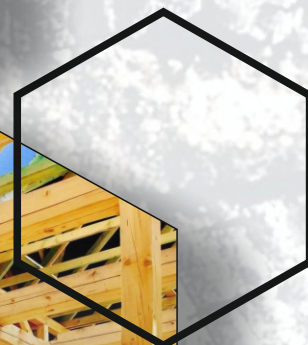


Дерево

ISSN 0011-9008

1/2022

обрабатывающая промышленность



ДЕРЕВО —

1/2022 обрабатывающая промышленность

ISSN 0011-9008

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

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

Редакционная коллегия:



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

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»



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

Czech University of Life Sciences Prague,
Faculty of Forestry and Wood Sciences,
Czech Republic

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 Barčík, Prof. ing., Ph.D.

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

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

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

Хасанишин Руслан Ромелевич, д.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «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 «Арктический государственный
агротехнологический университет»

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»

Рыкутин 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»

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

Dr. PhD Monica Sarvasova Kvietkova
Czech University of Life Sciences Prague,
Czech Republic

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

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2022

journal_woodworking@mail.ru
www.dop1952.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Лесоинженерное дело

Ахтямов Э.Р., Кручинин И.Н., Побединский В.В., Кручинина Е.И., Чижов А.А.

Разработка требований к применению добавок из вспученного вермикулита для строительства лесовозных дорог на территориях северного, приполярного и полярного урала 3

Жалко М.Е., Бургонутдинов А.М., Бурмистрова Д.Д., Ченушкина С.В., Данилов В.В.

Разработка методов повышения транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных автомобильных дорог, работающих в сложных природно-климатических условиях 10

Жалко М.Е.

Повышение морозоустойчивости дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог 18

Физико-механические процессы в деревообработке

Лукаш А.А., Глотова Т.И., Малышева Н.П., Пустрова Н.П., Чернышев О.Н.

Экспресс-метод определения себестоимости продукции при расчете технико-экономических показателей деревообрабатывающих цехов 24

Разумов Е.Ю., Байгильдеева Е.И., Сафина А.В., Сафин Р.Г.

Получение бетулина высокой степени очистки 33

Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Хабибуллина А.Р., Байгильдеева Е.И.

Физико-механические характеристики композиционных материалов из древесины березы, гидролизованной в присутствии перекиси водорода 41

Лукаш А.А., Глотова Т.И., Романов В.А., Феллух А., Чернышев О.Н.

Определение прочности склеивания при нормальном отрыве для разработки новых клеевых составов 55

Сафин Р.Г., Просвириков Д.Б., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Зиятдинова Д.Ф., Гурьянов Д.А.

Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений 62

Артёмов А.В., Ершова А.С., Бурындин В.Г., Савиновских А.В.

Изучение изменений прочностных показателей пластиков без связующего по потере массы при биоразложении 71

Сафина А.В., Абдуллина Д.Р., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Валеев К.В.

Моделирование процесса извлечения бетулина из бересты березы 80

Химическая технология древесины

Строганова М.С., Жильникова Н.А.

Методика оценки самоочищающей способности водоема при влиянии стоков сульфат-целлюлозного производства 90

Чирков Д.Д., Захаров П.С., Шкуро А.Е., Ершова А.С.

Термомеханическая активация наполнителей для древесно-минеральных полимерных композиционных материалов 103

Лесоинженерное дело

УДК 625.852

РАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПРИМЕНЕНИЮ ДОБАВОК ИЗ ВСПУЧЕННОГО ВЕРМИКУЛИТА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ НА ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРНОГО, ПРИПОЛЯРНОГО И ПОЛЯРНОГО УРАЛА

Э.Р. Ахтямов, И. Н. Кручинин, В.В. Побединский, Е.И. Кручинина, А.А. Чижов

Рассмотрены основные проблемы по совершенствованию дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог путем использования природных дорожно-строительных материалов. Для этих дорог, характерно использование материалов, способных обеспечивать нормативные значения транспортно-эксплуатационного состояния в сложных природно-климатических условиях. Традиционные дорожные материалы отличаются нестабильностью своих физико-механических характеристик. Это вызывает значительные осложнения при проектировании и при эксплуатации лесных дорог из подобных материалов. Несмотря на ряд проведенных экспериментальных исследований, задача создания дорожных покрытий для условий Северного и Приполярного Урала, с приемлемыми эксплуатационными свойствами остается нерешенной. Таким образом, решить проблему позволит соответствующая методика проектирования составов щебеночно-мастичных асфальтобетонных покрытий, с новыми транспортно-эксплуатационными характеристиками, с учетом природно-климатических условий эксплуатации, а также создание морозозащитных слоев, что и определило цель настоящей работы. Целью исследований разработка требований к морозоустойчивым конструктивным слоям дорожных одежд из вспученного вермикулита лесовозных автомобильных дорог. В работе были решены следующие задачи: 1) разработка требований к морозозащитным слоям дорожных одежд с добавкой из вспученного вермикулита; 2) обоснование технологий строительства лесовозных дорог с добавкой из вспученного вермикулита. Результатами работы было создание рецептуры щебеночно-мастичного асфальтобетона с теплоизолирующей добавкой из вспученного вермикулита фракции 0,5 - 1,0 мм и грунтвермикулитового материала при добавке вспученного вермикулита в объеме до 15 %. Учитывая достаточную адекватность опытно-экспериментальных исследований, результаты подборов смесей могут быть рекомендованы для использования в практике строительства лесовозных дорог для северных территориях Свердловской области и прилегающих к ним лесов Северного, Приполярного и Полярного Урала.

Ключевые слова: лесовозные дороги, морозозащитный конструктивный слой, теплоизолирующей добавка, вспученный вермикулит.

Введение

Развитие лесопромышленного комплекса Российской Федерации предусматривает реализацию стратегии по устойчивому развитию лесопромышленного комплекса, в различных регионах РФ. При этом основная роль отводится системе устойчивого развития транспортной инфраструктуры лесов. Пример освоения инвестиционных проектов на северных территориях Свердловской области и прилегающих к ним лесов Северного и Приполярного Урала показал существенную зависимость их развития от лесотранспортных сетей. Известно, что транспортная доступность лесов напрямую зависит от природно-климатических условий. Чаще всего территории Северного и Приполярного Урала располагаются во II и даже в I дорожно-климатических зонах [8]. Именно эти сложные природно-климатические условия накладывают существенные ограничения на конструкции и технологии строительства дорожных одежд лесовозных дорог.

Мировой опыт развития Северных территорий со сложными природно-климатическими условиями показал, что основными критериями развития их транспортной доступности стали дорожные конструкции из стабилизированных или укрепленных грунтов, асфальтобетонов или цементобетонов с повышенными теплоизолирующими свойствами. Анализ применения дорожно-строительных материалов, с улучшенными теплофизическими свойствами для строительства покрытий лесовозных дорог рассмотрены в работах [4, 8]. Территории Приполярных областей крайне зависимы от внешних

воздействий, поэтому лесовозные дороги должны не только обеспечивать их транспортную доступность, но и оказывать минимальное отрицательное воздействие на экологическую функцию лесов. Это существенно ограничивает выбор используемых дорожно-строительных материалов и технологий по их применению при строительстве лесовозных дорог [11].

Практически все исследователи в области строительства и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог пришли к выводу, что обеспечить требуемые характеристики дорожных конструкций возможно только с использованием дорожных одежд с морозозащитными слоями и с покрытиями из щебеночно-мастичных асфальтобетонов [2, 5, 9].

Для морозозащитных слоев и щебеночно-мастичных асфальтобетонных покрытий наиболее важным свойством следует считать возможность сопротивляться деформациям и разрушениям в сложных природно-климатических условиях. Это свойство дорожных одежд зависит от структурной прочности минеральной части, от реологических характеристик вяжущих, их вязкости, упругости, пластичности, а также общего термического сопротивления дорожной одежды [15].

Анализ литературных источников показал, что использование покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонов, по сравнению с асфальтобетонами по ГОСТ Р 58406.2 характеризуется наибольшей величиной внутреннего трения, исключением природных песков и наличием значительного содержания битума в своем составе [3, 6, 7, 10]. Причем, для повышения их теплотехнических свойств, некоторые исследователи предлагают использовать более совершенные типы вяжущих, обладающих улучшенными свойствами, а также использовать добавки, изменяющих физико-механические свойства асфальтобетонов [3, 13].

Для лесовозных дорог, одним из решений по повышению теплостабилизирующих свойств дорожных одежд, в пределах действующих нормативно-технических требований, является применение специальных добавок. Речь идет об использовании природных компонентов, которые, с целью уменьшения стоимости их применения, позволяют существенно изменить теплотехнические свойства дорожных покрытий, например, вспученный вермикулит [1].

В наших исследованиях показано, что вспученный вермикулит оказывает не только положительное влияние на улучшение физико-механических свойств битумов, но и существенно увеличивает значения сцепления к поверхности минеральных материалов, пенетрацию, растяжимость, и даже способствует понижению температуры хрупкости вяжущих [1].

В этой связи, создание новых морозоустойчивых дорожных конструкций для лесовозных дорог с использованием природных компонентов является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований была разработка требований к морозоустойчивым конструктивным слоям дорожных одежд из вспученного вермикулита лесовозных автомобильных дорог.

В работе рассматривались следующие задачи: 1) разработка требований к морозозащитным слоям дорожных одежд с добавкой из вспученного вермикулита; 2) обоснование технологий строительства лесовозных дорог с добавкой из вспученного вермикулита.

Методы и материалы

Представленная работа была выполнена в рамках НИР ФГБОУ ВО УГЛТУ: FUEG -2021-0011 (Арктика. Развитие арктических и северных территорий) Освоение шадящего, эффективного использования лесных земель Северного, Приполярного и Полярного Урала в условиях глобального потепления за счет рационального формирования зимних транспортных путей и элементов снежной поверхности.

Как добавка, вспученный вермикулит представляет собой структурированный слоистый материал с закрытой пористостью. Большинство исследований вспученного вермикулита показали, что его частицы состоят из тончайших пластин, разделенных многочисленными воздушными прослойками. Добавку получают в результате термического нагрева материала до 1000 °С. Полученный вспученный вермикулит обладает теплопроводностью не более 0,06 Вт/м·°С, химической инертностью. Его плотность находится в диапазоне от 80 до 200 кг/м³. Он обладает низкой гигроскопичностью, адсорбционной способностью, биологической стойкостью, экологической безвредностью для окружающей среды.

В основе использования добавок из вспученного вермикулита для лесовозных дорог служит предположение, что полученный композитный материал будет существенно улучшать свои

теплотехнические и структурно-механические свойства за счет более низкой теплопроводности и создания структурных связей с дискретными частицами и битумными вяжущими.

В наших исследованиях применялся грунтовермикулитовый материал с добавкой из вермикулита от 5 до 20 % по массе. Приготовление композитного грунтовермикулитового материала осуществлялось методом смешения местного грунта с некондиционными вермикулитными материалами.

Были подготовлены три участка. Участок № 1 – грунтовермикулитовый слой с добавкой отходов 8 %. Участок №2 – грунтовермикулитовый слой с добавкой отходов 15 %. Участок № 3 – грунтощебеночный слой из местных материалов.

Для щебеночно-мастичного покрытия приготовление материала осуществлялось путем введения вспученного вермикулита в битумный материал, нагретый до 80 °С. Основные физико-механические характеристики оценивались по температуре размягчения битумновермикулитовой дисперсии. Дополнительно исследовались их растяжимость и пенетрация. Оценка трещиностойкости полученных асфальтобетонов проводилась по степени деструкции битумного материала [7,12,14].

Исходными материалами для морозозащитного слоя дорожной одежды служили: грунт пучинистый, суглинок тяжелый пылеватый твердый с щебнем; естественная влажность – 22,2 % по массе; влажность на границе текучести – 38,74 % по массе; влажность по границе раскатывания – 25,65 % по массе; число пластичности – 13,09; оптимальная влажность – 24,4 % по массе; максимальная плотность – 2,01 г/см³; максимальная плотность сухого грунта – 1,62 г/см³; содержание пылевидных и глинистых частиц – 30,2 % по массе; содержание песчаных частиц (2 – 0,5мм) – 10,68 % по массе; содержание частиц крупнее 2мм – 16,15% по массе; органическое вещество – 2,84 %, температура грунта +3°С.

Для теплоизолирующего слоя дорожной одежды были использованы следующие материалы: фракционированный щебень (фр. 8-16 мм) из гранодиоритов Новосмолинского месторождения; песок дробленый из интрузивных пород (фр. 0-4 мм); минеральный порошок МП-2, битум БНД 70/100, а также ПАВ – адгезионная присадка к битуму «Амдор-10». В качестве тепло стабилизирующей добавки к щебеночно-мастичной смеси служил вспученный вермикулит фракции 0,5-1,0 мм, добавляемый в количестве от 0,5 до 0,75 % масс. от минеральной части асфальтобетонной смеси.

В таблице 1 приведены зерновые составы щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси для использования с добавками вермикулита [1, 18].

Таблица 1 – Зерновые составы щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси для использования с добавками вермикулита

Наименование каменного материала	Содержание в а/б смеси, %	Зерновой состав, мм									
		31,5	22,4	16	11,2	8,0	5,6	4,0	2,0	0,125	0,063
Щебень фр. св.11,2 до 16 мм	28	28	28	28	4,3	0,1	0,1	0	0	0	0
Щебень фр. св.8 до 11,2 мм	20	20	20	20	18,7	1,6	0,1	0,04	0	0	0
Щебень фр. от 4 до 8 мм	10	10	10	10	10	9,7	2,8	0,04	0	0	0
Песок из отсеков дробления	42	42	42	42	42	42	42	93,4	29,5	7,2	3,8

Результаты

В исследованиях автора [4] было обосновано, что основные транспортно-эксплуатационные параметры покрытий лесовозных дорог зависят от технологии их строительства, вида используемого дорожно-строительного материала и конструктивных особенностей слоев дорожных одежд. Эти исследования позволили сделать вывод, что при проектировании конструкций дорожных одежд особое внимание следует обратить на их работоспособность и строительство при отрицательных температурах [8, 16].

На рисунке 1 представлена конструкция морозозащитной дорожной одежды лесовозной дороги для условий Северного, Приполярного и Полярного Урала.



Рис. 1. Конструкция морозозащитной дорожной одежды лесовозной дороги для условий Северного, Приполярного и Полярного Урала: 1-щебеночно-мастичный асфальтобетон с теплостабилизирующей добавкой из вспученного вермикулита; 2-морозозащитный слой из местного грунта с теплоизолирующей добавкой из вспученного вермикулита

Результатом экспериментальных исследований стала разработка технологий по строительству морозозащитных дорожных одежд с добавками из вермикулита.

Грунтовермикулитовые материалы, доставленные на объект строительства, рекомендуется разгружать по оси дороги в валик, который в последующем разравнивают на всю ширину слоя автогрейдерами или бульдозерами.

При распределении материалов следует учитывать запас на усадку при уплотнении: для некондиционных грунтовермикулитовых смесей фракций 0-70 мм марки по прочности 400 и более от 30 до 50%; для вспученного вермикулита от 35 до 60%.

Наименьшая толщина распределяемого слоя должна в 1,5 раза превышать размер наиболее крупных частиц и быть не менее 15 см.

Максимальная толщина слоя не должна превышать уплотняющей способности катков.

Продолжительность технологического разрыва во времени между вывозкой материала на дорогу ее распределением и уплотнением не регламентируется.

Перемешивание и планировку материала следует производить с помощью автогрейдера непосредственного после распределения материала, а затем немедленно следует приступать к уплотнению.

Уплотнение необходимо производить виброкатками массой не более 9 т, ориентировочно за 6-10 проходов катка по одному следу. Количество проходов уточняют по результатам пробного уплотнения при начале производства работ. Согласно СП 78.133330. 2012 уплотнение надлежит начинать от краев к середине с перекрытием следа предыдущего прохода катка не менее чем на 0,15 м. В случае необходимости в процессе уплотнения автогрейдером исправляют профиль уплотняемого слоя до требуемых параметров.

В процессе уплотнения необходимо соблюдать следующие правила:

1. Уплотнение следует производить в строгом соответствии с рекомендациями.
2. Каток должен двигаться параллельно оси дороги со скоростью 2...3 км/ч, в статическом режиме.
3. На покрытиях с продольным уклоном более 30 % уплотнение следует производить снизу вверх.
4. При первых проходах катков во избежание волн ведущие вальцы должны быть впереди.
5. Во время уплотнения катки должны быть в непрерывном и равномерном движении.
6. Запрещается останавливать катки или резко менять направление движения на неуплотненном слое.

7. Для исключения образования волны каждый последующий след катка должен быть смещен в направлении уплотнения относительно предыдущего на величину, примерно равную диаметру вальца.

Грунтовермикулитовый слой фракции 0-70 мм следует уплотнять за несколько этапов:

Первый этап уплотнения.

Производится прикатка или предварительное уплотнение. Происходит обжимка материала и выравнивание поверхности слоя виброкатком. Вибромодуль не включается. Основная задача на этом этапе состоит в некотором начальном подравнивании еще рыхлого после укладки и планировки слоя материала и предварительном его обжатии. При этом первые два прохода по одному следу без вибрации, затем два прохода по следу с минимальной вибрацией на рабочей скорости не более 2,5 км/час.

Технология устройства щебеночно-мастичного асфальтобетонного слоя традиционная и должна соответствовать основным положениям СП 78.133330. 2012.

В таблице 2 представлены основные физико-механических показатели для конструктивных слоев с теплоизолирующей добавкой на основе вспученного вермикулита.

Анализ показал, что запроектированная щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь полностью удовлетворяет требованиям для условий II дорожно-климатической зоны и соответствуют общим требованиям ГОСТ 58406.1. Проектный расход вяжущего для битума БНД 70/100 составил: 5,4% мас. [1].

В результате подбора состава грунтовермикулитового слоя фракции 0-70 мм с добавкой вермикулита, было выявлено, что для гарантированного обеспечения коэффициента теплопроводности [17], следует использовать вспученный вермикулит в объеме от 10 до 15 %.

Таблица 2 – Физико-механические свойства дорожной одежды с теплоизолирующей добавкой на основе вспученного вермикулита

<i>Наименование показателей</i>	<i>Фактические показатели</i>		
	<i>ЩМА-16 на БНД 70/100</i>	<i>Грунтовермикулитовый слой фракции 0-70 мм</i>	<i>Грунт местный, суглинок</i>
1. Объемная плотность, г/см ³	2,441	1,68	2,01
2. Содержание воздушных пустот, %	2,5	не регламентируется	не регламентируется
3. Пустоты в минеральном заполнителе, %	16,5	не регламентируется	не регламентируется
4. Коэффициент водостойкости, ед	0,89	не регламентируется	не регламентируется
5. Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	1,01	0,59	1,62
6. Влажность, %	не регламентируется	16,2	22,2
7. Термическое сопротивление конструктивного слоя дорожной одежды, м ² ·К/Вт	0,05	0,76	0,89
8. Толщина конструктивного слоя при условии обеспечения $R_{од(тр)} = 1,92 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, м	0,03	0,35	1,62

Заключение

Изучены закономерности влияния вспученного вермикулита на физико-механические свойства морозозащитных конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных дорог.

Применение вермикулита в качестве добавки к грунтовому местному материалу позволил резко повысить теплостабилизирующие свойства конструктивного слоя. Так коэффициент теплопроводности удалось снизить с 1,62 до 0,59, Вт/м·К, при добавке вспученного вермикулита в объеме до 15 %.

Помимо этого, вспученный вермикулит, при добавке его в щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-16 проявил себя как стабилизатор вяжущего. Изменились теплопроводные свойства, улучшились низкотемпературные упруго-прочностные характеристики асфальтобетонного покрытия. Уменьшилась температура укладки. Рекомендуемый расход вермикулита составляет от 0,3 до 0,8 % масс. от минеральной части смеси.

Как видно из результатов испытаний (см. табл. 2), щебеночно-мастичный асфальтобетон с теплостабилизирующей добавкой на основе вспученного вермикулита соответствует требованиям к ЩМА 16 по ГОСТ 58406.1 и может применяться в верхнем слое асфальтобетонных покрытий лесовозных автомобильных дорог.

Разработанная технология строительства и конструкция морозозащитной дорожной одежды (см. рис.1) рекомендуется к применению на лесовозных автомобильных дорогах, расположенных на северных территориях Свердловской области и прилегающих к ним лесов Северного и Приполярного Урала.

Литература

1. Ахтямов Э.Р. Повышение эксплуатационных характеристик покрытий лесных лесовозных дорог за счет добавки из вспученного вермикулита [Текст] / Ахтямов Э.Р., Кручинин И. Н., Побединский В. В., Кручинина Е.И. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. - №2. – С. 3-10.
2. Кандауров, И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И. И. Кандауров. - Л.: СИ, 1988. - 281 с.
3. Кирюхин, Г.Н. Покрытия из щебеночно -мастичного асфальтобетона/ Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов // М.: ООО Издательство «Элит».-2009. 176 с.
4. Кручинин, И.Н. Повышения технологической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из низкопрочных каменных материалов [Текст] / И.Н. Кручинин, В.А. Ращектаев // Лесотехнический журнал. - 2018- № 2 (30). - С. 168-176.
5. Малянова Л.И., Салихов М.Г. Изучение влияния модифицированной добавки на некоторые свойства асфальтобетона с отсевами дробления известняков для покрытий лесовозных дорог «Вестник МарГТУ». Серия «Лес. Экология. Природопользование».- Йошкар-Ола: МарГТУ, 2013. - №1.- С.64-70.
6. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А.В. Руденский. – М.: Транспорт, 1992. – 213 с.
7. Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны. – М.: Высшая школа, 1969. – 396 с.
8. Савельев, В.В. Обоснование типа и конструкций одежд лесовозных автомобильных дорог: Дис... докт. техн. наук. / МарГТУ, науч. консультант Ю.А. Ширнин. – Йошкар-Ола, 2006.- 516 с.: ил. – библиограф С.296 -319.
9. Bindu C. S. et. al. Waste plastic as a stabilizing additive in Asphalt Stone Mastic/ International Journal of Engineering and Technology Vol.2 (6), 2010, 379-387.
10. Brown, E.R., Haddock, John E., Mallick, Rajib B. and Lynn, T.A.(1997a), Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA), Asphalt Paving Technology 1997 - Journal of the Asphalt Paving Technologists, Volume 66, pp 1 - 25.
11. Joao, S. et al. 2015 A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework By / S. Joao, F. Adelino, F. Gerardo // International Journal of Pavement Engineering, March. –2015. – Vol. 16. Issue 3. –P.268–286.
12. NAPA (1998), Designing and Constructing SMA Mixtures – State-of-the- Practice, National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series 122, USA.
13. Nunn, M.E. (1994), Evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA): A High Stability Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.
14. Paje, S.E.; Vázquez, V.F.; Terán, F.; Viñuela, U. ; Hidalgo, M.E.; Costa, A.; Loma, J.; Cervantes, R.; Lanchas, S.; Hergueta, J.A.; et al. Field performance evaluation of stone mastic asphalt with crumb rubber. In Proceedings of the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013, INTER-NOISE 2013: Noise Control for Quality of Life, Innsbruck, Austria, 15–18 September 2013; Austrian Noise Abatement Association: Innsbruck, 2013; p. 536.
15. Redelius, P. G. (2006). The structure of asphaltenes in bitumen. Road Materials and Pavement Design, 7 (sup1), 143-162.
16. Siripun, K. et.al. 2011 Mechanical Behavior of Unbound Granular Road Base Materials under Repeated Cyclic Loads / K. Siripun, H. Nikraz, P. Jitsangiam //International Journal of Pavement Research and Technology, Jan. –2011. – Vol.4. – No.1. – P. 56–66.
17. Splittmastixasphalt / Dr. Ing. K.H. Kolb, die Herren H. Erhard, F. Hoggenmuller, O. Kast und andere; LEITFADEN. DeutscherAsphaltverband (DAV). – 27 p.
18. Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.

