3666, 2011.

9. P. Kumar, D. M. Barrett, M. J. Delwiche, an d P. Stroeve, “Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production,” Ind. Eng. Chem. Res., vol. 48, no. 8, pp. 3713–3729, 2009.

10.T. Abitbol et al., “Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications,” Curr. Opin. Biotechnol., vol. 39, no. I, pp. 76–88, 2016.

11. Prosvirnikov D. B., Timerbaev N. F., Safin R. G. Microcrystalline Cellulose from Lignocellulosic Material Activated by Steam Explosion Treatment and Mathematical Modeling of the Processes Accompany ing its Preparation //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications, 2019. – T. 945. – C. 911-918.

12. Prosvirnikov D. B., Safin R. G., Zakirov S. R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment //Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications, 2018. – T. 284. – C. 773-778.

© **Ngia N.Kh.** - Postgraduate Student, Department of Technology of Synthetic Rubber, Kazan National Research Technological University, e-mail: ngohongnghia@gmail.com; **Zenitova L.A.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technology of Synthetic Rubber, Kazan National Research Technological University, e-mail: ngohongnghia@gmail.com; **Prosvirnikov D. B.** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Processing of wood materials», Kazan National Research Technological University, e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; **Safin R.G.** - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Processing of wood materials", Kazan National Research Technological University, e-mail: safin@kstu.ru.

Авторы, направляющие статьи в журнал «Деревообрабатывающая промышленность», должны соблюдать следующие требования

УДК 721.05 (Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю)

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (НАЗВАНИЕ СТАТЬИ ПРОПИСНЫМИ БУКВАМИ, ШРИФТ TIMESNEWROMAN, КЕГЛЬ – 16, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЛЕВОМУ КРАЮПОЛУЖИРНЫМ 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 – 1см)*

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 – одноколоночный, 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 .

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). Подрисуночная надпись выравнивается по ширине текста (шрифт названия таблиц – Arial, кегль -8). Точка в конце подрисуночной 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».

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)