©Ахтямов Э.Р. – главный технолог ООО «Дорожно-строительная компания «УРАЛ»», г. Челябинск, e-mail: ra@7359808.ru; Кручинин И.Н. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры транспорта и дорожного строительства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: kinaa.k@yandex.ru; Побединский В.В. – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: pobed@el.ru; Кручинина Е.И. – магистрант кафедры транспорта и дорожного строительства, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: braginskayarita@gmail.com; Чижов А.А. – канд. техн. наук., доцент кафедры транспорта и дорожного строительства, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: chizhovaa@m.usfeu.ru.

UDC 625.852

IMPROVING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF FOREST ROAD COVERINGS DUE TO ADDITION FROM SUPPLIED VERMICULITE

E.R. Akhtyamov, I.N. Kruchinin, V.V. Pobedinsky, E.I. Kruchinina, A.A. Chizhov

The main problems of improving road pavements of logging highways by using natural road-building materials are considered. These roads are characterized by the use of materials capable of ensuring the normative values of the transport and operational state in difficult natural and climatic conditions. Traditional road materials are characterized by the instability of their physical and mechanical characteristics. This causes significant complications in the design and operation of forest roads made of similar materials. Despite a number of experimental studies, the task of creating road surfaces for the conditions of the Northern and Subpolar Urals, with acceptable operational properties, remains unresolved. Thus, the problem will be solved by the appropriate design methodology for compositions of crushed stone-mastic asphalt-concrete pavements, with new transport and operational characteristics, taking into account the natural and climatic conditions of operation, as well as the creation of frost-protective layers, which determined the purpose of this work. The purpose of the research is the development of requirements for frost-resistant structural layers of pavements made of expanded vermiculite of logging automobile roads. The following tasks were solved in the work: 1) development of requirements for frost-protective layers of road pavements with the addition of expanded vermiculite; 2) substantiation of technologies for the construction of timber roads with the addition of expanded vermiculite. The results of the work were the creation of a formulation of crushed stone-mastic asphalt concrete with a heat stabilizing additive from expanded vermiculite of fraction 0.5 - 1.0 mm and soil-vermiculite material with the addition of expanded vermiculite in a volume of up to 15%. Taking into account the sufficient adequacy of experimental research, the results of the selection of mixtures can be recommended for use in the practice of building timber roads for the northern territories of the Sverdlovsk region and the adjacent forests of the Northern, Subpolar and Polar Urals.

Key words: timber roads, frost-protective structural layer, heat-stabilizing additive, expanded vermiculite.

References

1. Akhtyamov E.R. [Improving the operational characteristics of coatings of forest timber roads due to the addition of expanded vermiculite] / Akhtyamov E.R., Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Kruchinina E.I. // «Derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost» [Woodworking industry]. - 2021. - No. 2. - P. 3-10. (InRuss.)
2. Kandaurov I.I. [Mechanics of granular media and its application in construction] // I.I. Kandaurov. - L. : SI, 1988. - 281 p. (InRuss.)
3. Kiryukhin, G.N. [Crushed-stone-mastic asphalt concrete coatings]. - M.: LLC Publishing House "Elite". [M.: LLC Publishing House "Elite"]. - 2009. 176 p. (InRuss.)
4. Kruchinin, I.N. [Increasing the technological efficiency of the construction of timber-carrying automobile roads from low-strength stone materials] // I.N. Kruchinin, V.A. Ruschektaev // «Lesotekhnicheskii zhurnal» [Forestry journal]. - 2018- No. 2 (30). - P. 168-176. (InRuss.)
5. Malyanova L.I. [Investigation of the effect of the modified additive on some properties of asphalt concrete with limestone crushing screenings for covering timber roads] / Malyanova L.I., Salikhov M.G. // «Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye: Vestnik MarGTU. - Yoshkar-Ola». Series "Forest. Ecology. Nature management". - Yoshkar-Ola: MarSTU, 2013. - No. 1. - P.64-70.
6. Rudensky A.V. [Asphalt concrete pavement] -M.: Transport [M.: Transport] 1992. - 213 p. (InRuss.)
7. Rybiev I.A. [Asphalt concrete]. - M.: Vysshaya shkola [M.: Higher school], 1969. - 396 p. (InRuss.)
8. Saveliev V.V. [Substantiation of the type and designs of clothing for timber-carrying highways]: Dis... dokt. tekhn. nauk. [Dis ... doc. tech. sciences]. / MarSTU, scientific. consultant Yu.A. Shirnin. - Yoshkar-Ola, 2006. - 516 p. : ill. - bibliographer P.296 -319. (InRuss.)
9. Bindu C. S. et. al. Waste plastic as a stabilizing additive in Asphalt Stone Mastic/ International Journal of Engineering and Technology Vol.2 (6), 2010, 379-387.
10. Brown, E.R., Haddock, John E., Mallick, Rajib B. and Lynn, T.A.(1997a), Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA), Asphalt Paving Technology 1997 - Journal of the Asphalt Paving Technologists, Volume 66, pp 1 - 25.

11. Joao, S. et al. 2015 A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework By / S. Joao, F. Adelino, F. Gerardo // International Journal of Pavement Engineering, March. –2015. – Vol. 16. Issue 3. –P.268–286.
12. NAPA (1998), Designing and Constructing SMA Mixtures – State-of-the- Practice, National Asphalt Pavement Association, Quality Improvement Series 122, USA.
13. Nunn, M.E. (1994), Evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA): A High Stability Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.
14. Paje, S.E.; Vázquez, V.F.; Terán, F.; Viñuela, U.; Hidalgo, M.E.; Costa, A.; Loma, J.; Cervantes, R.; Lanchas, S.; Hergueta, J.A.; et al. Field performance evaluation of stone mastic asphalt with crumb rubber. In Proceedings of the 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013, INTER-NOISE 2013: Noise Control for Quality of Life, Innsbruck, Austria, 15–18 September 2013; Austrian Noise Abatement Association: Innsbruck, 2013; p. 536.
15. Redelius, P. G. (2006). The structure of asphaltenes in bitumen. Road Materials and Pavement Design, 7 (sup1), 143-162.
16. Siripun, K. et.al. 2011 Mechanical Behavior of Unbound Granular Road Base Materials under Repeated Cyclic Loads / K. Siripun, H. Nikraz, P. Jitsangiam //International Journal of Pavement Research and Technology, Jan. –2011. – Vol.4. – No.1. – P. 56–66.
17. Splittmastixasphalt / Dr. Ing. K.H. Kolb, die Herren H. Erhard, F. Hoggenmuller, O. Kast und andere; LEITFADEN. DeutscherAsphaltverband (DAV). – 27 p.
18. Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.

Akhtyamov E.R. – Chief Technologist of LLC «Road Construction Company URAL», e-mail: ra@7359808.ru; **Kruchinin I.N.** – Grand PhD in Engineering, Professor of the Department of Transport and Road Construction, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: kinaa.k@yandex.ru; **Pobedinsky V. V.** – Grand PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Intelligent Systems, USFEU, e-mail: pobed@e1.ru; **Kruchinina E.I.** –Master of the Department of Transport and Road Construction, USFEU, e-mail: braginskayarita@gmail.com; **Chizhov A.A.** – PhD in Engineering, Professor of the Department of Transport and Road Construction, USFEU, e-mail: chizhovaa@m.usfeu.ru.

УДК 625.852

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО - ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ, РАБОТАЮЩИХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

М.Е. Жалко, А.М. Бургонутдинов, О.Н. Бурмистрова, С.В. Ченушкина, В.В. Данилов

Рассмотрены основные проблемы при проектировании водопропускных слоев дорожных одежд лесовозных дорог путем использования современных дренажных конструкций. Лесовозные дороги, расположенные на переувлажненных и временно подтапливаемых лесных территориях подвержены значительному снижению транспортно-эксплуатационных показателей. Обычные конструкции дорожных одежд в этих условиях не всегда способны обеспечить требуемые физико-механические характеристики подстилающих слоев. Это вызывает значительные осложнения при строительстве и эксплуатации лесовозных дорог. Несмотря на ряд проведенных исследований, задача проектирования дорожных одежд, с приемлемыми эксплуатационными свойствами остается нерешенной. Таким образом, решить проблему позволит соответствующая методика подбора дренажных конструкций, с улучшенными транспортно-эксплуатационными характеристиками, с учетом природно-климатических условий эксплуатации, что и определило цель настоящей работы. Целью исследований была разработка требований к конструктивным показателям дорожных одежд лесовозных дорог с использованием дренажных конструкций. В работе были решены следующие задачи: разработка требований к дренажным конструкциям дорожных одежд лесовозных дорог; обоснование расположения дренажных конструкций в теле дорожной одежды лесовозных дорог. Результатами работы стало создание конструкции дренажных устройств без снижения прочностных характеристик дорожных одежд. Выбран вариант расположения дренажных

отверстий в трубчатых дренах, которые располагаются только в верхней части конструкции. Обоснованы размеры дреназирующих отверстий и шаг их расположения. Дополнительно были улучшены морозозащитные свойства дорожных одежд. Возросло термическое сопротивление дорожной одежды до $0,45 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Учитывая достаточную адекватность исследований, результаты расчетов и расположения дреназирующих конструкций могут быть рекомендованы для использования в практике строительства лесовозных дорог, расположенных в сложных природно-климатических условиях.

Ключевые слова: лесовозные дороги, дреназирующие конструкции, дорожные одежды.

Введение

При реализации стратегии по устойчивому развитию лесопромышленного комплекса, в различных регионах РФ, основным элементом оценки качества функционирования транспортной инфраструктуры служат автомобильные лесовозные дороги. Основные исследования в этой области сосредоточены либо на повышение технологической эффективности строительства лесных дорог, либо на разработке новых методов проектирования [2, 5, 9]. Особое внимание уделяется процессам обеспечения работоспособности дорожных одежд лесовозных дорог, работающих в сложных природно-климатических условиях, особенно на временно или постоянно переувлажнённых лесных землях. Именно от их конструктивных особенностей зависят основные транспортно-эксплуатационные показатели дорог [7]. Большинство исследователей в области эксплуатации лесовозных дорог пришли к выводу, что для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей необходимо использовать либо дренажные системы, либо модифицированные системы водоотведения [3, 4, 6].

При анализе условий работоспособности дреназирующих слоев необходимо учитывать, как физико-механические показатели, влияющие на прочность дорожной одежды, так и способность дреназирующих слоев обеспечить требуемый водно-тепловой режим земляных сооружений автомобильных дорог. Хочется подчеркнуть, что затраты на сооружение дренажных конструкций лесовозных дорог достаточно высокие, постоянно увеличиваются и оказывают существенное влияние на лесовосстановительные функции леса [8, 13]. С целью уменьшения затрат на строительство и эксплуатацию лесовозных дорог были разработаны схемы дренажных сооружений, в которых, взамен традиционных дреназирующих слоев были использованы иные компоненты. Речь идет об устройстве плоскостного дренажного слоя, с улучшенными физико-механическими показателями [12].

В наших исследованиях было показано, что основным назначением разработанных дренажных систем, это наибольшее отведение воды грунтового основания дорожной одежды по всей глубине промерзания, без снижения прочностных характеристик [7]. Ряд исследователей предполагали, что в качестве основных материалов для устройства дренажных систем возможно использование гравия, песков, шлаков и других материалов с необходимыми коэффициентами фильтрации [5, 10, 12]. Однако, учитывая, что лесовозные дороги не только обеспечивают функционирование лесотранспортной системы, но и влияют на средообразующую функцию леса, необходимо рассмотреть возможность проведения мероприятий по регулированию не только водоотведения от дорожных конструкций, но и устойчивого управления лесами. Эти мероприятия накладывают существенные ограничения на выбор конструктивных схем дорожных одежд лесовозных дорог [5, 9]. Возникла ситуация, когда проблемы лесопользования напрямую столкнулись с необходимостью рассматривать степень влияния лесотранспортных сетей на средообразующую функцию леса.

Таким образом, создание новых технологических решений повышения транспортно-эксплуатационных характеристик лесовозных дорог, с использованием особых конструктивных элементов является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований была разработка требований к конструктивным показателям дорожных одежд лесовозных дорог с использованием дреназирующих конструкций.

В работе рассматривались следующие задачи: 1) разработка требований к дреназирующим конструкциям дорожных одежд лесовозных дорог; 2) обоснование расположения дреназирующих конструкций в теле дорожной одежды лесовозных дорог.

Методы и материалы

Как было показано в работах [1, 3, 4, 10, 12] вопросы устройства дренажных систем и водоотведения на лесовозных автомобильных дорогах освещены достаточно полно.

Известно, что основные слои дорожной одежды лесовозных дорог можно подразделить на [5]:

1. Покрытие – верхняя часть дорожной одежды, воспринимающая усилия от колес подвижного лесовозного состава и подвергающаяся непосредственному воздействию атмосферных факторов; покрытие должно обеспечивать необходимые транспортно-эксплуатационные качества проезжей части; в покрытие входят также слой износа и слои с шероховатой поверхностью;

2. Основание – часть дорожной одежды, обеспечивающая совместно с покрытием перераспределение и снижение давления на расположенные ниже дополнительные слои или грунт земляного полотна;

3. Дополнительные слои основания (морозозащитные, теплоизоляционные, дренирующие и др.) – слои между основанием и верхом рабочего слоя земляного полотна, обеспечивающие морозоустойчивость и дренирование дорожной одежды и верхней части земляного полотна.

Дополнительно к этому, для полного водоотвода устраивается плоскостной горизонтальный дренаж, дополняемый прикромочным и поперечным дренажом мелкого заложения.

Универсальным решением для большинства проблемных участков лесовозных дорог является комбинированный плоскостной горизонтальный дренаж.

Ряд учёных предлагают следующий алгоритм разработки мероприятий по проектированию дренажных систем лесовозных дорог [10, 11]:

1. Разделение лесовозных дорог на характерные участки по продольному профилю и природно-климатическим условиям. При этом учитываются как наличие местных материалов для дренажного слоя, так и возможность осуществления мер по ограничению притока воды из лесорастительной зоны.

2. Определение для каждого типа объёма воды, поступающей в основание дорожной одежды за расчетный период года.

3. Расчётное обоснование параметров дренирующих конструктивных слоев лесовозных дорог.

Принято выделять подстилающие, дренирующие и дополнительные слои дорожных одежд. В нашем случае данные функции могут быть совмещены в одном конструктивном слое.

Основным свойством дренирующих слоёв является увеличение не только морозостойкости дорожной одежды, но и показатели прочности. Выбор толщины слоёв производят на основе обеспечения заданной прочности всей конструкции дорожной одежды. При необходимости использования подстилающего слоя, одновременно в качестве дренирующего, его выполняют на всю ширину земляного полотна.

В целях оптимизации геометрических параметров дренажного слоя используется принцип объёмного поглощения, когда вода, попавшая в дренирующий слой должна разместиться в его порах в полном объёме. При этом желательно использовать крупнозернистые материалы, т.к. они имеют наибольший модуль упругости, чем мелкодисперсные, и слой из них может удовлетворять одновременно требованиям теплоизолирующего и подстилающего слоев.

Результаты

Повышение транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных дорог напрямую зависит от типа конструкции дорожной одежды и расположения дренирующих элементов [6]. Учитывая особенности эксплуатации лесовозных дорог особое внимание следует обратить на их возможность работать в условиях значительного переувлажнения [4, 15].

Решить поставленные задачи позволяет установка дренирующих труб. В случае не обеспеченного дренажа, эффективный диаметр дренирующей конструкции может быть выражен следующей зависимостью:

$$D = T \left[\sqrt{\frac{8K_{\phi} h_{\max}}{WT} \left(1 + \frac{h_{\max}}{2T} \right) + B_1^2} - B_1 \right], \quad (1)$$

где $h_{\max}$ – максимальное превышение уровня грунтовых вод над уровнем воды в дренирующей конструкции, м;

K_{ϕ} – коэффициент фильтрации грунта, м/сут;

W – расход воды в грунтовом слое, м³/сут;

B_1 – обобщенный коэффициент фильтрации;

$$B_1 = 2,94 \lg \frac{1}{\sin \frac{\pi r}{T}}, \quad (2)$$

где r – средний радиус элемента дренирующей конструкции, м;

T – превышение уровня грунтовых вод над дренажом, м.

В условиях, при которых расстояние между дренажными трубами по горизонтали определено, можно найти наибольшее значение $h_{\max}$, исходя из того, что расстояние в горизонтальной плоскости будет максимальным.

Предлагается расположение дренажных труб в шахматном порядке, что существенно повысит надежность предлагаемого решения. Расстояние между трубами зависит от типа грунта. Показатели для основных типов грунта приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные зависимости расстояния между дренирующими конструкциями в зависимости от типа грунта

Тип грунта	Расстояние между дренами по горизонтальной оси, м	Расстояние между дренами по вертикальной оси, м
Глинистые грунты	от 5 до 7,5	от 0,4 до 0,5
Супеси и суглинки	от 10,0 до 10,8	от 1,0 до 1,4
Заторфованные грунты	от 10,2 до 10,6	от 1,0 до 1,4
Песчаные грунты	от 20,2 до 20,4	от 1,6 до 1,8

В качестве основного материала предлагается использование труб из поливинилхлорида (ПВХ), как материала, наиболее полно отвечающего требованиям, предъявляемым лесопользователями [2]. Расчетный диаметр труб составил от 70 до 110 мм, что регулируется спецификой подстилающего грунта и степенью его увлажнения. Все дренажные трубы заполняются каменными материалами, например, щебнем с зерновым составом до 70 мм. Следует учитывать, что при заполнении дрен не должны присутствовать элементы глинистых и пылеватых частиц. По показателям морозостойкости все материалы должны соответствовать марке не менее F50 щебня по ГОСТ 8267-93.

Главным отличительным элементом дренирующей конструкции служит организация в верхнем сегменте дренажной трубы перфорации. Диаметр отверстий составляет от 1 до 3 мм, шаг сетки отверстий от 30 до 50 мм. Отверстия предназначены для пропуска воды в тело дренирующей конструкции (см. рисунок 1).

Благодаря тому, что большая часть поверхности дрен отверстий не имеет, не возникает сквозной проход водной среды сквозь тело дрен. Попад внутрь, вода по дренажной трубе отводится в сторону обочин из-под дорожной конструкции.

В качестве наполнителя дренажных труб предлагается использование каменных материалов, соответствующих установленным требованиям. Применение этого решения позволяет обеспечить требуемые параметры как по вертикальным нагрузкам, так и по модулю упругости всей дорожной конструкции. Общая схема конструкции дренажной системы лесовозной дороги в поперечном срезе представлена на рисунке 2. В зависимости от подверженности конкретным лесорастительным условиям фильтрационному подъему воды схема расположения отверстий может изменяться относительно горизонтальной оси дрена. Базовые варианты расположения перфорированных отверстий приведены на рисунке 1.

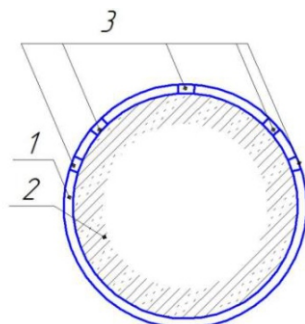


Рис. 1. Водопрopusкная конструкция и варианты расположения дренирующих отверстий: 1 - дренирующая конструкция; 2 - наполнитель дрена; 3 - дренажные отверстия

Предлагаемая конструкция позволяет в полной мере решить вопрос с дренированием основания дорожной одежды, однако нерешенным остаётся вопрос влияния предлагаемой конструкции на показатели несущей способности.

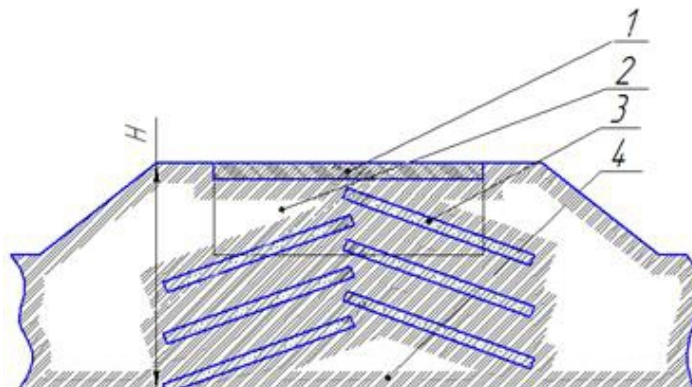


Рис. 2. Конструкция дренажной системы лесовозных дорог: 1- дорожное покрытие; 2- основание дорожной одежды; 3 – дренажные трубчатые конструкции; 4 – земляное полотно; Н – глубина промерзания

В таблице 2 представлены результаты расчета дорожной конструкции с дренирующими слоями, выполненные в программном продукте «Indor Pavement 9» ООО «ИндорСофт».

Таблица 2 – Расчет дорожной конструкции с дренажной ситстемой

№ слоя	Расчётные характеристики			Общий модуль упругости на поверхности слоёв, МПа	Глубина промерзания рабочего слоя	Дренаж
	Упругий прогиб, МПа	Сдвиг, МПа	Изгиб, МПа			
1	$E_{упр}=2800$	$E_{сдв}=1700$	$E_{изг}=3600$	$E_{пов}=342$ $K_{тр}=0,900$ $K_{расч}=7,980$ Запас = 787%		
2	$E_{упр}=2800$	$E_{сдв}=1700$	$E_{изг}=3600$ $K_{тр}=0,940$ $K_{расч}=1,609$ Запас = 71%	$E_{пов}=290$		
3	$E_{упр}=450$	$E_{сдв}=450$	$E_{изг}=450$	$E_{пов}=225$		
4	$E_{упр}=250$	$E_{сдв}=250$	$E_{изг}=250$	$E_{пов}=188$		
5	$E_{упр}=600$	$E_{сдв}=600$	$E_{изг}=600$	$E_{пов}=165$	$H_{min} = 12$ см Запас = 54 см	$H_{min} = 41$ см Запас = 1 см
6	$E_{упр}=36$	$E_{сдв}=36$		$E_{пов}=36$		

Заключение

Изучены закономерности влияния дренирующих конструкций на транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных дорог, расположенных на временно или постоянно переувлажнённых лесных землях.

Была проведена оценка влияния дренирующих конструкций на прочностные показатели дорожных одежд лесовозных дорог. Выявлено, что при обеспечении основных фильтрационных способностей подстилающих слоев дорожных одежд, укладка перфорированных дрен не оказала негативного влияния на прочностные показатели дорог. Предложенная расчетная схема оценки расстояния между дренами позволяет проводить расчёты расположения дренирующих элементов без снижения транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных дорог.

Обеспечение снижения влажности рабочего слоя земляного полотна существенно повысило морозозащитные свойства лесовозных дорог. Ожидаемая пучинность грунта оказалась ниже нормативных предельно-допустимых значений, а термическое сопротивление дорожной одежды выросло до значения в $0,45 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Разработанная конструкция дренающей системы может быть использована для обеспечения основных транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных автомобильных дорогах без снижения прочности по модулю упругости. Разработанные конструкции хорошо согласуются с опытно-экспериментальными работами по строительству лесовозных дорог [8, 9]. Учитывая данный факт, шаг укладки дренажей можно увеличить до 110 мм.

Рекомендуется для строительства и реконструкции участков лесовозных дорог в условиях переувлажнения и на периодически подтапливаемых лесных территориях.

Литература

1. Бируля А.К. Работоспособность дорожных одежд / А.К. Бируля, С.И. Михович. - М.: Транспорт, 1968. - 172 с.
2. Грязин А.Д. Дороги и транспорт в лесу / А.Д. Грязин, М.Ю. Смирнов // Лесн.пром-сть, 1990. – N 7. – С.23-24.
3. Добров Э.М. Обеспечение устойчивости земляного полотна в сложных геологических условиях / Э.М. Добров // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2000. - № 4. - С. 14 - 15.
4. Золотарь И.А. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / И.А. Золотарь, В.М. Сиденко, Н.А. Цузаков - М.: Транспорт, 1971. – 415 с.
5. Ильин Б.А. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог / Б.А. Ильин, Б.И. Кувалдин. – М.: Лесн.пром-сть, 1982. – 384 с.
6. Коганзон, М.С. Предложения по уточнению средней влажности связных грунтов при проектировании дорожных одежд нежесткого типа / М.С. Коганзон, Ю.М. Яковлев, М.Г. Горячев // Наука и техника дорожной отрасли. - 2000.- №2. – С. 16-17.
7. Кручинин, И.Н. Возможности повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог в различных сезонных условиях Свердловской области [Текст] / И.Н. Кручинин, С.И. Сушков, В.В. Данилов // Лесотехнический журнал. - 2018- № 4 (32). – С. 157-163
8. Кручинин, И.Н. Обоснование применения каменных материалов при строительстве оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог [Текст] / И.Н. Кручинин // Лесотехнический журнал. - 2016- № 2 (22). - С. 84-90.
9. Салихов М.Г. О нетрадиционных технологиях производства и укладки дорожно-строительных материалов в лесной зоне / М.Г. Салихов, С.Я. Алибеков, В.П. Сапцин, Е.В. Вайнштейн, Ю.Е. Щербаков // Лес. Экология. Природопользование: Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ 2007. - № 1. – С. 76-81.
10. Семенова Т.В. Совершенствование метода проектирования системы поверхностного водоотвода автомобильных и городских дорог по условиям обеспечения безопасности движения. [Текст]: автореф. дис.на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.23.11)/Семенова Татьяна Викторовна. -Омск, 2011. - 25с.
11. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. – 254 с.
12. Чан Куок Дат. Повышение несущей способности слабых оснований дорожных насыпей сваями-дренами. [Текст]: автореф. дис.на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.23.11)/Чан Куок Дат. -Москва, 2010. - 26с.
13. Sergej Rudov, Ol'ga Kunickaya, Albert Burgonutdinov, Igor Kruchinin, Alexey Prosu-zhih, Nikolay Dolmatov, Natalia Dmitrieva and Igor Grigorev. The Mathematical Model of Forestry Machines Impact on Cryolitozone Forest Soils. Asian Journal of Water, Environ-ment and Pollution - Volume 17, issue 4, 2020, pp. 89-95.
14. TFH61-07-C-0032. (2011) Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials: Final Report. Federal Highway Administration. Report No. FHWA-IF-12-002. – Washington, D.C., July 2011. – 263 p. Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.
15. Tuller, M. Water Retention and Characteristic Curve / M Tuller, D Or. – Elsevier Ltd., 2015. – P. 278-289.
16. Zetterling T., Nilsson N.A. Realization of poroelastic road surface. In: Proceedings of international tire / Road Noise Conference, 1990; 1990. p. 315-25

17.Özgan, E. et al. Multi-faceted investigation and modeling of compaction parameters for road construction / E. Özgan, S. Serin, İ. Vural // Journal of Terramechanics, August . –2015. – Volume 41. – Issue 4./ Electronic recourse/ – mode access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.005>.

18.Labelle, R. Soil Compaction Caused by Cut-to-Length Forest Operations and Possible Short-Term Natural Rehabilitation of Soil Density [Text]/ E.R. Labelle, D. Jaeger//Soil Science Society of America Journal. – 2011. – Vol.75. –No.6. –pp. 2314–2329.

©Жалко М.Е. – ст. препод. кафедры технических дисциплин, Лысьвенский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ЛФ ФГАОУ ВО «ПНИПУ»), e-mail: mihailz-49@mail.ru; Бургонутдинов А.М. – д-р техн. наук, доцент, Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru; Бурмистрова О.Н. – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГТУ»), e-mail: o.burmistrova@ugtu.net; Ченушкина С.В. – ст. препод. кафедры интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: chenushkinasv@m.usfeu.ru; Данилов В.В. – аспирант кафедры транспорта и дорожного строительства, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: danilov3576@icloud.com.

UDC 625.852

DEVELOPMENT OF METHODS TO INCREASE THE TRANSPORT AND PERFORMANCE INDICATORS OF FOREST ROADS OPERATING IN DIFFICULT NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

M.E. Zhalko, A.M. Burgonutdinov, O.N. Burmistrova, S.V. Chenushkina, V.V. Danilov

The main problems in the design of culvert layers for pavement of logging roads through the use of modern drainage structures are considered. Timber roads located in waterlogged and temporarily flooded forest areas are subject to a significant decrease in transport and operational performance. Conventional pavement designs in these conditions are not always able to provide the required physical and mechanical characteristics of the underlying layers. This causes significant complications in the construction and operation of logging roads. Despite a number of studies, the problem of designing pavements with acceptable performance properties remains unresolved. Thus, the appropriate method for selecting drainage structures with improved transport and operational characteristics, taking into account the natural and climatic conditions of operation, will solve the problem, which determined the purpose of this work. The purpose of the research was to develop requirements for the design parameters of pavement for logging roads using drainage structures. The following tasks were solved in the work: development of requirements for drainage structures of pavement of logging roads; substantiation of the location of drainage structures in the body of the pavement of logging roads. The result of the work was the creation of a design of drainage devices without reducing the strength characteristics of pavements. A variant of the arrangement of drainage holes in tubular drains, which are located only in the upper part of the structure, was chosen. The dimensions of the drainage holes and the spacing of their location are substantiated. In addition, the frost-protective properties of pavements were improved. The thermal resistance of the pavement increased to 0.45 m²K/W. Given the sufficient adequacy of the studies, the results of calculations and the location of drainage structures can be recommended for use in the practice of building logging roads located in difficult natural and climatic conditions.

Key words: logging roads, drainage structures, pavement.

References

1. Birulya A.K. [Efficiency of pavements] / A.K. Birulya, S.I. Mikhovich. - M.: Transport, 1968. - 172 p. (InRuss.)
2. Gryazin A.D. {Roads and transport in the forest} / A.D. Gryazin, M.Yu. Smirnov // Lesn.prom-st, 1990. - N 7. - P.23-24. (InRuss.)
3. Dobrov E.M. [Ensuring the stability of the subgrade in difficult geological conditions] / E.M. Dobrov // Science and technology in the road industry. - 2000. - No. 4. - S. 14 - 15. (InRuss.)
4. Zolotar I.A. [Water-thermal regime of subgrade and pavement] / I.A. Zolotar, V.M. Sidenko, N.A. Tsuzakov - M.: Transport, 1971. - 415 p. (InRuss.)

5. Ilyin B.A. [Design, construction and operation of logging roads] / B.A. Ilyin, B.I. Kuvaldin. - M.: Lesn.promst, 1982. - 384 p. (InRuss.)
6. Koganzon, M.S. [Proposals for clarifying the average moisture content of cohesive soils when designing non-rigid type pavements] / M.S. Koganzon, Yu.M. Yakovlev, M.G. Goryachev // Science and technology of the road industry. - 2000.- №2. - S. 16-17. (InRuss.)
7. Kruchinin, I.N. [Possibilities of improving the transport and operational qualities of logging roads in various seasonal conditions of the Sverdlovsk region] / I.N. Kruchinin, S.I. Sushkov, V.V. Danilov // Forestry journal. - 2018 - No. 4 (32). – pp. 157-163. (InRuss.)
8. Kruchinin, I.N. [Substantiation of the use of stone materials in the construction of foundations and coatings for logging roads] / I.N. Kruchinin // Forestry journal. - 2016- No. 2 (22). - P. 84-90. (InRuss.)
9. Salikhov M.G. [On non-traditional technologies for the production and laying of road building materials in the forest zone] / M.G. Salikhov, S.Ya. Alibekov, V.P. Sapsin, E.V. Weinstein, Yu.E. Shcherbakov // Forest. Ecology. Nature management: Bulletin of MarSTU. - Yoshkar-Ola: Publishing House of MarGTU 2007. - No. 1. - P. 76-81. (InRuss.)
10. Semenova T.V. [Improving the method of designing a surface drainage system for automobile and city roads in terms of ensuring traffic safety]: autoref.dis.nasoisk. scientist step. cand. tech. Sciences (05.23.11) / Semenova Tatyana Viktorov-na.-Omsk, 2011. – 25 p. (InRuss.)
11. Feldman G.M. [Movement of moisture in thawed and freezing soils]/ Novosibirsk: Nauka, 1988. - 254 p. (InRuss.)
12. Chan Quoc Dat. [Increasing the bearing capacity of weak foundations of road embankments with drain piles]/ autoref.dis.nasoisk. scientist step. cand. tech. Sciences (05.23.11) / Chan Kuok Date. - Moscow, 2010. – 26 p. (InRuss.)
13. Sergej Rudov, Ol'ga Kunickaya, Albert Burgonutdinov, Igor Kruchinin, Alexey Prosu-zhih, Nikolay Dolmatov, Natalia Dmitrieva and Igor Grigorev. The Mathematical Model of Forestry Machines Impact on Cryolitozone Forest Soils. Asian Journal of Water, Environ-ment and Pollution - Volume 17, issue 4, 2020, pp. 89-95.
14. TFH61-07-C-0032. (2011) Accelerated Implementation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials: Final Report. Federal Highway Administration. Report No. FHWA-IF-12-002. – Washington, D.C., July 2011. – 263 p. Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.
15. Tuller, M. Water Retention and Characteristic Curve / M Tuller, D Or. — Elsevier Ltd., 2015. — P. 278—289.
16. Zetterling T., Nilsson N.A. Realization of poroelastic road surface. In: Proceedings of international tire / Road Noise Conference, 1990; 1990. p. 315-25
17. Özgan, E. et al. Multi-faceted investigation and modeling of compaction parameters for road construction / E. Özgan, S. Serin, İ. Vural // Journal of Terramechanics, August. –2015. – Volume 41. – Issue 4./ Electronic recourse/ – mode access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.005>.
18. Labelle, R. Soil Compaction Caused by Cut-to-Length Forest Operations and Possible Short-Term Natural Rehabilitation of Soil Density [Text]/ E.R. Labelle, D. Jaeger//Soil Science Society of America Journal. – 2011. – Vol.75. –No.6. –P.2314–2329.

© **Zhalko M.E.** – Senior Lecturer, Lysva Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Lysva, e-mail: mihailz-49@mail.ru; **Burgonutdinov A.M.** – Grand PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru; **Burmistrova O.N.** – Grand PhD of Technical Sciences, Professor of the Department of technologies and transport and technological machines Ukhta State Technical University (USTU), e-mail: olga.burm@mail.ru; **Chenushkina S.V.** – Senior Lecturer of the Department of Intelligent Systems, USFEU, e-mail: chenushkinasv@m.usfeu.ru; **Danilov V.V.** – postgraduate student of the Department of Transport and Road Construction, USFEU, e-mail: danilov3576@icloud.com.

УДК 625.852

ПОВЫШЕНИЕ МОРОЗОУСТОЙЧИВОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

М.Е. Жалко

Аннотация. Рассмотрены основные вопросы при проектировании морозозащитных слоев дорожных одежд лесовозных дорог путем использования современных водопропускных дренирующих конструкций. Лесотранспортные пути, расположенные на переувлажненных, подтапливаемых и сырых грунтах подвержены значительному снижению прочностных и морозозащитных показателей. Физико-механические характеристики конструктивных слоев традиционных конструкций дорожных одежд автомобильных дорог в рассматриваемых условиях не способны обеспечить требуемые показатели. Это накладывает ограничения на строительство и эксплуатацию лесовозных дорог. Несмотря на ряд проведенных исследований, задача создания морозоустойчивых дорожных одежд, с приемлемыми эксплуатационными свойствами остается нерешенной. Таким образом, решить проблему позволит соответствующая методика расчета дренирующих конструкций, с улучшенными прочностными показателями, с учетом гидро-геологических условий эксплуатации, что и определило цель настоящей работы. Целью исследований была разработка требований к показателям морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с использованием дренирующих конструкций. В работе были решены следующие задачи: разработка требований к морозозащитным конструкциям дорожных одежд лесовозных дорог; оценка влияния дренирующих устройств на прочностные и морозозащитные свойства дорожной одежды лесовозных дорог. Результатами работы стала разработка конструктивной схемы расположения дренирующих элементов. Выбран вариант шахматного расположения дренирующих конструкций, которые располагаются только в дренирующем слое. Обоснованы размеры дренирующих слоев. Снижение влажности конструктивных слоев дорожных одежд привело к существенному повышению морозозащитных свойств, снизилась величина ожидаемого зимнего пучения. Проведены расчеты дренирующих слоев. Учитывая адекватность полученных результатов, предложенные решения по расположению дренирующих конструкций могут быть рекомендованы для использования при строительстве лесовозных дорог.

Ключевые слова: лесовозные дороги, дренирующие конструкции, морозоустойчивость.

Введение

Одним из основных элементов функционирования лесопромышленного комплекса служит транспортная инфраструктура. Стратегией развития лесного комплекса РФ на период до 2030 г. предусмотрен ряд мероприятий, обеспечивающих ее следующее развитие: внедрение современных технологий при строительстве транспортной инфраструктуры; совершенствование правил и нормативов проектирования лесотранспортных путей. Основные исследования в этой области сосредоточены либо на повышение технологической эффективности строительства лесных дорог, либо на разработке новых методов проектирования [3, 4, 11]. Большое внимание уделяется разработкам технологий строительства дорожных одежд и искусственных сооружений. Учитывая то, что лесовозные дороги расположены на значительных расстояниях от производственных баз, становится экономически нецелесообразно использовать традиционные технологии и строительные материалы. Активно разрабатываются дорожные конструкции способные активно противостоять внешним климатическим воздействиям [6]. Например, использование морозозащитных дорожных одежд с улучшенными физико-механическими показателями [8, 14]. Однако их применение сдерживается отсутствием технологий, способных раскрыть все преимущества перед традиционными технологиями и материалами. [1]. Большинство исследователей в области эксплуатации лесовозных дорог пришли к выводу, что для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных показателей необходимо использовать либо дренажные системы, либо модифицировать системы водоотведения [2, 5, 7, 12, 13].

При анализе условий работоспособности дренирующих слоев необходимо учитывать как физико-механические показатели, влияющие на прочность дорожной одежды, так и способность дренирующих слоев обеспечить требуемый водно-тепловой режим земляных сооружений автомобильных дорог. В качестве основных материалов для устройства дренажных систем применяются гравия, пески, шлаки и другие строительные материалы с известными водопропускными свойствами. При выборе материала для дренирующего слоя необходимо учитывать также свойства, влияющие на прочность дорожной одежды

[1]. Хочется подчеркнуть, что затраты на сооружение традиционных дренажных систем лесовозных дорог значительные [9,11]. С целью уменьшения затрат на строительство и эксплуатацию лесовозных дорог были разработаны схемы дренажных сооружений, в которых, взамен традиционных дренирующих слоев были использованы иные компоненты. Универсальным решением для лесовозных дорог может служить устройство комбинированного плоскостного горизонтального дренажа, с улучшенными прочностными показателями [4].

В наших исследованиях было показано, что основным назначением предлагаемых дренажных систем служит отведение воды из грунтового основания дорожной одежды по всей глубине промерзания, без снижения прочностных характеристик [8]. Ряд исследователей предполагали, что в качестве основного критерия необходимо проводить только обоснование геометрических параметров дренирующего слоя для данных условий или определять коэффициент фильтрации в заданной дренажной конструкции. [2, 3, 9, 15]. Однако, учитывая то, что лесотранспортные сети оказывают значительное влияние на средообразующую функцию леса, необходимо рассмотреть возможность проведения мероприятий по регулированию не только водоотведения от дорожных конструкций, но и устойчивого управления лесами. Эти мероприятия накладывают существенные ограничения на выбор конструктивных решений расположения дренирующих элементов [5, 7].

Таким образом, создание новых технических разработок для повышения морозоустойчивости дорожных одежд, за счет создания высокоэффективных решений по водоотведению, с использованием особых конструктивных дренирующих элементов является актуальным направлением исследований, что и определило цель настоящей работы.

Целью исследований стала разработка требований к прочностным показателям морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с использованием дренирующих конструкций.

В работе рассматривались следующие задачи: 1) разработка требований к морозозащитным конструкциям дорожных одежд лесовозных дорог; 2) оценка влияния дренирующих устройств на прочностные и морозозащитные свойства дорожной одежды лесовозных дорог.

Методы и материалы

Как было показано в работах [1, 3, 4, 10, 11] вопросы устройства дренажных систем и водоотведения на лесовозных автомобильных дорогах освещены достаточно полно.

Известно, что основные слои дорожной одежды лесовозных дорог можно подразделить на [7]:

1. Покрытие – верхняя часть дорожной одежды, воспринимающая усилия от колес подвижного состава и подвергающаяся непосредственному воздействию атмосферных факторов;

2. Основание – часть дорожной одежды, обеспечивающая совместно с покрытием перераспределение и снижение давления на расположенные ниже дополнительные слои или грунт земляного полотна;

3. Дополнительные слои основания (морозозащитные, теплоизоляционные, дренирующие и др.).

Дополнительно к этому, для полного водоотвода устраивается плоскостной горизонтальный дренаж, дополняемый прикромочным и поперечным дренажом мелкого заложения.

Основным свойством дренирующих слоёв является увеличение не только морозостойкости дорожной одежды, но и показатели прочности. Выбор толщины слоёв производят на основе обеспечения заданной прочности всей конструкции дорожной одежды. Некоторые учёные считают, что невозможно обеспечить одновременно столь противоречивые свойства для лесовозных автомобильных дорог [7, 9].

В целях оптимизации прочностных параметров конструктивных слоев дорожных одежд будем использовать принцип объёмного поглощения воды на всю глубину промерзания.

Результаты

Повышение морозоустойчивости и несущей способности дорожных одежд напрямую зависит от типа конструкции дорожной одежды и расположения в них дренирующих элементов [9]. Учитывая особенности эксплуатации лесовозных дорог особое внимание следует обратить на их возможность работать в условиях значительного переувлажнения [7].

Решить поставленные задачи позволяет оценка величины воронки депрессии, предложенной А.Ф. Терновым:

$$h = \sqrt{h_2^2 + \frac{q}{k} 2x}, \quad (1)$$

где h_2 – превышение уровня грунтовых вод над уровнем воды в дренах, м;

k – коэффициент фильтрации грунта, м/сут;

q – расход воды в дренирующем слое, м³/сут;

x – расстояние до центра воронки депрессии, м.

Теперь, если задаться расстоянием между дренажными трубами по горизонтали, то можно найти значение h , при котором расход воды в слое будет максимальным.

В таблице 1 и 2 представлены результаты расчета дорожной конструкции на морозоустойчивость и водопротекную способность конструктивного слоя.

Таблица 1 – Расчет дорожной конструкции на морозоустойчивость

№	Параметр	Значение
1	Глубина грунтовых вод (от низа дорожной одежды)	$H_y \approx 1,64$ м
2	Коэффициент учёта уровня грунтовых вод	$K_{угв} = 0,66$
3	Коэффициент $C_{пуч}$	$C_{пуч} = 0,70$
4	Коэффициент C_p	$C_p = 0,68$
5	Коэффициент учёта нагрузки от вышележащих слоёв	$K_{нагр} = 0,82$
6	Коэффициент, зависящий от расчётной влажности грунта	$K_{вл} = 1,14$
7	Коэффициент учёта гранулометрии основания	$K_{гр} = 1,30$
8	Коэффициент, зависящий от уплотнения слоя	$K_{пл} = 0,80$
9	Коэффициент, учитывающий срок службы дорожной одежды	$K_{од} = 0,90$
10	Коэффициент, зависящий от расчётной влажности грунта	$K_{вл} = 1,14$
11	Понижающий коэффициент, учитывающий дорожно-климатическую зону	$\delta = 0,95$
12	Коэффициент, учитывающий схему увлажнения	$K_{увл} = 0,30$
13	Приведённое термическое сопротивление	$R_{пр} = 0,45$ м ² *К/Вт
14	Термическое сопротивление дорожной одежды	$R_{од(о)} = 0,23$ м ² *К/Вт
15	Требуемое термическое сопротивление дорожной одежды	$R_{од(тр)} = 0,11$ м ² *К/Вт
16	Величина морозного пучения при усреднённых условиях	$L_{пуч.ср.} = 8,98$ см
17	Ожидаемая пучинистость грунта	$5,79$ см < $6,00$ см
18	Морозозащитный слой имеет достаточную толщину 42,0 см (требуется $\geq -12,0$ см)	

Таблица 2 – Расчет дренирующих слоев

№	Параметр	Значение
1	Толщина слоя, насыщенного водой	$h_{нас} = 24$ см
2	Дополнительная толщина слоя	$h_{зап} = 17$ см
3	Коэффициент фильтрации	$K_f = 20,0$ м/сут
4	Пористость	$n = 0,38$
5	Полная толщина дренирующего слоя	$41,00$ см
6	Дренирующий слой имеет достаточную толщину 42 см (требуется ≥ 41 см)	

С целью повышения прочностных показателей дорожных одежд была разработана конструктивная схема расположения дренирующих элементов. Предлагаемое техническое решение расположения дренажных труб представлено на рисунке 1.

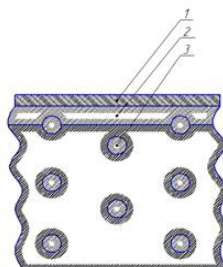


Рис. 1. Схема расположения дренажных труб: 1 – дорожное полотно; 2 – дорожная одежда; 3 – дренирующие трубы

Разработанная конструкция позволяет в полной мере решить вопрос с водоотводом из основания дорожной одежды и повышением ее морозоустойчивости.

Заключение

В ходе исследований проведена оценка влияния дренирующих конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных дорог на прочностные показатели и морозоустойчивость.

Выявлено, что для обеспечения основных фильтрационных свойств необходимо располагать дренирующие элементы в шахматном порядке, с учетом величины воронки депрессии. Предложена расчетная схема оценки расстояния между дренами.

Снижение влажности рабочего слоя земляного полотна существенно повысило морозозащитные свойства лесовозных дорог. Ожидаемая величина толщины дренирующего слоя должна быть не менее расчетной. Обеспеченность морозоустойчивости слоя достигается снижением ожидаемой пучинистости грунтов до величин не более 6,00 см.

Представленная конструкция морозоустойчивой дорожной одежды может быть использована для строительства лесовозных дорог, расположенных в сложных природно-климатических и гидрогеологических условиях, при глубине промерзания грунтов не более 2,76 м [6, 9].

Литература

1. Вырко Н. П. Сухопутный транспорт леса: учебник для студен-тов вузов / Н. П. Вырко. – Минск: Высш. шк., 1987. – 437 с
2. Золотарь И.А. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / И.А. Золотарь, В.М. Сиденко, Н.А. Цузаков - М.: Транспорт, 1971. – 415 с.
3. Киселёв М.Ф. Борьба с пучинами на автомобильных дорогах / М.Ф.Киселёв. - М.: Стройиздат, 2001.-200 с.
4. Коганзон, М.С. Предложения по уточнению средней влажности связных грунтов при проектировании дорожных одежд нежесткого типа / М.С. Коганзон, Ю.М. Яковлев, М.Г. Горячев // Наука и техника дорожной отрасли. - 2000.- №2. – С. 16-17.
5. Леонович И. И. Применение реологических моделей к расчету дорожных одежд / И.И. Леонович [и др.]. – М.: Наука и техника, 1971. – 203 с.
6. Методические указания по проектированию морозозащитных и дренирующих слоев в основании проезжей части автомобильных дорог. – М.: Минтрансстрой, 1965. – 52 с.
7. Павлов Ф.А. Покрытие лесных дорог/Ф.А. Павлов. - М.: Лесная промышленность, 1980.– 176 с.
8. Семенова Т.В. Совершенствование метода проектирования системы поверхностного водоотвода автомобильных и городских дорог по условиям обеспечения безопасности движения. [Текст]:автореф.дис.насоиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.23.11)/Семенова Татьяна Викторовна. -Омск, 2011. - 25с.
9. Тулаев А. Я. Конструкция и расчет дренажных устройств: учебник / А. Я. Тулаев – М.: Транспорт, 1980. – 191 с.
- 10.Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. – 254 с.
- 11.Чан Куок Дат. Повышение несущей способности слабых оснований дорожных насыпей сваями-дренами. [Текст]: автореф.дис.насоиск. учен. степ. канд. техн. наук (05.23.11)/Чан Куок Дат.-Москва, 2010. - 26с.
- 12.Özgan, E. et al. Multi-faceted investigation and modeling of compaction parameters for road construction / E. Özgan, S. Serin, İ. Vural // Journal of Terramechanics, August . –2015. – Volume 41. – Issue 4./ Electronic recourse/ – mode access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.005>.
- 13.Sergej Rudov, Ol'ga Kunickaya, Albert Burgonutdinov, Igor Kruchinin, Alexey Prosu-zhih, Nikolay Dolmatov, Natalia Dmitrieva and Igor Grigorev. The Mathematical Model of Forestry Machines Impact on Cryolitozone Forest Soils. Asian Journal of Water, Environ-ment and Pollution - Volume 17, issue 4, 2020, pp. 89-95.
- 14.TFH61-07-C-0032. (2011) Accelerated Implem entation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials: Final Report. Federal Highway Administration. Report No. FHWA-IF-12-002. – Washington, D.C., July 2011. – 263 p. Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.
- 15.Tuller, M. Water Retention and Characteristic Curve / M Tuller, D Or. — Elsevier Ltd., 2015. — P. 278—289.

16. Zetterling T., Nilsson N.A. Realization of poroelastic road surface. In: Proceedings of international tire / Road Noise Conference, 1990; 1990. p. 315-25

© Жалко М.Е. – ст. препод. кафедры технических дисциплин, Лысьвенский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ЛФ ФГАОУ ВО «ПНИПУ»), e-mail: mihailz-49@mail.ru.

UDC 625.852

INCREASING THE FROST RESISTANCE OF ROAD PAVING FOR FOREST ROADS

M.E. Zhalko

Annotation. The main issues in the design of frost-protective layers of road pavement for logging roads by using modern culvert drainage structures are considered. Timber transport routes located on waterlogged, flooded and damp soils are subject to a significant decrease in strength and frost protection indicators. The physical and mechanical characteristics of the structural layers of traditional pavement structures of highways under the conditions under consideration are not able to provide the required performance. This imposes restrictions on the construction and operation of logging roads. Despite a number of studies, the problem of creating frost-resistant pavements with acceptable performance properties remains unresolved. Thus, an appropriate method for calculating drainage structures with improved strength indicators, taking into account the hydro-geological operating conditions, will solve the problem, which determined the purpose of this work. The purpose of the research was to develop requirements for the indicators of frost-resistant road pavements for logging roads using drainage structures. The following tasks were solved in the work: development of requirements for frost-resistant pavements for logging roads; assessment of the effect of drainage devices on the strength and frost-protective properties of the road pavement of logging roads. The result of the work was the development of a constructive scheme for the location of drainage elements. A variant of the staggered arrangement of drainage structures was chosen, which are located only in the drainage layer. The dimensions of the draining layers are substantiated. A decrease in the moisture content of the structural layers of pavements has led to a significant increase in frost-protective properties, and the magnitude of the expected winter heaving has decreased. Calculations of drainage layers have been carried out. Given the adequacy of the results obtained, the proposed solutions for the location of drainage structures can be recommended for use in the construction of logging roads.

Key words: logging roads, drainage structures, frost resistance.

References

1. Vyrko N.P. [Land transport of the forest: a textbook for university students] / N.P. Vyrko. - Minsk: Higher. school, 1987. - 437 p. (InRuss.)
2. Zolotar I.A. [Water-thermal regime of subgrade and pavement] / I.A. Zolotar, V.M. Sidenko, N.A. Tsuzakov - M.: Transport, 1971. - 415 p. (InRuss.)
3. Kiselev M.F. [Fighting the abysses on highways] / M.F. Kiselev. - M.: Stroyizdat, 2001.-200 p. (InRuss.)
4. Koganzon, M.S. [Proposals for clarifying the average moisture content of cohesive soils when designing non-rigid type pavements] / M.S. Koganzon, Yu.M. Yakovlev, M.G. Goryachev // Science and technology of the road industry. - 2000.- №2. - S. 16-17. (InRuss.)
5. Leonovich I.I. [Application of rheological models to the calculation of pavements] / I.I. Leonovich [i dr.]. - M.: Science and technology, 1971. - 203 p. (InRuss.)
6. [Metodicheskiye ukazaniya po proyektirovaniyu morozozashchitnykh i dreniruyushchikh sloev v osnovanii proyezzhey chasti avtomobil'nykh dorog] / M.: Mintranstroy, 1965. - 52 p. (InRuss.)
7. Pavlov F.A. [Covering forest roads] / F.A. Pavlov. - M.: Timber industry, 1980. – 176 p. (InRuss.)
8. Semenova T.V. [Improving the method of designing a surface drainage system for automobile and city roads in terms of ensuring traffic safety / autoref. dis. nasoi. scientist step. cand. tech. Sciences (05.23.11) / Semenova Tatyana Viktorovna.-Omsk, 2011. - 25s. (InRuss.)
9. Tulaev A. Ya. [Design and calculation of drainage devices: textbook] / A. Ya. Tulaev - M.: Transport, 1980. - 191 p. (InRuss.)

10. Feldman G.M. [Movement of moisture in thawed and freezing soils] / Novosibirsk: Nauka, 1988. - 254 p. (In Russ.)
11. Chan Quoc Dat. [Increasing the bearing capacity of weak foundations of road embankments with drain piles] / autoref. dis. nasosk. scientist step. cand. tech. Sciences (05.23.11) / Chan Kuok Date. - Moscow, 2010. - 26 p. (In Russ.)
12. Özgan, E. et al. Multi-faceted investigation and modeling of compaction parameters for road construction / E. Özgan, S. Serin, İ. Vural // Journal of Terramechanics, August . –2015. – Volume 41. – Issue 4./ Electronic recourse/ – mode access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.005>.
13. Sergej Rudov, Ol'ga Kunickaya, Albert Burgonutdinov, Igor Kruchinin, Alexey Prosu-zhih, Nikolay Dolmatov, Natalia Dmitrieva and Igor Grigorev. The Mathematical Model of Forestry Machines Impact on Cryolitozone Forest Soils. Asian Journal of Water, Environ-ment and Pollution - Volume 17, issue 4, 2020, pp. 89-95.
14. TFH61-07-C-0032. (2011) Accelerated Implem entation of Intelligent Compaction Technology for Embankment Subgrade Soils, Aggregate Base, and Asphalt Pavement Materials: Final Report. Federal Highway Administration. Report No. FHWA-IF-12-002. – Washington, D.C., July 2011. – 263 p. Wearing Course Material, Transport Research Laboratory Project Report 65.
15. Tuller, M. Water Retention and Characteristic Curve / M Tuller, D Or. — Elsevier Ltd., 2015. — P. 278—289.
16. Zetterling T., Nilsson N.A. Realization of poroelastic road surface. In: Proceedings of interna-tional tire / Road Noise Conference, 1990; 1990. p. 315-25

© **Zhaliko M.E.** – Senior Lecturer, Lysva Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Lysva, e-mail: mihailz-49@mail.ru.

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 674.02

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕХОВ

А.А. Лукаш, Т.И. Глотова, Н.П. Малышева, Н.П. Путрова, О.Н. Чернышев

В статье изложены вопросы применения более простого метода определения себестоимости продукции при расчете технико-экономических показателей деревообрабатывающих цехов. Загнет на вывоз необработанной древесины позволяет увеличить объемы лесопереработки внутри страны, повысить добавленную стоимость экспорта и повысить налоговые поступления в федеральный бюджет. В связи с этим для обеспечения эффективности лесопереработки ожидается приток инвестиций для приобретения новой техники и/или помещений для обработки круглых лесоматериалов. А это в свою очередь потребует проведения технико-экономического анализа при выборе вида выпускаемой продукции, технологии и оборудования. По существующей методике технологический расчет расхода сырья и материалов для производства изделия производится для каждой детали отдельно. А затем производится суммирование сырья и материалов для производства всех деталей в изделии. При большом количестве деталей в изделии это весьма трудоемко. Трудоемкость значительно возрастает, если планируется выпуск нескольких изделий. Поэтому предложен более простой (упрощенный) метод расчета сырья и материалов для одной детали с усредненными размерами по спецификации деталей и их количества, которая составляется на основе разработанной конструкции изделия. При определении технико-экономической эффективности производства производится расчет себестоимости по следующим основным статьям затрат: сырье, материалы, топливо и энергия, оплата труда, отчисления во внебюджетные фонды, амортизация, производственные и непроизводственные расходы. Предложен экспресс-метод определения величины себестоимости продукции на основе затрат на сырье и материалы. Показано на примере практическое применение экспресс-метода расчета себестоимости при составлении при расчете технико-экономических показателей нового мебельного цеха при изготовлении шкафа трех дверного из ЛДСП.

Ключевые слова: деревообработка, метод, себестоимость продукции, технико-экономическая эффективность.

Введение

С 1 января 2022 года начинает действовать запрет на экспорт необработанных и грубо обработанных лесоматериалов хвойных и ценных лиственных пород. Новые правила позволяют прекратить бесконтрольный вывоз необработанной древесины, увеличить объемы лесопереработки внутри страны, повысить добавленную стоимость экспорта и повысить налоговые поступления в федеральный бюджет. Ожидается приток инвестиций для приобретения новой техники и/или помещений для обработки круглых лесоматериалов, что обеспечит эффективную лесопереработку. Российские потребители пиломатериалов строители и мебельщики будут надежно обеспечены российским древесным сырьем. Согласно Стратегии развития лесного комплекса, к 2030 году необходимо увеличить вклад лесной промышленности в экономику страны и долю России на мировом рынке лесной продукции [1].

Методы и материалы

Объектом исследования - производство продукции из древесины. Предметом исследования являются методы определения технико-экономической эффективности деревоперерабатывающих производств. Определение технико-экономической эффективности деревоперерабатывающих производств базируется на эмпирических подходах и методах, применение прямых численных методов линейной алгебры.

Результаты

При определении целесообразности строительства новых цехов (участков) или организации производства на существующих производственных помещениях разрабатывается бизнес–план, в котором должны быть определены технико-экономические показатели продукции. В условиях непостоянства цен на сырье, материалы, энергию и оборудования при составлении бизнес планов необходимо проанализировать предполагаемые производственные затраты на выпуск тех или иных видов продукции. Если при производстве плитных материалов, фанеры, пиломатериалов производственные затраты постоянны, то в мебельном производстве затраты зависят от конструкции каждого изделия и применяемых видов сырья, материалов и фурнитуры. Расчет технико-экономических показателей производится после выбора конструкции изделия и материалов для его производства.

Для установления показателей технико–экономической эффективности производства производится расчет себестоимости по следующим основным статьям затрат: сырье, материалы, топливо и энергия, оплата труда, отчисления во внебюджетные фонды, амортизация, прочие производственные и непроизводственные расходы. Затраты на сырье и материалы являются основными в себестоимости продукции и могут определяться исходя из конструкции изделия и применяемого сырья и материалов.

По существующей методике технологический расчет расхода сырья и материалов для производства изделия производится для каждой детали отдельно. А затем производится суммирование сырья и материалов для производства всех деталей в изделии. При большом количестве деталей в изделии это весьма трудоемко. Трудоемкость значительно возрастает, если планируется выпуск нескольких изделий. Поэтому предлагается более простой (укрупненный) метод расчета сырья и материалов. Для этого предлагается производить расчет сырья для одной детали с усредненными размерами.

При укрупненном методе расчетов расхода сырья используется спецификация деталей и их количества, которая составляется на основе разработанной конструкции изделия. При изготовлении изделий из пиломатериалов укрупненный расчет сырья производится для одной детали, размеры которой усреднены.

Усредненная длина детали L_v , мм, рассчитывается по формуле

$$L_v = \frac{L_1 \times Q_1 + L_2 \times Q_2 + \dots + L_N \times Q_N}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N} \quad (1)$$

где $L_1; L_2 \dots L_N$ – длины деталей, применяемых в изделии, мм;

$Q_1; Q_2 \dots Q_N$ – количество деталей в изделии, шт.

Усредненные значения ширины (B_v , мм) и толщины (S_v , мм) определяются аналогично.

Объем деталей в одном изделии в чистоте V_d , м³, составит

$$V_d = L_v \cdot B_v \cdot S_v. \quad (2)$$

Для детали длиной L_v , шириной B_v и толщиной S_v по нормативам устанавливаются припуски на обработку ($\Delta L_v, \Delta B_v, \Delta S_v$) и размеры заготовки определяется по формуле

$$V_z = (L_v + \Delta L_v) \cdot (B_v + \Delta B_v) \cdot (S_v + \Delta S_v). \quad (3)$$

Количество сырья, потребное для изготовления одного изделия V_c , м³, определяется с учетом коэффициентов регламентируемых технологических потерь ($K_{т.п.}$) и объемного выхода ($K_{о.в.}$)

$$V_c = V_z \cdot K_{т.п.} \cdot K_{о.в.} \quad (4)$$

Так как размеры деталей, входящие в изделие имеют существенный разброс размеров, то статистическая погрешность определения статистических показателей может изменяться в диапазоне от 10 до 25 %, что в экономической статистике является допустимым. С учетом этого обстоятельства V_c необходимо скорректировать на величину коэффициента погрешности (K_n) 1,1 – 1,2. Тогда окончательный результат количества сырья, потребного на изделие определяется по формуле

$$V_c = V_z \cdot K_{т.п.} \cdot K_{о.в.} \cdot K_n \cdot N, \quad (5)$$

где N – общее количество деталей в изделии, шт.

Норма расхода сырья N определяется отношением количества сырья для изготовления одного изделия V_c к суммарному объему деталей в изделии, V_d , м³

$$\dot{I} = \frac{V_C}{V_A} \quad (6)$$

А количество отходов, образующихся при изготовлении одного изделия, $V_{отх}$, м³, определяется по формуле

$$V_{отх} = V_C - V_{дб} \quad (7)$$

Расчет расхода плитных материалов, имеющих постоянную толщину в поперечном сечении (ДСтП, ДВП) производится аналогичным образом, а их количество учитывается в м².

Рассмотрим практическое применение экспресс-метода расчета себестоимости при составлении при расчете технико-экономических показателей нового мебельного цеха при изготовлении шкафа трех дверного размером 1210x2181x580мм из ЛДСтП годовой программой 20000 шт.

С учетом рекомендаций [2, 3] была разработана конструкция изделия. Трех дверный шкаф (рис. 1) состоит из двух боковых стенок, средней стенки, горизонтального верхнего проходного и горизонтального нижнего не проходного щитов, выполненных из ламинированной древесно-стружечной плиты. Кромки щитов облицованы материалом кромочным рулонным ГОСТ 32683-2014. Задняя стенка выполнена из древесноволокнистой плиты ГОСТ 4598-86.

Фасады дверей и накладные стенки выдвижных ящиков выполнены из древесной моноструктурной плиты ГОСТ 32274-2013. Их кромки пласти облицованы поливинилхлоридной пленкой ГОСТ 24944-81. На фасадах и накладных стенках выдвижных ящиков установлены металлические ручки-скобы «GAMET» UN 50-0096-G006, которые крепятся на винтах.

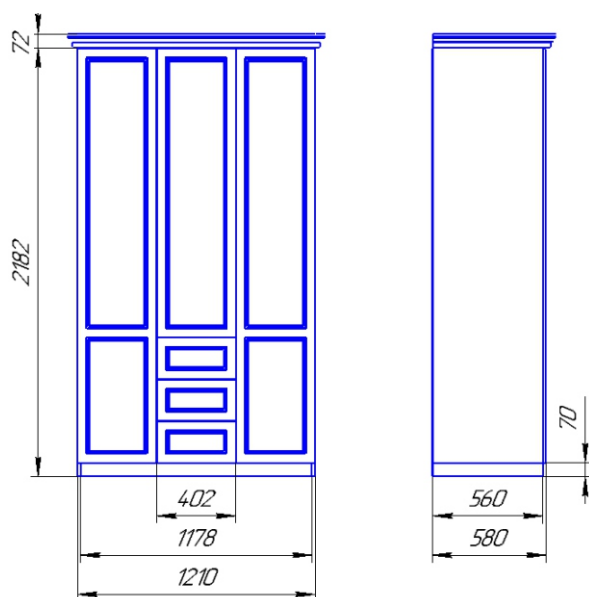


Рис. 1. Общий вид изделия

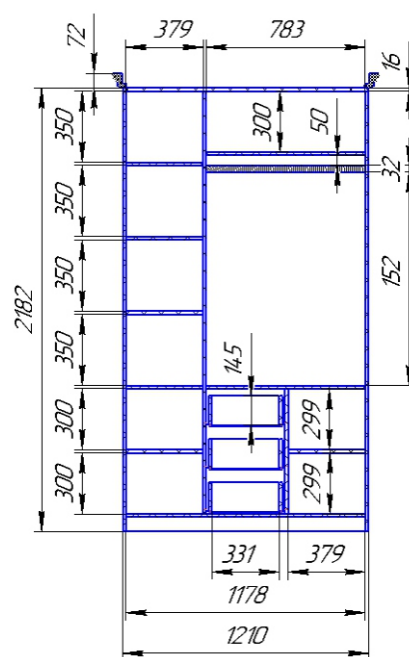


Рис. 2. Внутреннее устройство габаритные и функциональные размеры шкафа

На основе данных [4-6] составлен технологический процесс, выбрано оборудование на общую сумму 24532 тыс. руб. и разработан план размещения оборудования в цехе (рисунок 3).

Сравнительный расчет сырья для шкафа трехдверного из ЛДСтП по существующей методике и предлагаемой укрупненной методике расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

На основе рекомендаций [7] произведен расчет сырья и материалов. Затраты на сырье и материалы составили 9,1 тыс. руб.

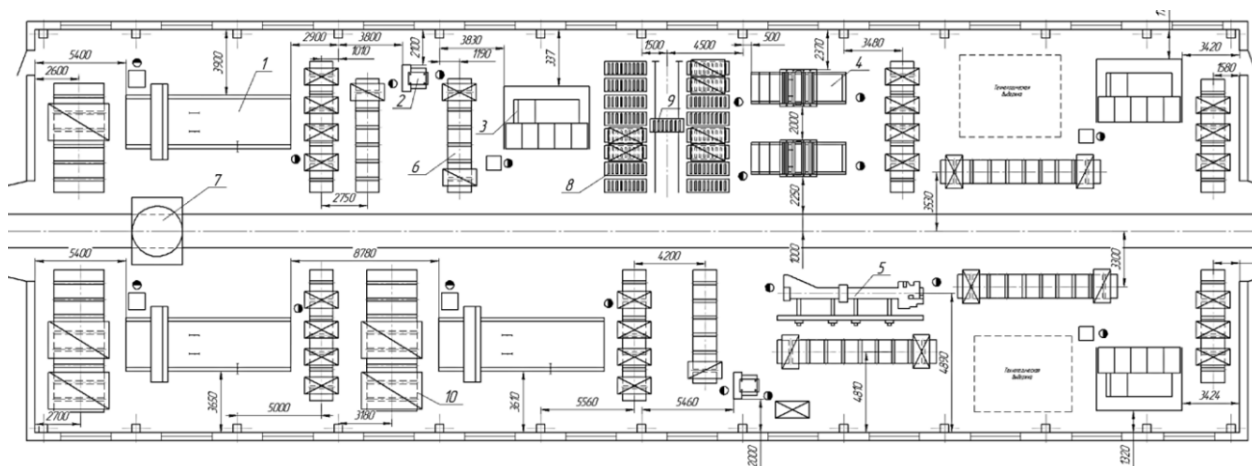


Рис. 3. Цех производства шкафа трехдверного: 1 – Станок форматно-раскроечный Krom FORS 3200 PLUS; 2 – Станок круглопильный JET JTSS -2500; 3- Центр обрабатывающий ROVER A3.30; 4 – Пресс мембранно-вакуумный ORMA PMI/AIR SYSTEM 25/14; 5 – Линия OLIMPIC к 560; 6 – Рольганг роликовый неприводной; 7 – Траверсная тележка; 8 – Секции неприводных рольгангов; 9 – Тележка рольганговая однорядная; 10 – Рольганг роликовый.

Таблица 1 – Ведомость норм расхода ЛДСтП на изделие (существующая методика)

Наименование сборочных единиц, деталей	Количество, а, шт.	Размеры детали, мм			Площадь деталей на изделие, $V_{об}, м^2$	Размеры заготовок, мм			Площадь заготовок на изделие, $V_3, м^2$	Площадь, $V_3^{пл}$, $м^2$ с учетом $K_{пл}$	Норма расхода материал, $V_{н.м}$, $м^2$
		l	b	h		L	B	H			
Стенка боковая вертикальная	2	2166	560	16	2,426	2186	580	16	2,536	2,587	2,812
Стенка вертикальная	1	2080	560	16	1,165	2100	580	16	1,218	1,242	1,350
Стенка боковая вертикальная	1	614	560	16	0,344	628	574	16	0,360	0,367	0,399
Щит горизонтальный	1	1210	560	16	0,678	1226	576	16	0,706	0,720	0,783
Щит Горизонтальный	1	1194	560	16	0,669	1208	574	16	0,693	0,707	0,769
Полка	4	540	375	16	0,81	552	387	16	0,854	0,871	0,947
Щит горизонтальный	1	540	379	16	0,205	552	391	16	0,216	0,220	0,239
Полка	1	560	375	16	0,210	572	387	16	0,221	0,225	0,245
Щит горизонтальны	2	783	560	16	0,877	797	547	16	0,915	0,933	1,014
Цоколь	1	1178	70	16	0,082	1192	260	16	0,310	0,103	0,112
Стенка ящика задняя	3	331	145	16	0,144	341	155	16	0,159	0,162	0,176
Станка ящика передняя	3	331	145	16	0,144	341	155	16	0,159	0,162	0,176
Стенка ящика боковая	6	500	145	16	0,435	510	155	16	0,474	0,483	0,525

Расход ЛДСтП на изделие составляет 9,547 $м^2$.

Расчет по предлагаемой методике сведен в таблицу 2 и определен с учетом регламентируемых коэффициентов технологических потерь и объемного выхода заготовок из сырья.

Таблица 2– Ведомость норм расхода ЛДСтП на изделие (предлагаемая методика)

Наименование сборочных единиц, деталей	Количество, а, шт.	Размеры детали, мм			Площадь деталей на изделие, $V_{\text{д}}, \text{м}^2$	Размеры заготовок, мм			Площадь заготовок на изделие, $V_{\text{з}}, \text{м}^2$	Площадь, $V_{\text{з}}^{\text{нп}}, \text{м}^2$ с учетом $K_{\text{нп}}$	Норма расхода материал, $V_{\text{н.м}}, \text{м}^2$
		$L_{\text{д}}$	$B_{\text{д}}$	$S_{\text{д}}$		$L_{\text{з}} + \Delta L_{\text{з}}$	$B_{\text{з}} + \Delta B_{\text{з}}$	H			
Базовая деталь	27	785	316	16	0,248	799	326	16	0,261	2,289	7,522

Расход ЛДСтП с учетом коэффициента погрешности (1,2) составит 9,548

Себестоимость единицы произведенной продукции включает в себя прямые материальные, прямые трудовые и как переменные, так и постоянные производственные накладные расходы. [8]. В зарубежной и отечественной практике существует различные системы учета и калькулирования затрат. Например, для учета затрат для мебельных предприятий можно применять систему «таргет-костинг», позволяющую организации снизить ущерб, который может произойти при внедрении новой продукции на рынок. [9] Эта система была разработана в Японии, а затем стала внедряться в США и европейских странах [10-13].

Основное отличие данного метода от традиционного заключается в том, что если в традиционном методе изначально рассчитываются затраты на производство продукции, а затем путем прибавления желаемой прибыли определяется цена на производимую продукцию, то в таргет-костинге, вначале устанавливается с помощью маркетинговых исследований цена, затем определяется лимитная калькуляция, как разница между рыночной ценой и желаемой величиной прибыли (рисунок 4).



Рис. 4. Сравнение традиционного подхода и лимитной калькуляции[14]

Наиболее распространенной системой является система «директ-костинг», которая характеризуется тем, что все переменные производственные затраты относятся к затратам на продукт, а все постоянные производственные затраты рассматриваются как затраты отчетного периода [15]. На необходимость четкого разграничения затрат между постоянными и переменными их частями указывал в 1903 году Г. Гесс [16]. Применение данной системы позволяет оперативно рассчитывать себестоимость по переменным затратам, определять точку безубыточности (объем производства, при котором совокупные затраты равны совокупной выручке от продаж), используемую для оценки риска. [17]. К преимуществам системы «директ – костинг» относятся:

- простота и объективность калькулирования частичной себестоимости, так как отпадает необходимость в условном распределении постоянных затрат;
- возможность акцентировать внимание руководства на изменении маржинального дохода (суммы покрытия) как по предприятию в целом, так и по различным изделиям; выявить изделия с большей рентабельностью, чтобы перейти в основном на их выпуск;
- информация, получаемая в системе «директ – костинг», позволяет проводить эффективную политику цен, указывая наиболее выгодные комбинации цены и объема;

- возможность проведения анализа в условиях ограниченного ресурса, что важно для планирования производства при наличии ограничивающих факторов.

Общие недостатки системы «директ – костинг»:

- трудности в разделении затрат на постоянные и переменные, так как значительная часть смешанных расходов может быть квалифицирована по-разному, например в зависимости от применяемого метода деления затрат на постоянные и переменные, а это будет сказываться на результатах;

- необходимость для большинства предприятий наличия информации о величине полных расходах, прежде всего для определения цены изделия, так как в ценах в долгосрочном плане необходимо обеспечивать покрытие всех расходов предприятия. При отсутствии данных о полной себестоимости велик риск несоблюдения этого условия;

- наличие некоторых трудностей при формировании внешней отчетности.

Поэтому для оперативного расчета себестоимости продукции мы предлагаем использовать данные по структуре затрат на производство Государственного научного центра лесопромышленного комплекса (ГНЦ ЛПК) [18]. В связи с тем, что ставки по страховым фондам во внебюджетные фонды за последние годы изменились и на 2020г. для предприятий, занимающихся переработкой древесины, они составляют 31,4 %, то учитывались корректировки в данное распределение затрат. В таблице 3 представлено скорректированное распределение затрат в структуре себестоимости [20].

Таблица 3 – Распределение затрат в структуре себестоимости с учетом корректировки

<i>Виды продукции</i>	<i>Распределение затрат, %</i>						
	<i>Сырье</i>	<i>Топливо и энергия</i>	<i>Мат-лы</i>	<i>Оплата труда</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды</i>	<i>Амортизация</i>	<i>Прочие затраты</i>
Фанера	35,26	12,48	10,01	17,29	5,4	4,11	15,45
Домостроение	24,1	17,7	9,2	19,6	6,2	6,6	16,6
Пиломатериалы	33,1	11,3	5,4	17,9	5,6	6,3	20,4
Древесностружечные плиты	26,2	16,0	13,2	17,3	5,4	6,3	15,6
Мебель	24,9	9	22,9	16,7	5,2	3,8	17,5

Из таблицы следует, что продукция деревообрабатывающих производств является материалоемкой. Однако удельный вес сырья в себестоимости фанеры и пиломатериалов значительно превышает удельный вес материалов, а при производстве мебели затраты на сырье и материалы приблизительно равны, так как здесь используется большое количество фурнитуры и других вспомогательных материалов. Таким образом, полная себестоимость мебели в 2,1 раза превосходит затраты на сырье и материалы, которые равны 9,1 тыс. руб. Исходя из вышеизложенного, себестоимость изготовления бельевого шкафа по укрупненным расчетам составит 19,11 тыс. руб.

Цена одного изделия при норме прибыли 15% будет равна 21,98 тыс. руб. При реализации 20000 шкафов выручка от реализации составит 439600 тыс. руб. Общая сумма инвестиций по данному проекту с учетом строительных работ равна 89282,95 тыс. руб. Об экономической эффективности данного проекта свидетельствуют срок окупаемости равный 1,8 года и чистая прибыль в первый год реализации проекта в размере 45920 тыс. руб.

Уменьшить себестоимость продукции возможно путем снижения материалоемкости изделия, достигаемого за счет максимального использования стиля «минимализм». В одной из главных тенденций этого стиля, способствующих снижению материалоемкости изделия является множество открытых различных полок и стеллажей (рисунок 5), с комбинацией из стекла. В такой мебели хорошо просматривается её каркас. Другой отличительной особенностью корпусной мебели сейчас является отсутствие её деления на секции отсутствие ручек. По мнению производителей мебели, ручки отвлекают внимание от конструкции и дизайна. Снижению себестоимости продукции будет способствовать создание защитно-декоративного эмалевого покрытия поверхности щитов корпусной мебели. Небольшие декоративные элементы на поверхности фасадов придадут изделию изысканность и элегантность (рисунок 6).



Рис. 5. Мебель без секций в стиле минимализм



Рис. 6. Декоративные элементы на поверхности фасадов

Заключение

1. Затрет на вывоз необработанной древесины позволяет увеличить объемы лесопереработки внутри страны, повысить добавленную стоимость экспорта и повысить налоговые поступления в федеральный бюджет. В связи с чем для обеспечения эффективности лесопереработки ожидается приток инвестиций для приобретения новой техники и/или помещений для обработки круглых лесоматериалов. А это в свою очередь потребует проведения технико-экономического анализа при выборе вида выпускаемой продукции, технологии и оборудования.

2. По существующей методике технологический расчет расхода сырья и материалов для производства изделия производится для каждой детали отдельно. А затем производится суммирование сырья и материалов для производства всех деталей в изделии. При большом количестве деталей в изделии это весьма трудоемко. Трудоемкость значительно возрастает, если планируется выпуск нескольких изделий. Поэтому предложен более простой (укрупненный) метод расчета сырья и материалов для одной детали с усредненными размерами по спецификации деталей и их количества, которая составляется на основе разработанной конструкции изделия.

3. При определении технико-экономической эффективности производства производится расчет себестоимости по следующим основным статьям затрат: сырье, материалы, топливо и энергия, оплата труда, отчисления во внебюджетные фонды, амортизация, производственные и непроизводственные расходы. Предложен экспресс-метод величины себестоимости продукции как увеличение в 2,1 затрат на сырье. При значительном изменении стоимости сырья и материалы данное значение может быть увеличено.

4. Показано на примере практическое применение экспресс-метода расчета себестоимости при составлении при расчете технико-экономических показателей нового мебельного цеха при изготовлении шкафа трех дверного из ЛДСП.

Литература

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-р.
2. Барташевич А.А., Конструирование мебели: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Технология и дизайн мебели»/ А.А. Барташевич, С.П. Трофимов.- Минск: Современная школа, 2006. – 336 с.
3. Барташевич А.А., Конструирование изделий из древесины. Основы композиции и дизайна: учебное пособие по специальности 250403 «Технология и деревообработ.» /А.А. Барташевич, В.И. Онегин. Ростов на Дону: Феникс, 2014. – 188 с.
4. Деревообрабатывающие станки// Stankoff.RU: сетевой журнал 2012. [https:// www.stankoff.ru](https://www.stankoff.ru). – (дата обращения: 05.06.2020).
5. Фрезерные станки// WoodTec: сетевой каталог. 2014. URL: <https://woodtec.com.ru/catalog>. – (дата обращения: 05.06.2020).
6. Оборудование для производства мебели // КАМИ: сетевой журнал 2016. URL: <https://www.stanki.ru>. – (дата обращения: 05.06.2020).
7. Технология изделий из древесины: Методические указания к практическим работам работы для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению 35.03.02 «Технология

лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств»/ составитель Т.И. Глотова; Брянский государственный инженерно-технологический университет. – Брянск, БГИТУ, 2020. – 42 с.

8. Гаррисон Р., Управленческий учет: перевод с английского / Р.Гаррисон, Э.Норин, П. Брюэр. Под ред. М.А. Карлика. – 12 издание – Санкт Петербург: Питер, 2012. – с. 316.

9. Купреева Д.Н., Особенности учета затрат на малых предприятиях мебельной промышленности/ Д.Н.Купреева, Н.П.Малышева // Проблемы и перспективы современной России: мнения нового поколения: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции – Брянск: БГИТУ, 2020. – С. 140-143.

10. Ansari S.L., Target Costing: The next frontier in strategic cost management / S.L. Ansari, J. Bell, J.H. Cypher, P.H. Dears, J.J. Dutton, M.D. Ferguson, K. Hallin, C.A. Marx, C.G. Ross, P.A. Zampino. NY: MacGraw-Hill, 1997.

11. Burrows G., Target costing: first and second comings / G. Burrows, Chanhall R.H. // Accounting History Review. 2012. Vol. 22. №2.

12. Shimizu N. The evolutionary process of management accounting: Target Costing as an example of Japanization / N. Shimizu, L. Lewis // Paper N 44, Osaka City University, 1998 .

13. Talha M., Role of supply chain management in target costing / M. Talha, Raja J.B. // Journal of Modern Accounting and Auditing. 2010. Vol. 6. №7.

14. Замбрицкая Е. С., Современные системы учета затрат и особенности их применения в деревообрабатывающей промышленности/ Е. С.Замбрицкая, Е. Ю. Щепотьева, В. П.Точилкина // Молодой учёный . – 2015. – № 1 (81). – С. 212-217.

15. Хорнгрен Ч.Т., Фостер Дж., Ш. Датар . Управленческий учет/ Ч.Т.Хорнгрен, Дж. Фостер, Ш. Датар. //Перевод с английского – Санкт Петербург: Питер.2005.–1008 с.

16. Hese H. Manufacturing. Capital Costs, Profits and Dividends. / H.Hese //The Ingengering Magazine– vol. 26. № 3.

17. Этрилл П.Э Финансовый менеджмент и управленческий учет для руководителей и бизнесменов / Питер Этрилл, Эдди Маклейни ; Пер. с англ. – 4-е изд. – М. : Альпина Паблишер, 2016. – 648.

18. Мехренцев А.В. Состояние и перспективы деревообрабатывающего производства в Свердловской области [Электронный ресурс]. – <http://pandia.ru/text/77/191/18691.php> /.- Дата обращения 20.07.2020.

19. Лукаш А.А. Техничко-эксплуатационные свойства новых материалов из древесины мягких лиственных пород / А.А. Лукаш, Н.П. Лукутцова // Деревообрабатывающая промышленность. –2018.–№.3 – С. 17–22.

20. Лукаш А.А. Эксплуатационные свойства новых видов продукции из древесины мягких лиственных пород при оценке технико-экономических показателей / А.А. Лукаш, Н.П. Лукутцова, Н.П. Малышева, О.Н. Чернышев // Деревообрабатывающая промышленность.– 2021.– №.3 – С. 25-30.

© **Лукаш А.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии деревообработки, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (ФГБОУ ВО «БГИТУ»), e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; **Глотова Т.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии деревообработки ФГБОУ ВО «БГИТУ», e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru; **Малышева Н.П.** – канд. эконом. наук, доцент кафедры экономики, оценки бизнеса и бухгалтерского учета ФГБОУ ВО «БГИТУ», e-mail: m_nadejda32@mail.ru; **Путрова Н.С.** – магистрант кафедры экономики, оценки бизнеса и бухгалтерского учета ФГБОУ ВО «БГИТУ», e-mail: nadezhda.putrova@yandex.ru; **Чернышев О.Н.** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой механической обработки древесины и производственной безопасности, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: olegch62@mail.ru.

UDC 674.2

THE EXPRESS METHOD OF DETERMINING THE COST OF PRODUCTION IN THE CALCULATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF WOODWORKING SHOPS

A.A. Lukash, T.I. Glotova, N. P. Malysheva, N.S. Putrova, O. N.Chernyshev

The article proposes a new method for assessing the strength of adhesive joints at normal separation of the layer, which can be used in the development of new adhesive compositions. The applied modifying additives of various types allow to improve the technological and operational properties of adhesives used in gluing wood. Therefore, the improvement of the technology of glued materials is based on the development of new types of adhesives and adhesive compositions. In the course of research to establish the type and composition of modifying additives, a large number of experiments are carried out related to the establishment of the effect of the adhesive composition on the bonding strength. Currently, in most cases, adhesion is evaluated by an indirect criterion - the wetting edge angle, which is unstable in time due to the absorption of spreading and the absorption of glue by wood. The standard method for determining the strength when chipping along the adhesive layer is quite time-consuming, because it includes operations for sawing out bars, planing into size, subsequent gluing of bars, re-machining of glued bars after complete curing of the glue to give the samples the required size and shape. Which is laborious enough. In order to reduce the complexity of conducting research on the development of new adhesive compositions, a new method for determining the strength of the adhesive joint at normal separation has been developed. The strength of the adhesive according to the proposed method is estimated by the maximum load required for normal separation of the layer. The devices (grips) used are easy to manufacture and reliable during operation. The new proposed method for determining the bonding strength is less time-consuming than the standard method, because repeated machining of glued bars is not required, and the samples after curing the glue have the required dimensions and shape and are ready for testing. An example of the implementation of the proposed new method for assessing the strength of bonding at normal separation for the establishment of a new composition of glue (mastic) in the manufacture of a baguette for art frames is given.

Keywords: strength for normal separation, bonding, wood, method, modifying additives.

References

1. Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030: approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated September 20, 2018 No. 1989-R.
2. Bartashevich A.A., Furniture design: textbook for university students studying in the specialty "Technology and furniture design" / A.A. Bartashevich, S.P. Trofimov. - Minsk: Modern School, 2006. - 336 p.
3. Bartashevich A.A., Construction of wood products. Fundamentals of composition and design: textbook on specialty 250403 "Technology and woodworking" / A.A. Bartashevich, V.I. Onegin. Rostov on Don: Phoenix, 2014 - 188 p.
4. Woodworking machines // Stankoff.EN: network magazine 2012. [https:// www.stankoff.ru](https://www.stankoff.ru) . - (accessed: 06/05/2020).
5. Milling machines machines // WoodTec: online catalog. 2014. URL: <https://woodtec.com.ru/catalog> . - (accessed: 05.06.2020).
6. Hardware for furniture // CAMI: an online journal 2016. URL: <https://www.stanki.ru>. (date of application: 05.06.2020).
7. Technology of wood products: Methodical instructions for practical work for students enrolled in programs of higher education in the direction 35.03.02 "Technology logging and wood processing industries" / compiled by T. I. Glotova; Bryansk state engineering-technological University. - Bryansk, BGITU, 2020. - 42 p.
8. Garrison R., Managerial accounting: translated from English / R.Garrison, E.Norin, P. Brewer. Edited by M.A. Dwarf. - The 12th edition of the St. Petersburg: Piter, 2012. - p. 316.
9. Kupreeva D. N., Features of cost accounting in small enterprises of the furniture industry / D. N. Kupreeva, N. P. Malysheva // Problems and prospects of modern Russia: what the new generation: a collection of articles of the all-Russian scientific and practical conference - Bryansk: BGITU, 2020. - P. 140-143.
10. Ansari S.L., Target Costing: The next frontier in strategic cost management / S.L. Ansari, J. Bell, J.H. Cypher, P.H. Dears, J.J. Dutton, M.D. Ferguson, K. Hallin, C.A. Marx, C.G. Ross, P.A. Zampino. NY: MacGraw-Hill, 1997.
11. Burrows G., Target costing: first and second comings / G. Burrows, Chanhall R.H. // Accounting History Review. 2012. Vol. 22. № 2.
12. Shimizu N. The evolutionary process of management accounting: Target Costing as an example of Japanization / N. Shimizu, L. Lewis // Paper N 44, Osaka City University, 1998 .
13. Talha M., Role of supply chain management in target costing / M. Talha, Raja J.B. // Journal of Modern Accounting and Auditing. 2010. Vol. 6. No.7.

14. Zambrzhitskaya E. S., Modern cost accounting systems and features of their application in the woodworking industry/ E. S.Zambrzhitskaya, E. Y. Shchepotyeva, V. P.Tochilkina // Young Scientist. – 2015. – № 1 (81). – Pp. 212-217.
15. Horngren Ch.T., Foster J., Sh. Datar. Managerial accounting/ C.T.Horngren, J. Foster, S. Datar. //Translated from English - St. Petersburg: St. Petersburg.2005.-1008 p.
16. Hese H. Manufacturing. Capital Costs, Profits and Dividends. / H.Hese //The Ingengering Magazine– vol. 26. № 3.
17. Etrill P.E. Financial management and management accounting for managers and businessmen / Peter Etrill, Eddie McLainey; Translated from English - 4th ed. - Moscow : Alpina Publisher, 2016. - 648.
18. Mehrentsev A.V. The state and prospects of woodworking production in the Sverdlovsk region [Electronic resource]. – <http://pandia.ru/text/77/191/18691.php> /.- Date of application 20.07.2020.
19. Lukash A.A. Technical and operational properties of new materials from soft hardwood / A.A. Lukash, N.P. Lukutsova // Woodworking industry. –2018.–№.3 - pp. 17-22.
20. Lukash A.A. Operational properties of new types of soft hardwood products in the assessment of technical and economic indicators / A.A. Lukash, N.P. Lukutsova, N.P. Malysheva, O.N. Chernyshev // Woodworking industry. - 2021.- №.3 - pp. 25-30.

©**Lukash A.A.** – Grand PhD of Technical Sciences, Professor of the Department of woodworking technology, Bryansk State University of Engineering and Technology (BSUET), e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; **Glotova T.I.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of woodworking technology BSUET, e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru; **Malysheva N.P.** – PhD of Economic Sciences, associate Professor of the Department of Economics, Business Valuation and Accounting, BSUET, e-mail: m_nadejda32@mail.ru; **Putrova N. S.** – Master's student of the Department of Economics, Business Valuation and Accounting, BSUET e-mail: nadezhda.putrova@yandex.ru; **Chernyshev O.N.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Wood Processing and Industrial Safety, Ural State Forestry University, e-mail: olegch62@mail.ru.

УДК 57.043

ПОЛУЧЕНИЕ БЕТУЛИНА ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

Е.Ю. Разумов, Е.И. Байгильдеева, А.В. Сафина, Р.Г. Сафин

Рассмотрены свойства бетулина – многокомпонентного соединения, входящего в состав верхнего слоя коры березы. Представлены характеристики бетулина, являющегося биологически активным веществом и обладающего широким спектром лечебных и профилактических свойств, что позволяет применять его в качестве сырья в фармацевтической, парфюмерно-косметической и пищевой промышленности, а также в животноводстве и ветеринарии. Указаны состав и свойства бетулина, а также области его применения в различных отраслях промышленности. Проанализированы способы извлечения бетулина из бересты и проблемы, связанные с их реализацией. Исследована биологическая активность и состав гексанового экстракта коры березы, получаемого при помощи замкнутого экстракционного технологического комплекса. При использовании хромато-масс-спектрометрии установлено, что основным компонентом экстракта березовой корки является бетулин. Путем лабораторных исследований установлено, что полученный бетулин обладает высокой степенью очистки и может применяться в пищевых и лечебных целях.

Ключевые слова: бетулин, береста, кора березы, биологически активная добавка, экстрагирование бетулина.

Введение

Береза является источником ценного сырья для различных отраслей промышленности. В частности, значительной ценностью обладает кора березы. Внутренний слой коры, занимающий ее большую часть, называется лубом. В состав луба входят таниды (полифенолы) и другие фенольные компоненты, являющиеся основой дубильных экстрактов. В верхнем слое коры, который называется берестой или коркой, находятся ценные биологически активные вещества, одним из которых является бетулин [1].

По внешнему виду бетулин представляет собой кристаллический порошок белого цвета. Он устойчив к воздействию кислорода и солнечной радиации, не токсичен, не растворим в воде, но хорошо растворим в органических растворителях. Инертные свойства молекулы обеспечивают длительные сроки хранения вещества без изменения его свойств. Вещество заполняет полости клеток бересты и определяет белый цвет березовой коры [2].

Содержание бетулина в бересте составляет от 10 до 44 % в зависимости от вида березы, ее возраста, места и условий произрастания, состояния дерева, сроков сбора и погодных условий. Бетулин является пентациклическим тритерпеновым спиртом ряда лупана с химической формулой $C_{30}H_{50}O_2$ и химическим названием – бетуленол. Он синтезируется клетками растения и в его внешней оболочке выполняет функции защиты от неблагоприятных факторов внешней среды, в частности, защищает древесину от грибкового и бактериального поражений, от воздействия солнечной радиации. В составе бетулина обнаруживают тритерпеновый спирт, лупеол, лупенол, бетулиновую кислоту, бетулон, бетулоновый альдегид и другие соединения [3].

Российский химик Т.Е. Ловиц в 1788 г. путем сублимации выделил из бересты данное соединение и сделал описание его химических и лечебных свойств, что позволило применять его для лечения ожогов и небольших ран. В 1831 году соединение получило название «бетулин». Так как в настоящее время во всем мире наблюдается интерес к изучению свойств природных соединений, обладающих биологической активностью, а также к усовершенствованию технологий извлечения данных биологически активных веществ, то и в России, и за рубежом проводятся исследования характеристик бетулина и способов его экстрагирования [4].

Бетулин является многокомпонентным веществом, источником натуральных биофлавоноидов. Биологическая активность бетулина обуславливает широкую область его применения. Бетулин регулирует активность ферментов, влияет на синтез и функционирование клеток. В связи с этим он используется в производстве фармацевтических препаратов. Их действие на организм человека обусловлено тем, что бетулин проявляет антиоксидантное, антисептическое, противовоспалительное, противовирусное, гепатопротекторное, гастропротекторное, антигрибковое, онкопротекторное, регенерирующее, иммуномоделирующее и другие свойства [3]. Экстракт бетулина можно эффективно применять при таких состояниях, как острые и хронические поражения печени, гепатит, цирроз, холецистит и желчнокаменная болезнь, при химио- и лучевой терапии онкологических заболеваний, а также их профилактике, при ожогах и травмах, туберкулезе, ишемической болезни сердца и дыхательной недостаточности, при необходимости повышения защитных сил организма из-за снижения иммунитета, при высоких физических и умственных нагрузках, метеозависимости, при необходимости улучшить эластичность сосудов и кровообращение и т.д.

Препараты бетулина, обладающие иммуностимулирующим, бактерицидным и виروцидным свойствами, применяются в животноводческих и птицеводческих хозяйствах для лечения и профилактики инфекционных болезней крупного рогатого скота, свиней и птиц [5]. Бетулин применяется в парфюмерно-косметической промышленности для создания противовоспалительных и увлажняющих средств, защитных кремов от солнечной радиации, шампуней и др. Бетулин находит свое применение в пищевой промышленности в качестве сырья для производства биологически активных добавок и для обогащения продуктов питания (в т.ч., молочнокислых продуктов, хлеба и кондитерских изделий). Вводимый в пищевые продукты экстракт бетулина обеспечивает не только функциональные свойства, но и решает технологическую задачу продления срока годности продукции за счет наличия у него антиоксидантного и консервирующего свойств [6].

Основными стадиями производства бетулина являются измельчение коры, отделение мелкой фракции (луба), экстракция бересты, фильтрование и частичное (полное) выпаривание экстракта, разбавление упаренного экстракта водой, отделение твердой фазы (бетулинового концентрата), сушка продукта при температуре 60°C и упаковка [1]. Существующие способы извлечения бетулина из бересты часто характеризуются небольшим выходом целевого продукта и его низким качеством (чистотой), многостадийностью процессов выделения и очистки, их продолжительностью, необходимостью применения легковоспламеняемых и токсичных реагентов [2, 7, 8,].

Применяемые способы извлечения бетулина можно объединить в две группы. Первая группа будет включать способы, основанные на обработке бересты растворителями с целью получения из экстрактов бетулина. Вторая группа объединит способы, предполагающие щелочной гидролиз внешнего слоя березовой коры и последующую экстракцию спиртом [9]. Максимальный выход бетулина наблюдается

при этом в условиях щелочного гидролиза частиц бересты с размерами 1 – 3 мм, который осуществляется при концентрации щелочи 20 – 25 % и продолжительности гидролиза до 6 – 8 ч [8, 10].

В литературных источниках представлены описания различных методик получения бетулина. Так Pasich J. [11] изучал выделение экстрактивных веществ бересты в аппарате Сокслета. При этом он пришел к выводу, что наибольший выход возможен за счет применения трихлорэтилена (44 %), если сравнивать данный результат с результатами применения хлороформа, диэтилового эфира и бензола (22, 25, 28 % соответственно).

Jaasketainen P. [12] исследовал глубину извлечения экстрактивных веществ бересты различными растворителями, а также изучал кинетику данного процесса. Он выявил зависимость увеличения глубины и скорости экстракции от повышения «полярности» растворителя. Eckerman Ch. и Ekman R. [13] при исследовании процессов получения бетулина установили, что скорость и полнота экстракции также зависят от величины частиц бересты.

Huneck S. [14] в ходе своих исследований экстрагировал бересту в процессе нагревания бензолом, а выделенный при охлаждении экстракт бетулин отфильтровывался и высушивался. Kapil R.S. [15] предлагал многоступенчатую экстракцию измельченной коры березы сначала петролейным эфиром, затем четыреххлористым углеродом и хлороформом в завершении процесса. Pasich J. [11] исследовал поэтапный процесс получения бетулина из бересты, основанный на экстракции с применением трихлорэтилена, прямом ацелировании экстракта и гидролизе диацетата бетулина. Предложено измельчение березовой коры в присутствии щелочи и изопропилового спирта при температуре до 70 °C [1]. С. А. Кузнецова и др. [16] проводили экстракцию водно-этанольными растворами гидроксида натрия и гидроксида калия с концентрацией щелочи от 10 до 25 %. При этом были выделены продукты, содержащие бетулин, выход которых приближался к 40 %. Содержание бетулина в данных продуктах составляло 74 – 75 % и 85 – 89 % соответственно.

В. В. Жук с соавторами [17] исследовал метод тонкопленочной парофазной экстракции бересты. В результате было установлено влияние природы легкокипящего компонента экстрагента на состав, степень экстракции и форму получаемых экстрактов. Указывалось, что интенсификация процесса экстракции определяется осуществлением процесса в тонком слое при орошении березовой коры конденсатом экстрагента, а также за счет повышенного градиента концентраций экстрактивных веществ в системе экстрагент – береста. А. Рае в соавторстве [18] предлагал способ, обеспеченный аппаратным оформлением, который предусматривал получения экстрактов кристаллического бетулина из гранулированной бересты с размером фракции от 0,4 до 2,0 мм путем экстрагирования петролейным эфиром при температуре кипения. Экстракция осуществлялась в проточном реакторе в режиме интенсивной массопередачи в потоке перегнанного растворителя. Выход в виде очищенных кристаллов бетулина составил 40 – 50 % от общего количества экстрактивных веществ с общей концентрацией бетулина/лупеола 90 – 93 % от общей массы абсолютно сухих кристаллов.

Проводимые исследования призваны обеспечить разработку методов получения бетулина в требуемых количествах, а также простых способов его очистки от сопутствующих примесей. Для выделения бетулина из березовой коры в основном используют экстракционные методы [7]. В качестве экстрагентов применяют различные полярные и неполярные органические растворители. Однако растворимость бетулина в них весьма ограничена (в среднем составляет около 10 г/л). Другим недостатком экстракционных методов является то, что вместе с бетулином из коры извлекаются другие экстрактивные вещества. Поэтому для очистки бетулина требуется многократная перекристаллизация, что снижает его выход. Некоторые используемые растворители токсичны, опасны для окружающей среды, и необходимость их утилизации повышает стоимость получаемого бетулина. Несмотря на постоянное усовершенствование способов извлечения бетулина из бересты, процесс его получения остается технически непростым [19-21].

Анализ различных методов экстрагирования бетулина показывает, что на выход экстракта, содержащего данное биологически активное вещество, оказывает влияние природа растворителя. Так, бетулин легко и почти полностью экстрагируется из бересты такими доступными экстрагентами, как алифатические углеводороды, спирты $C_1 - C_4$, ацетон [7].

Проводились исследования по повышению степени экстрагирования бетулина (на 25 – 40 %) за счет проведения предварительной обработки коры водяным паром. Установлен факт значительного (до 1,5 – 2,0 раз) возрастания выхода экстрактивных веществ, извлекаемых гексаном, этилацетатом,

изопропанолом и водой из коры березы, активированной перегретым водяным паром в условиях «взрывного» автогидролиза [2].

Недостатком применения спиртовых и водно-спиртовых растворов является загрязнение бетулина лигнинными веществами, которые экстрагируются совместно с бетулином. Также гидролиз измельченной бересты протекает в достаточно жестких условиях. Полученный с использованием указанных выше растворителей бетулин может применяться в производстве парфюмерно-косметических составов, однако для фармакологических целей необходимо использовать бетулин более высокой степени чистоты – около 99 % [4].

Учитывая комплекс ценных свойств бетулина, представляется рациональным дальнейшее продолжение исследований в области усовершенствования способов его экстрагирования с обеспечением максимально высокой степени очистки конечного продукта. Применение бетулина в таких областях, как фармацевтика и пищевая промышленность требует соответствия данного продукта высоким требованиям к его качеству.

Методы и материалы

В качестве исходного сырья использовали бересту березы пушистой, заготовленную в начале сентября в пригороде Екатеринбурга. Получение экстракта бересты осуществлялось в замкнутом экстракционном технологическом комплексе (рис.1), содержащем экстрактор проточного типа 1, выдувной резервуар 2, куб-испаритель 3, первый 18 и второй 4 рекуперативные теплообменники, первый 6 и второй 5 конденсаторы смешения, вакуумную сушилку 7, верхний 8 и нижний 19 шнековые транспортеры, загрузочную воронку 9, датчик давления 10, инжекторный насос 11, вакуумный насос 12, жидкостные насосы 14, 15, компрессорную холодильную установку 13, флорентинное устройство 16, буферную емкость 17, десорбер 20.

В технологическом комплексе применялась верхняя часть березовой коры с характерным белым цветом, измельченная до фракции 1 – 2 мм. Осуществлялось ее экстрагирование гексаном в экстракторе проточного типа 1, что сопровождалось непрерывным противоточным движением растворителя и бересты. При достижении в экстракторе давления заданной величины, осуществлялся его сброс до атмосферного значения и отбор экстракта в выдувной резервуар 2, где производилось испарение растворителя. Из выдувного резервуара экстракт непрерывно направлялся в куб-испаритель 3. Затем пересыщенный экстракт направлялся в вакуумную сушилку 7, из которой отбирался полученный в результате процесса сушки кристаллизованный бетулин.

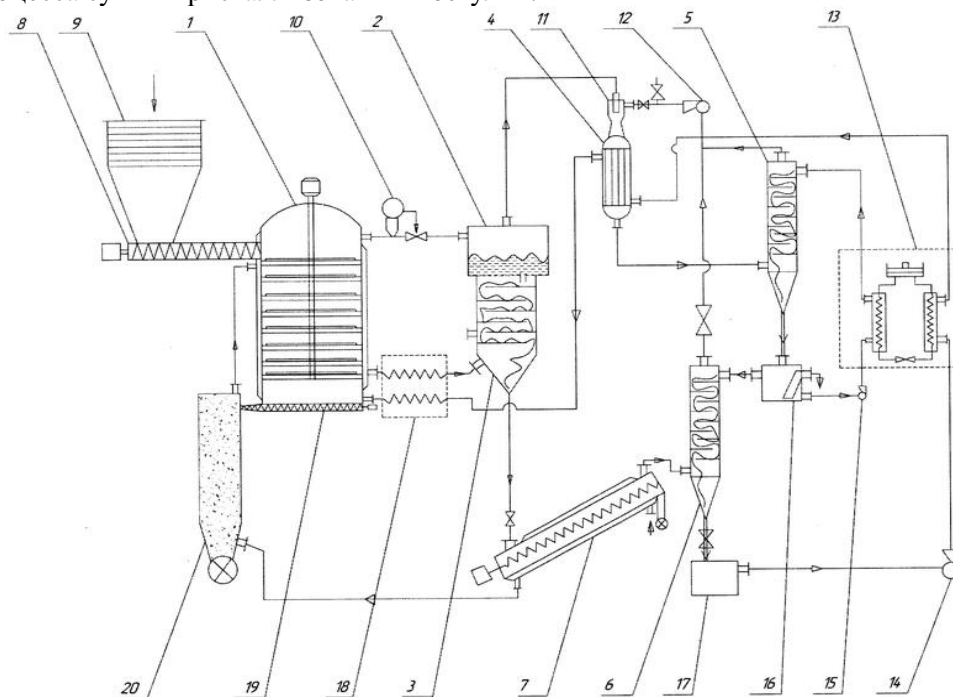


Рис. 1. Замкнутый экстракционный технологический комплекс

Был проведен анализ полученного экстракта методом хромато-масс-спектрометрии (ХМС). Качественный и количественный анализ продуктов исследовался на хромато-масс-спектрометре Agilent Technologies 6890N/5975B. Была использована колонка длиной 30 м, с внутренним диаметром 0,25 мм HP-5ms. Условия хроматографирования: в качестве газа -носителя использовался гелий, скорость потока составила 1 мл/мин, ионизация электронным ударом при 70 эВ. Термостат колонки: начальная температура 150 °С, скорость 50 °С/мин, конечная температура 300 °С. Испаритель: начальная температура 300 °С, деление потока 19:1, объем ввода 0,20 μ l.

Результаты

Изучен состав полученного гексанового экстракта бересты. При использовании хромато-масс-спектрометрии определено содержание таких компонентов экстракта, как бетулин и альдегид бетулина (рис.2).

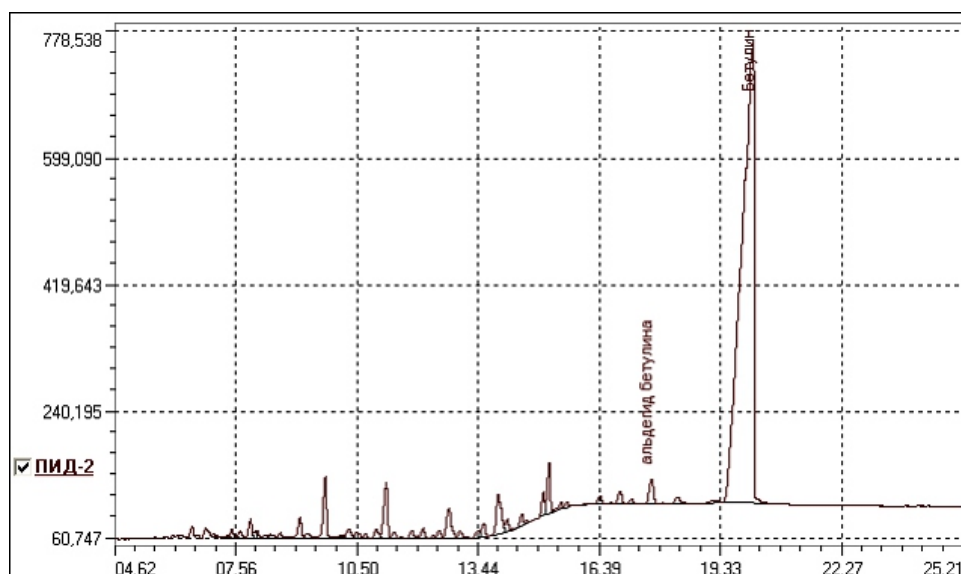


Рис. 2. Хроматограмма гексанового экстракта бересты

Идентификация компонентов осуществлена сопоставлением времен удерживания пиков на хроматограмме и полных масс-спектров отдельных компонентов с соответствующими данными соединений библиотеки масс-спектров. Произведен расчет концентрации идентифицированных компонентов экстракта (табл.1).

Таблица 1 – Концентрация компонентов экстракта бересты

№ п/п	Компонент	Концентрация, % об.
1	Альдегид бетулина	0,12961
2	Бетулин	97,53809

В процессе экстракции березовой коры совместно с бетулином был выделен в качестве его окисленной производной бетулиновый альдегид. Установлено, что производные бетулина, в частности альдегид, так же характеризуются противовирусной активностью. В результате проведенных исследований установлено, что применение предложенного замкнутого экстракционного технологического комплекса позволяет получать бетулин с высокой степенью концентрации, которая обеспечивает возможность его использования в производстве пищевой и фармацевтической продукции.

Заключение

Березовая кора является источником для получения комплекса уникальных соединений, одним из которых является бетулин. Экстракт бетулина обладает спектром свойств, позволяющих применять его в медицине, производстве продуктов питания и химических товаров, при лечении домашних животных и птицы. Наиболее широко свойства данного биологически активного вещества используются при производстве фармацевтических препаратов, которые применяются как для профилактики, так и лечения самых тяжелых заболеваний, включая онкологию, синдром иммунодефицита, болезнях сердца и легких,

при поражении различных органов и систем человеческого организма, для поддержания иммунитета человека в целом. Важнейшей характеристикой бетулина, как компонента фармпрепаратов, является отсутствие токсичности и побочных эффектов при применении.

Важнейшей задачей при извлечении бетулина из березовой коры является применение таких методик, которые позволяют получить его максимальный выход из экстракта и максимальную степень очистки от сопутствующих примесей. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что бетулин, получаемый с применением замкнутого экстракционного технологического комплекса, имеет высокую степень чистоты, составляющую порядка 97,5 %. Результаты исследования позволяют говорить о том, что предложенный технологический комплекс обеспечивает выход бетулина такого качества, которое предполагает возможность его применения в производстве биологически активных добавок и лекарственных препаратов.

Литература

1. Бадогина А.И. Переработка луба березовой коры с получением биологически активных продуктов: дисс. ... канд. техн. наук. – Архангельск, 2018. – 125 с.
2. Кузнецов Б.Н., Левданский В.А., Еськин А.П., Полежаева Н.И. Выделение бетулина и суберина из коры березы, активированной в условиях взрывного автогидролиза // Химия растительного сырья. – 1998. – №1. – С.5-9.
3. Белякова А.Ю., Погребняк А.В., Погребняк Л.В. Физико-химические и биологические свойства компонентов внешней коры березы // Современные проблемы науки и образования: электрон. научн. журн. – 2015. – № 2.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22657> (дата обращения: 10.02.2022).
4. Якубовский С.Ф., Линник В.Н. Влияние природы растворителя на выход экстрактов, содержащих бетулин // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. – 2016. – №11. – С. 108-114.
5. Красиков А.П., Плешакова В.И., Новицкий А.А., Трофимов И.Г., Алексеева И.Г., Лещёва Н.А. Применение растительного препарата бетулин в животноводстве // Общая биология. Серия: Естественные и технические науки: электрон. научн. журн. – 2017. – №12/2.; URL: <http://www.nauteh-journal.ru/files/a067dfcc-6a54-4f23-8295-1e4aa34f5a84> (дата обращения: 10.02.2022).
6. Исаева А.Ю., Гребенщиков А.В. Использование бетулина в технологии пищевых продуктов // Успехи современного естествознания: электрон. научн. журн. – 2012. – № 6.; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30477> (дата обращения: 10.02.2022).
7. Кислицын А. Н. Экстрактивные вещества бересты: выделение, состав, свойства, применение: обзор // Химия древесины. – 1994. – №3. – С. 3-28.
8. Кузнецов Б.Н., Левданский В.А., Полежаева Н.И. Экстракция бетулина низшими алифатическими спиртами из внешней коры березы *Betula pendula* Roth., активированной перегретым паром в присутствии щелочи // Химия растительного сырья. – 2004. – №2. – С. 21- 24.
9. Винокурова Р. И., Трошкова И. Ю. Изменчивость накопления бетулина и суберина в бересте *Betula pendula* Roth. в зависимости от географической зональности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2008. – №3. – С. 126-130.
10. Кузнецов Б.Н., Кузнецова С.А., Левданский В.А., Судакова И.Г., Веселова О.Ф. Совершенствование методов выделения, изучения состава и свойств экстрактов березовой коры // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – №3. – С. 391-400.
11. Pasich J., Pojda M. Naturalne i polsyntetyczne tenzydy. Cz. VII. Prosty sposob otrzymywania betuliny // Farmac pol. – 1974. – Vol. 30. – №8. – P. 771-772.
12. Jaasketainen P. Betulinol and its utilization // Paperi ja Puu – Pap. och Tra. – 1981. – № 10. – P. 599-603.
13. Eckerman Ch., Ekman R. Comparison of solvents for extraction and crystallisation of betulinol from birch bark waste // Paperi ja Puu – Pap. och Tra. – 1985. – № 3. – P. 100-106.
14. Huneck, S. Die Darstellung von 19 β ,28-Epoxy-3-oxo-2-diazo-18 α H-oleanan und dessen photochemische Umwandlung in A-Nor-Verbindungen // Chem. Ber. – 1965. – Vol. 98. – №6. – P.1837-1857.
15. Kapil R.S., Dhaz M. M. Chemical constituents of *Diospyros montana* Roxb. Part I. Isolation of diospyrin, a new binaphthyl derivative // J. Scient. and Industr. Res. – 1961. – Vol. 20. – №10. – P. 498-500.
16. Кузнецова С. А., Скворцова Г. П., Мальяр Ю. Н., Скурыдина Е. С., Веселова О. Ф. Выделение бетулина из бересты березы и изучение его физико-химических и фармакологических свойств // Химия растительного сырья. – 2013. – №2. – С. 93-100.

17. Жук В. В., Яговкие А.Ю., Бакибаев А.А., Яновский В.А., Медведев Д.М. Исследование влияния природы экстрагентов в процессе тонкопленочной парофазной экстракции на состав, степень извлечения и форму получаемых продуктов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – №3. – С. 99-101.

18. Paze A. [et al.] Apparatus and Selective Solvents for Extraction of Triterpenes from Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Outer Barc // Baltic Forestry – 2014. – Vol. 20. – №1 (38). – P. 88-97.

19. Кузнецов Б.Н., Левданский В.А., Кузнецова С.А., Когай Т.И. Синтез биологически активных тритерпеновых соединений на основе бетулина // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2011. – №4. – С. 408-423.

20. Толстиков Г.А., Флехтер О.Б., Шульц Э.Э., Балтина Л.А., Толстиков А.Г. Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность// Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – №13. – С. 1-30.

21. Когай Т.И. Улучшенный двухстадийный метод получения бетулиновой кислоты из бетулина // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2008. – №1. – С. 95-98.

©Разумов Е.Ю. – д-р техн. наук, профессор Чешского государственного университета естественных наук в Праге, e-mail: evgeny.razumov2011@yandex.ru; Байгильдеева Е.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: bai48@rambler.ru; Сафина А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: alb_saf@mail.ru; Сафин Р.Г. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: safin@kstu.ru.

UDC 57.043

OBTAINING HIGH-PURITY BETULIN

E.Y. Razumov, E.I. Baigildeeva, A.V. Safina, R.G. Safin

The properties of betulin, a multicomponent compound that is part of the upper layer of birch bark, are considered. The characteristics of betulin, which is a biologically active substance and has a wide range of therapeutic and preventive properties, which makes it possible to use it as a raw material in the pharmaceutical, perfumery, cosmetics and food industries, as well as in animal husbandry and veterinary medicine, are presented. The composition and properties of betulin, as well as the areas of its application in various industries are indicated. The methods of extraction of betulin from birch bark and the problems associated with their implementation are analyzed. The biological activity and composition of hexane extract of birch bark obtained by means of a closed extraction technological complex have been investigated. When using chromatography-mass spectrometry, it was found that the main component of birch bark extract is betulin. Laboratory studies have established that the resulting betulin has a high degree of purification and can be used for food and medicinal purposes.

Key words: betulin, birch bark, birch bark, biologically active additive, betulin extraction.

References

1. Badogina A.I. Processing of birch bark bast to obtain biologically active products: diss. ... candidate of Technical Sciences. - Arkhangelsk, 2018. - 125 p. (In Russ.).
2. Kuznetsov B.N., Levdansky V.A., Eskin A.P., Polezhaeva N.I. [Isolation of betulin and suberin from birch bark activated under conditions of explosive autohydrolysis] Khimiya rastitelnogo syrya [Chemistry of plant raw materials] - 1998. - No. 1. - P. 5-9. (In Russ.).
3. Belyakova A.Yu., Pogrebnyak A.V., Pogrebnyak L.V. [Physico-chemical and biological properties of components of the outer bark of birch] Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education: electron. scientific. journal] - 2015. - No. 2.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22657>. (In Russ.).
4. Yakubovsky S.F., Linnik V.N. [Influence of solvent nature on the yield of extracts containing betulin] Vestnik polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria V [Bulletin of the Polotsk State University. Series B] - 2016. - No. 11. - P. 108-114. (In Russ.).

5. Krasikov A.P., Pleshakova V.I., Novitsky A.A., Trofimov I.G., Alekseeva I.G., Leshcheva N.A. [Application of the herbal preparation betulin in animal husbandry] *Obshchaia biologiya. Seria: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [General Biology. Series: Natural and Technical Sciences: electron. scientific. journal] - 2017. - No.12/2.; URL: <http://www.nauteh-journal.ru/files/a067dfcc-6a54-4f23-8295-1e4aa34f5a84>. (In Russ.).
6. Isaeva A.Yu., Grebenshchikov A.V. [The use of betulin in food technology] *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science: electron. scientific. journal] - 2012. - No. 6.; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30477>. (In Russ.).
7. Kislitsyn A. N. [Extractive substances of birch bark: isolation, composition, properties, application: review] *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood] - 1994. - No. 3. - P. 3-28. (In Russ.).
8. Kuznetsov B.N., Levitskiy V.A., Polezhaeva N.I. [Betulin extraction by lower aliphatic alcohols from the outer bark of birch *Betula pendula* Roth. activated by superheated steam in the presence of alkali] *Khimiya rastitel'nogo syrya* [Chemistry of vegetable raw materials] - 2004. - No. 2. - P. 21-24. (In Russ.).
9. Vinokurova R. I., Troshkova I. Y. [Variability of betulin and suberin accumulation in birch bark *Betula pendula* Roth. depending on the geographical zoning] *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest Journal] - 2008. - No. 3. - P. 126-130. (In Russ.).
10. Kuznetsov B.N., Kuznetsova S.A., Levitskiy V.A., Sudakova I.G., Veselova O.F. [Improving methods of isolation, studying the composition and properties of birch bark extracts] *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry in the interests of sustainable development] - 2005. - No. 3. - P. 391-400. (In Russ.).
11. Pasich J., Pojda M. Naturaline i polysintetyczne tenzydy. Cz. VII. Prosty sposob otrzymywania betuliny // *Farmac. pol.* - 1974. - Vol. 30. - №8. - P. 771-772.
12. Jaaskelainen P. Betulinol and its utilization // *Paperi ja Puu – Pap. och Tra.* - 1981. - № 10. - P. 599-603.
13. Eckerman Ch., Ekman R. Comparison of solvents for extraction and crystallisation of betulinol from birch bark waste // *Paperi ja Puu – Pap. och Tra.* - 1985. - № 3. - P. 100-106.
14. Huneck, S. Die Darstellung von 19 β ,28-Epoxy-3-oxo-2-diazo-18 α H-oleanan und dessen photochemische Umwandlung in A-Nor-Verbindungen // *Chem. Ber.* - 1965. - Vol. 98. - №6. - P.1837-1857.
15. Kapil R.S., Dhaz M. M. Chemical constituents of *Diospyros montana* Roxb. Part I. Isolation of diospyrin, a new binaphthyl derivative // *J. Scient. and Industr. Res.* - 1961. - Vol. 20. - №10. - P. 498-500.
16. Kuznetsova S. A., Skvortsova G. P., Malyar Yu. N., Skurydina E. S., Veselova O. F. [Isolation of betulin from birch bark and study of its physico-chemical and pharmacological properties] *Khimiya rastitel'nogo syrya* [Chemistry of plant raw materials] - 2013. - No. 2. - P. 93-100. (In Russ.).
17. Zhuk V. V., Yagovkiye A.Yu., Bakibaev A.A., Yanovskiy V.A., Medvedev D.M. [Investigation of the influence of the nature of extractants in the process of thin-film vapor-phase extraction on the composition, degree of extraction and shape of the products obtained] *Izvestia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya Tomsk Polytechnic University] - 2007. - Vol. 311. - No. 3. - P. 99-101. (In Russ.).
18. Paze A. [et al.] Apparatus and Selective Solvents for Extraction of Triterpenes from Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Outer Bark // *Baltic Forestry* - 2014. - Vol. 20. - №1 (38). - P. 88-97.
19. Kuznetsov B.N., Levitskiy V.A., Kuznetsova S.A., Kogai T.I. [Synthesis of biologically active triterpene compounds based on betulin] *Zhurnal Sibirskogo phederal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry] - 2011. - No. 4. - P. 408-423. (In Russ.).
20. Tolstikov G.A., Flechter O.B., Schultz E.E., Baltina L.A., Tolstikov A.G. [Betulin and its derivatives. Chemistry and biological activity] *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya* [Chemistry in the interests of sustainable development] - 2005. - No. 13. - P. 1-30. (In Russ.).
21. Kogai T.I. [Improved two-stage method for obtaining betulinic acid from betulin] *Zhurnal Sibirskogo phederal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry] - 2008. - No. 1. - pp. 95-98. (In Russ.).

© **Razumov E.Yu.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of Czech University of Life Sciences Prague, e-mail: evgeny.razumov2011@yandex.ru; **Baigildeeva E.I.** – Ph.D in Engineering sciences, Associate Professor of the Department Processing of wood materials, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: bai48@rambler.ru; **Safina A. V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: alb_saf@mail.ru; **Safin R.G.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: safin@kstu.ru.

УДК 674.8:674.049.2:542.973

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ, ГИДРОЛИЗОВАННОЙ В ПРИСУТСТВИИ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Ю.Г. Скурыдин, Е.М. Скурыдина, А.Р. Хабибуллина, Е.И. Байгильдеева

Исследованы физико-механические характеристики плитных композиционных материалов, полученных из древесины березы после ее обработки методом взрывного автогидролиза в присутствии катализатора. В качестве катализатора гидролиза использована перекись водорода, взятая в количестве от 0,165 до 33% к массе исходной древесины. В водном растворе катализатора осуществлялось предварительное замачивание древесной щепы перед баротермической обработкой. Композиционные материалы изготавливались из гидролизованной древесной массы методом горячего прессования без добавления связующих веществ.

Получены зависимости плотности, прочности на изгиб, водопоглощения и разбухания образцов композиционных материалов от количества использованного катализатора. Обнаружено, что применение пероксида водорода на предварительной стадии гидролиза способствует значительным изменениям в структуре древесной массы и оказывает влияние на физико-механические свойства получаемых из нее композиционных материалов. Свойства материала зависят от количества катализатора и жесткости условий баротермической обработки. Увеличение содержания пероксида водорода в растворе для замачивания щепы первоначально сопровождается пропорциональным увеличением плотности и прочностных характеристик. Для большинства из выбранных режимов баротермической обработки характерно наличие предельного значения количества катализатора, при котором плотность получаемого композиционного материала достигает максимума (насыщения). Дальнейшее увеличение количества катализатора не приводит к увеличению степени дисперсности получаемой волокнистой массы и увеличению плотности получаемых из нее композиционных материалов. Увеличение плотности и прочности материала по сравнению с материалом, получаемым без применения катализатора, составляет до 80% в зависимости от условий баротермической обработки и количества катализатора. Гидрофобные характеристики увеличиваются до 100%. Увеличение прочностных характеристик пропорционально увеличению содержания перекиси водорода лишь до определенной концентрации. Для композиционного материала, полученного в присутствии пероксида водорода, характерно наличие точек экстремума, в которых значения прочности при изгибе являются максимальными. Дальнейшее увеличение количества катализатора приводит к ухудшению прочностных характеристик, что является следствием доминирования деструктивных процессов над процессами межмолекулярной сшивки. Обнаруженные эффекты могут быть использованы в процессе оптимизации технологических режимов получения композиционных материалов на основе древесины березы, подвергнутой баротермической обработке методом взрывного автогидролиза.

Ключевые слова: композиционный материал, древесина, гидролиз, перекись водорода.

Введение

Проблема использования крупнотоннажных отходов растительного происхождения с получением на их основе тех или иных материалов, пригодных для коммерческого применения, остается актуальной и в наши дни. До настоящего времени сжигание или накопление на мусорных полигонах отходов лесопереработки и сельского растениеводства остается обычной практикой. Одним из направлений применения отходов подобного рода является получение на их основе композиционных материалов конструкционного назначения, в том числе, обладающих улучшенными свойствами по сравнению с традиционными аналогами. Получение древесных композиционных материалов с заданными свойствами, определяющими возможность их применения в заданных условиях эксплуатации, требует разработки прогнозных моделей, на основе которых могут быть выбраны технологические режимы.

Один из вариантов получения композиционных материалов из сырья растительного происхождения основан на использовании метода взрывного автогидролиза. На первой стадии материал растительного происхождения подвергается гидролитическому действию в кислой среде насыщенного водяного пара. На второй – горячему прессованию разволокненного гидролизованного лигноцеллюлозного вещества в

композиционный материал. Получение композиционных материалов может осуществляться без применения связующих веществ [18, 20].

Взрывной автогидролиз представляет собой одну из разновидностей процесса гидролитической обработки лигноцеллюлозных материалов, способствующую деполимеризации лигнина и гемицеллюлоз, разделению древесины на волокна. Метод основан на обработке растительного сырья в герметичном сосуде под давлением в среде насыщенного водяного пара в течение заданного времени, после чего выполняется резкий сброс давления до атмосферного с выбросом обрабатываемого материала в приемное устройство [3, 10, 12-14, 18]. Следствием глубоких гидролитических превращений древесной ткани в процессе обработки паром становится появление в ее составе новых низкомолекулярных компонентов и значительные изменения в морфологической структуре.

История процессов обработки лигноцеллюлозной биомассы с использованием гидролизующих агентов и перегретого пара под давлением для получения различных биоматериалов насчитывает около ста лет. Первые промышленные системы, предназначенные для обработки древесной массы методом взрывного автогидролиза, были разработаны в 1920-х годах [14, 15]. В последние годы возрастает интерес к различным методам дополнительной обработки лигноцеллюлозных материалов гидролизующими веществами непосредственно перед стадией взрывного автогидролиза. Процесс подобной предварительной подготовки может оказывать значительное влияние на всех последующих этапах обработки материала, и, в конечном итоге, определять качественный и количественный состав получаемого продукта и его стоимость [17]. Ряд исследований последних лет говорят о повышенном внимании к изучению действия катализаторов на кинетику гидролитических процессов при взрывном автогидролизе, а также к составу и характеристикам получаемых компонентов [2, 5, 7, 19, 21]. Преимущественно подобные исследования проводятся в рамках проектов разработки технологий получения биотоплива на основе лигноцеллюлозных материалов. При этом следует предполагать, что использование катализаторов гидролиза может способствовать совершенствованию процессов получения иных, нежели биотопливо, веществ и материалов на основе метода высокотемпературного автогидролиза, в том числе, композиционных материалов.

В качестве катализаторов гидролиза в системах паровзрывной обработки могут быть использованы разные реагенты – кислоты, основания или иные катализаторы – все они в той или иной степени способны ускорять гидролитические реакции. В зависимости от вида используемого лигноцеллюлозного сырья, вида катализатора, его количества, а также условий баротермической обработки, степень гидролиза, количественный и качественный состав получаемой волокнистой массы могут существенно отличаться. Изучались различные варианты предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов гидролизующими веществами [6-8, 19, 21]. Однако, до настоящего времени не имеется какого-то единого «совершенного» процесса подготовки, оптимального для любых типов лигноцеллюлозного сырья и любых видов целевой продукции. Поэтому выбор используемого гидролизующего агента должен осуществляться, прежде всего, с учетом цели проведения гидролиза и требований к продукции, получаемой на его основе. При этом можно говорить о ряде требований к катализаторам гидролиза, которые следует рассматривать как универсальные, безотносительно большинства целей применения получаемой при гидролизе продукции [9]. Например, их применение не должно быть сопряжено со значительными капитальными и эксплуатационными затратами, чрезмерной интенсификацией процессов коррозии технологического оборудования. Урон, оказываемый окружающей среде, должен быть минимальным, и определяться либо процессами последующей регенерации, либо разложением катализатора на безвредные составляющие. При этом процессы регенерации должны происходить с минимальным ухудшением свойств исходных реагентов. Кроме того, используемые вещества должны быть доступны, пригодны к обработке лигноцеллюлозного сырья различных видов, соответствовать по компонентному составу и степени дисперсности с минимальными требованиями к дальнейшим стадиям процесса получения конечного продукта.

Целью представленной работы является изучение влияния предобработки древесины березы пероксидом водорода на физико-механические характеристики композиционных материалов, получаемых из нее после баротермической обработки методом взрывного автогидролиза. Традиционно перекись водорода используется в процессах отбеливания волокон при производстве целлюлозы и бумаги [1]. При этом о применении данного вещества в качестве реагента для улучшения физико-механических характеристик иных материалов, получаемых на основе гидролизованной древесины, известно сравнительно немного. Подобным примером может служить использование перекиси водорода

в качестве компонента катализатора гидролитических процессов при получении абсорбирующего материала [4]. Добавление в исходный лигноцеллюлозный материал перекиси водорода влияет на кинетику процессов деполимеризации лигнина и гидролиза гемицеллюлоз. Материал растительного происхождения, подвергаемый гидролизу в ее присутствии, оказывается более «податливым» воздействию среды перегретого пара. Обработка в подобных условиях позволяет существенно смягчить условия взрывного автогидролиза, не ухудшая характеристик получаемых материалов [11]. Применение разных условий баротермической обработки древесины – продолжительности процесса и его температуры, а также температуры и давления прессования композиционных материалов - определяют возможность изменять их свойства в широких пределах.

Материалы и методы

Процесс получения композиционных материалов, исследованных в представленной работе, осуществляется следующим образом. В качестве исходного сырья использована воздушнo-сухая щепа березы со средним размером частиц около $5 \times 15 \times 25 \text{ мм}^3$. Предварительная обработка древесной щепы выполнена посредством замачивания в водном растворе перекиси водорода, взятой в количестве 0,165 - 33,0 м.ч. / 100 м.ч. древесины в пересчете на «сухое» вещество H_2O_2 . Объем раствора всякий раз был доведен до соотношения 1/1 по массе к массе исходной древесины. Температура обработки около 293K, продолжительность – 60 минут.

После водно-перекисной обработки щепа помещалась в реактор лабораторной установки взрывного автогидролиза периодического действия, где подвергалась баротермической обработке в среде насыщенного водяного пара при заданной температуре в течение заданного времени. Температура обработки в серии составляла от 443 до 463K, продолжительность – от 5 до 15 минут. Фактор жесткости процесса, рассчитываемый по методике [16], для разных режимов обработки соответствовал диапазону R0 от 575 до 4466 мин. По завершении процесса баротермической обработки, в течение не более чем 1 секунды осуществлялся сброс давления в реакторе установки до атмосферного, с выбросом гидролизованного материала в приемное устройство. Полученный материал подвергался высушиванию до воздушно-сухого состояния в помещении при температуре 293K в условиях естественной вентиляции. Процесс горячего прессования композиционного материала осуществлялся в разборной пресс-форме при температуре 423K и удельном давлении 5МПа. Продолжительность прессования после достижения целевой температуры составляла около 1 мин/1 мм толщины плитного материала. Прессование выполнялось без введения в пресс-массу связующих веществ.

Определение плотности, прочности при статическом изгибе, водопоглощения и разбухания за 24 часа выполнено по стандартным методикам в соответствии с требованиями ГОСТ 10634-88, ГОСТ 10635-88, ГОСТ 10633-2018. Определено влияние условий баротермической обработки древесины в присутствии катализатора гидролиза на физико-механические свойства получаемого плитного композиционного материала. По материалам исследования получены зависимости плотности, прочности на изгиб и гидрофобных характеристик для различных условий баротермической обработки и разных количеств катализатора. Серия экспериментов направлена на поиск механизмов оптимизации процесса получения плитных композиционных материалов из гидролизованной древесины, обладающих заданными характеристиками.

Результаты и обсуждение

На рисунках 1-8 показаны зависимости плотности и прочности композиционных материалов при статическом изгибе от количества перекиси водорода, добавляемой в древесину перед проведением баротермической обработки. Все зависимости получены в разных условиях жесткости процесса автогидролиза. Установлено, что при разных условиях жесткости для всех зависимостей характерно первоначально резкое увеличение плотности композиционного материала от количества используемого катализатора. После достижения определенного значения плотности, дальнейшего ее увеличения с увеличением количества перекиси водорода для всех условий баротермической обработки не наблюдается. Обнаруженный эффект является прямым следствием интенсификации гидролитических превращений в компонентах древесины при увеличении концентрации используемого катализатора. При этом для каждого из условий баротермической обработки свойственно наличие порогового значения концентрации катализатора, при достижении которого обеспечивается максимально возможная для данных условий степень дисперсности гидролизованного древесного вещества. Дальнейшего увеличения

степени дисперсности не происходит. Соответственно плотность получаемого из такой волокнистой массы композиционного материала не увеличивается.

Зависимости прочностных характеристик имеют иной характер. Значение прочности оказывается прямо пропорциональным плотности лишь при относительно небольших количествах используемого катализатора. В то время, как с увеличением содержания перекиси водорода при любых вариантах условий баротермической обработки плотность композиционных материалов увеличивается до определенного предела, прочность, достигнув максимума, с дальнейшим увеличением количества катализатора начинает уменьшаться. Наиболее вероятно, что обнаруженный эффект обусловлен активизацией процессов деструкции компонентов древесного вещества при использовании больших количеств перекиси водорода. При этом деструктивным изменениям подвержены прежде всего компоненты, ответственные за формирование конденсационных связей в будущем композиционном материале – продукты гидролиза гемицеллюлоз и лигнина.

Каждому из условий баротермической обработки соответствует экстремум на графике зависимости прочности от количества используемого катализатора гидролиза. Количество перекиси водорода, определяющее получение композиционного материала с максимальным значением прочностного показателя, уменьшается с увеличением продолжительности баротермической обработки или ее температуры (рис. 9). В выполненной серии экспериментов максимальная прочность композиционного материала при минимальном значении количества катализатора достигается при температуре баротермической обработки 463К в течение 10 минут ($R_0 = 4466$ мин). Близкий эффект достигается и при температуре 453К, но продолжительность паровой обработки должна быть увеличена не менее чем до 15 минут ($R_0 = 3400$ мин).

Максимальные прочностные показатели композиционного материала достигаются при использовании катализатора гидролиза, взятого в количестве от 5 до 24 м.ч. Примечательно, что в мягких условиях баротермической обработки, например, при температуре 443К и продолжительности 5-10 минут ($R_0 = 575$ -1150 мин), влияние перекиси водорода становится заметным при содержании свыше 3 м.ч. Следствием дальнейшего увеличения содержания перекиси является резкая интенсификация процесса увеличения как плотности, так и механической прочности. Максимальные прочностные показатели обеспечиваются при существенно меньшем количестве используемого катализатора. В целом, зависимость прочностного показателя композиционного материала от фактора жесткости процесса взрывного автогидролиза носит характер, близкий к линейному (рис. 9).

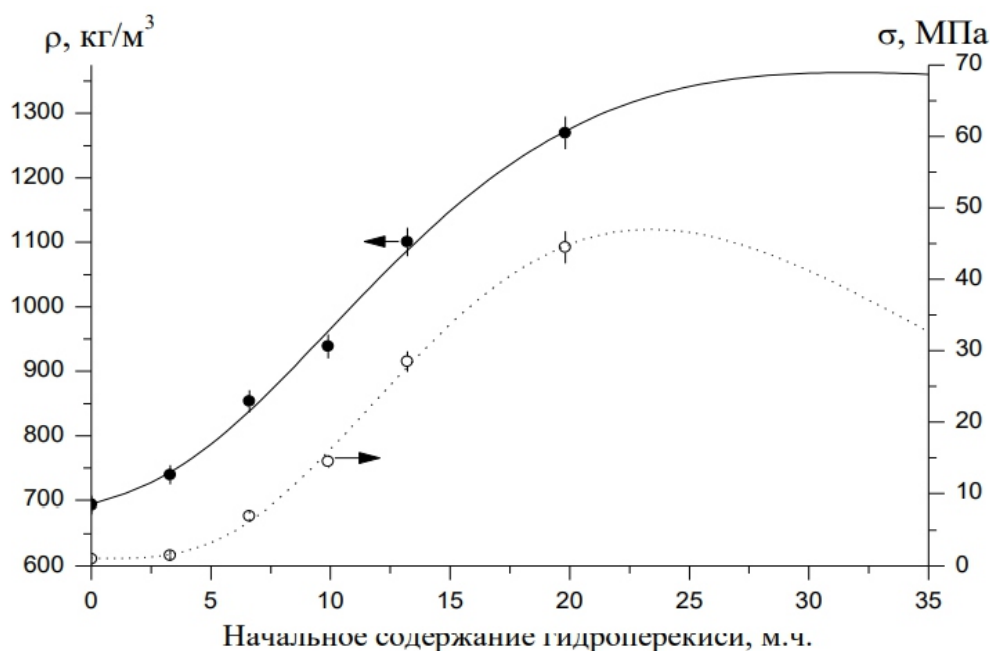


Рис. 1. Зависимость плотности и прочности композиционного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 5 мин при 443К ($R_0=575$ мин))

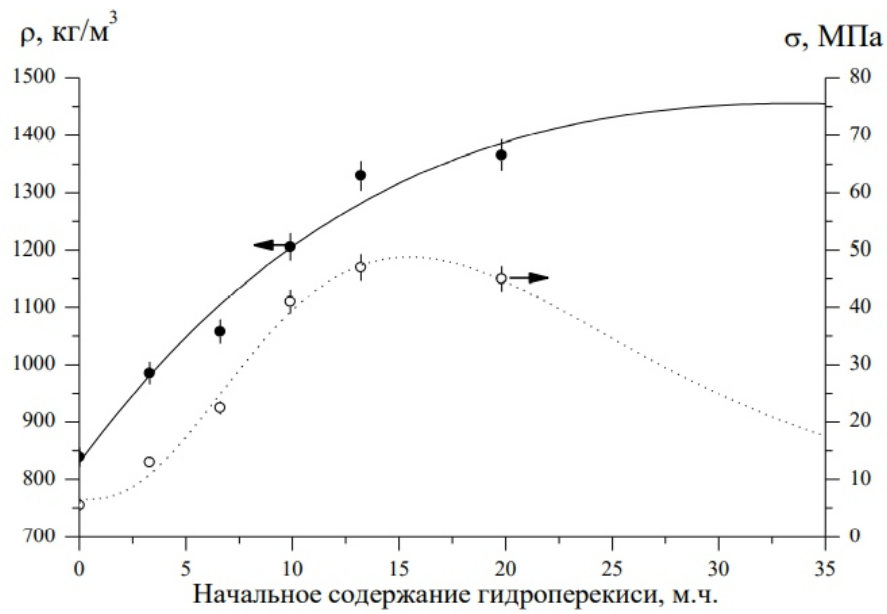


Рис. 2. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 5 мин при 453K ($R_0=1133$ мин))

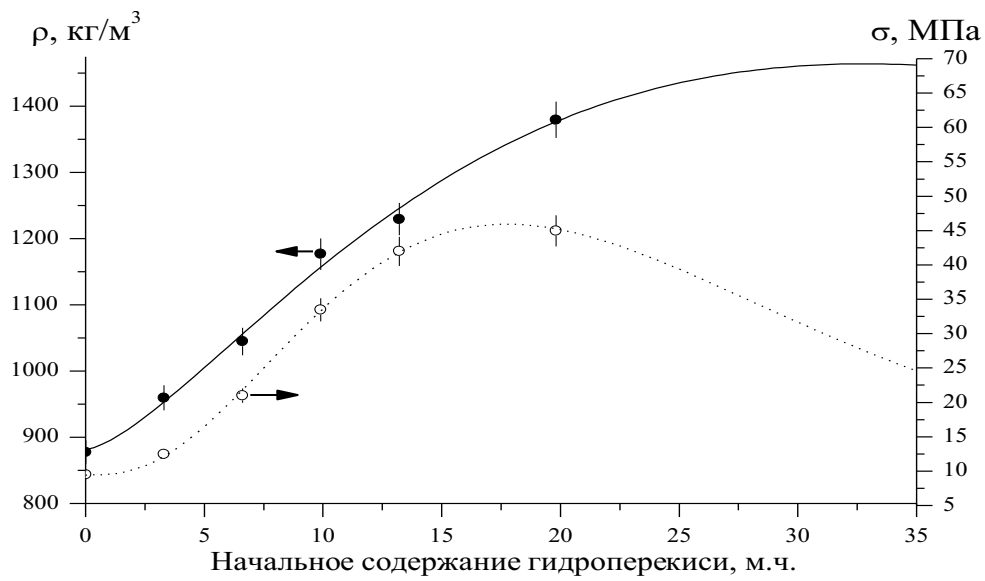


Рис. 3. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 10 мин при 443K ($R_0=1151$ мин))

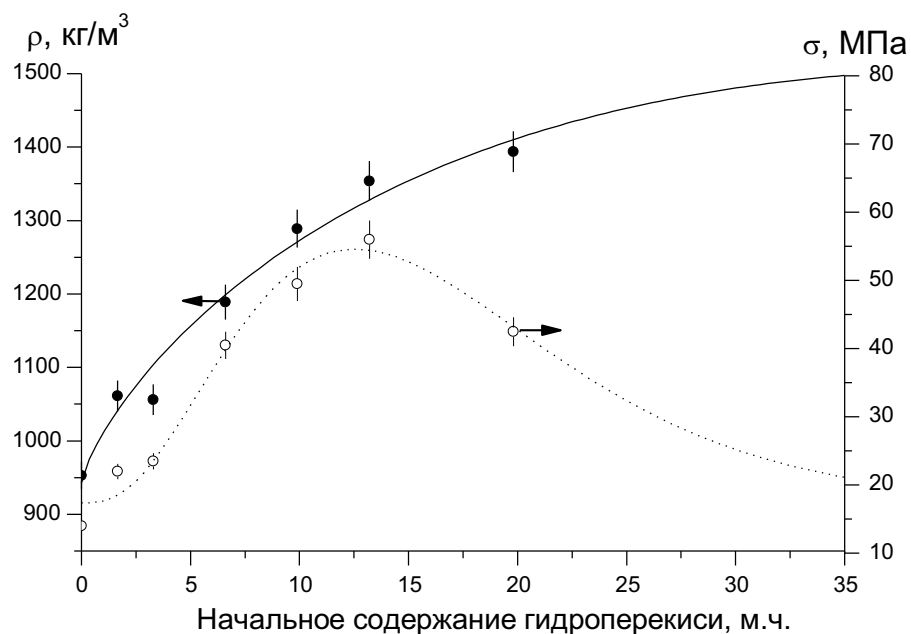


Рис. 4. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 15 мин при 443K ($R_0=1726$ мин))

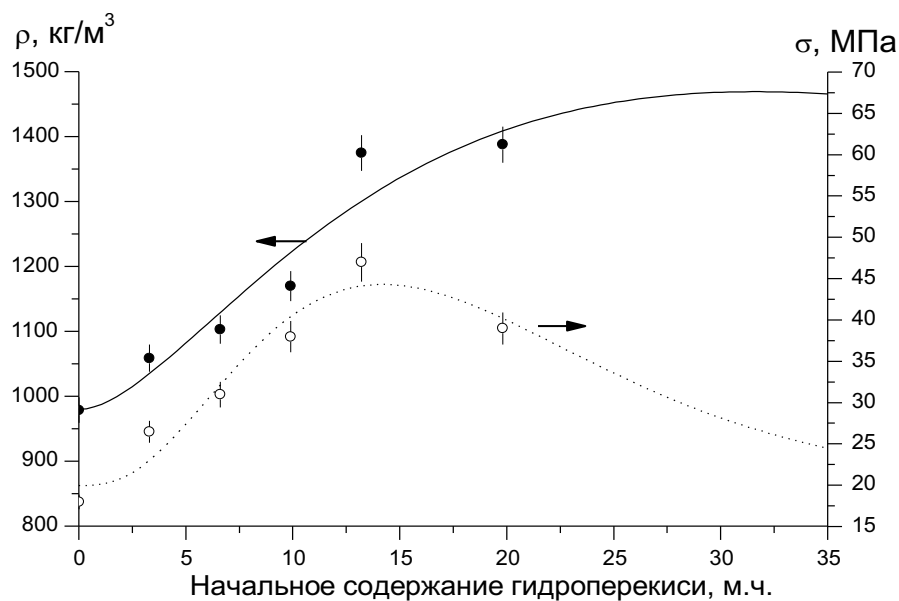


Рис. 5. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 5 мин при 463K ($R_0=2233$ мин))

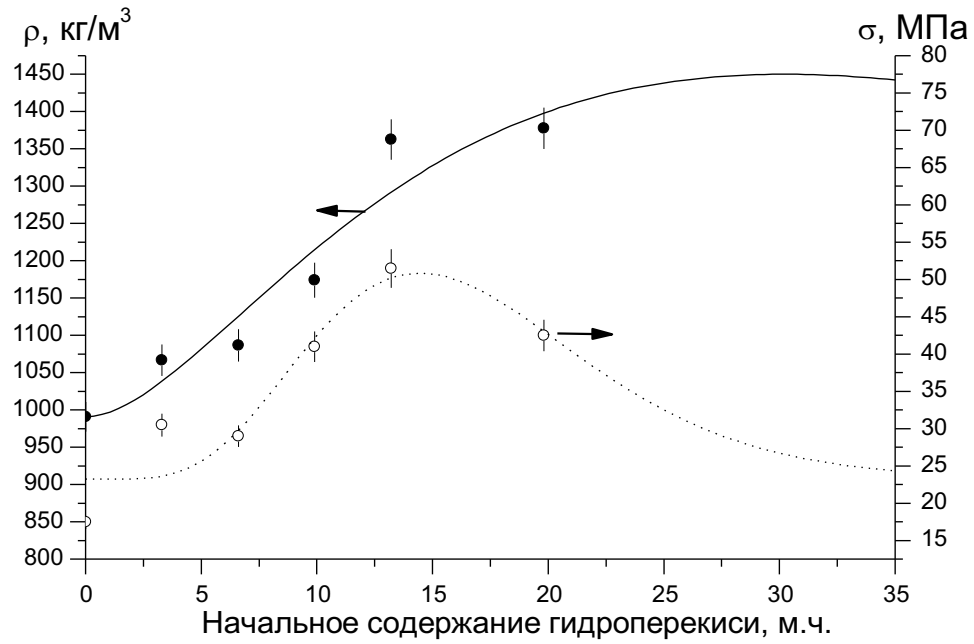


Рис. 6. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 10 мин при 453K ($R_0=2267$ мин))

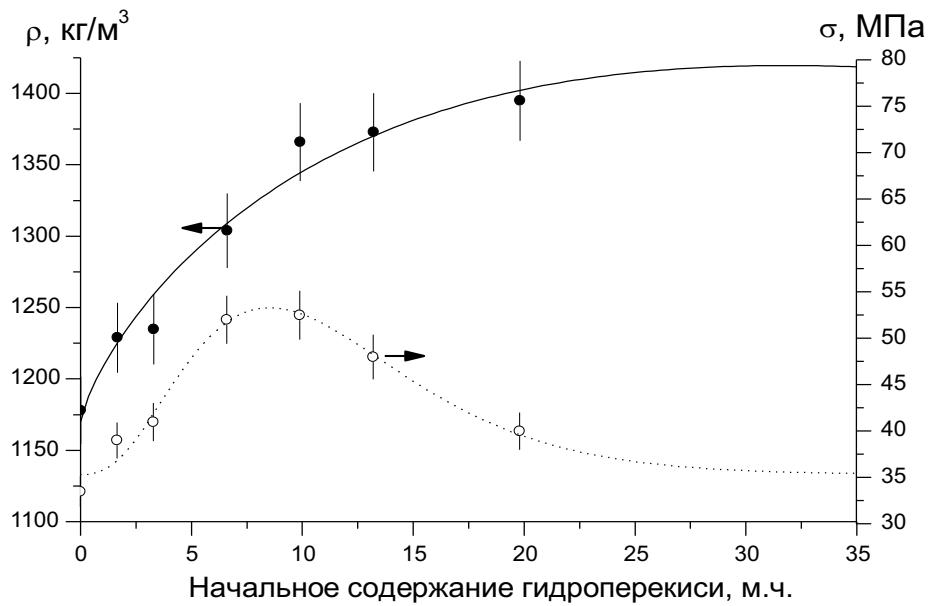


Рис. 7. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 15 мин при 453K ($R_0=3400$ мин))

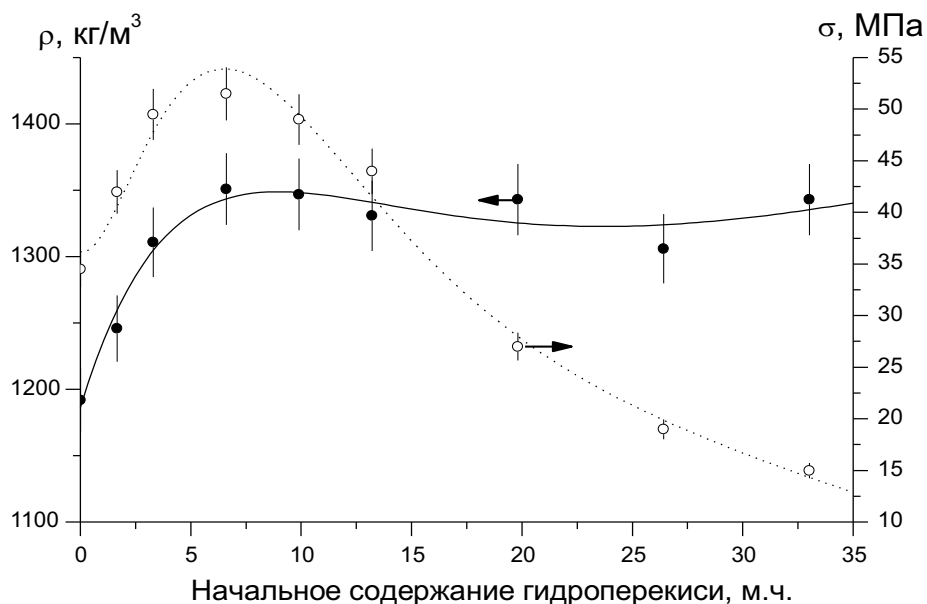


Рис. 8. Зависимость плотности и прочности композитного материала от начального содержания перекиси водорода (обработка 10 мин при 463K ($R_0=4466$ мин))

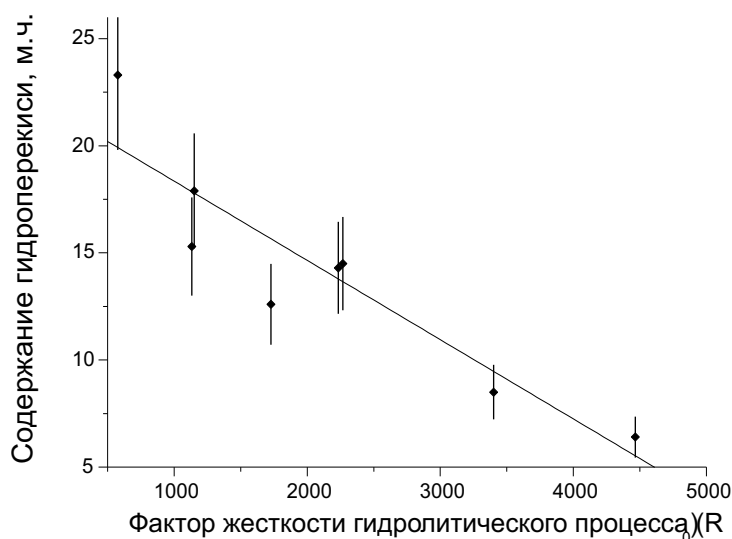


Рис. 9. Зависимость оптимального количества H_2O_2 (определено по максимуму прочности на изгиб на основе рис. 1-8) от жесткости условий баротермической обработки

Для образцов композиционного материала, полученных в условиях жесткости процесса баротермической обработки $R_0 = 4466$ мин, определены зависимости водопоглощения и разбухания за 24 часа. Вид зависимостей показан на рисунках 10, 11. С увеличением количества катализатора гидролиза наблюдается первоначально резкое улучшение гидрофобных характеристик. Уменьшение водопоглощения достигает 50%, а разбухания до 30% от значений данных показателей для композиционного материала, получаемого без применения катализатора. Обе зависимости имеют обратно экспоненциальный характер, однако с увеличением количества катализатора гидролиза динамика улучшения водопоглощения и разбухания неодинакова. Если водопоглощение практически линейно зависит от плотности (рис. 12), то кривая разбухания является более плавной. Таким образом, уменьшение разбухания происходит не синхронно с увеличением плотности материала, а зависимость разбухания от водопоглощения имеет сложный нелинейный характер (рис. 13).

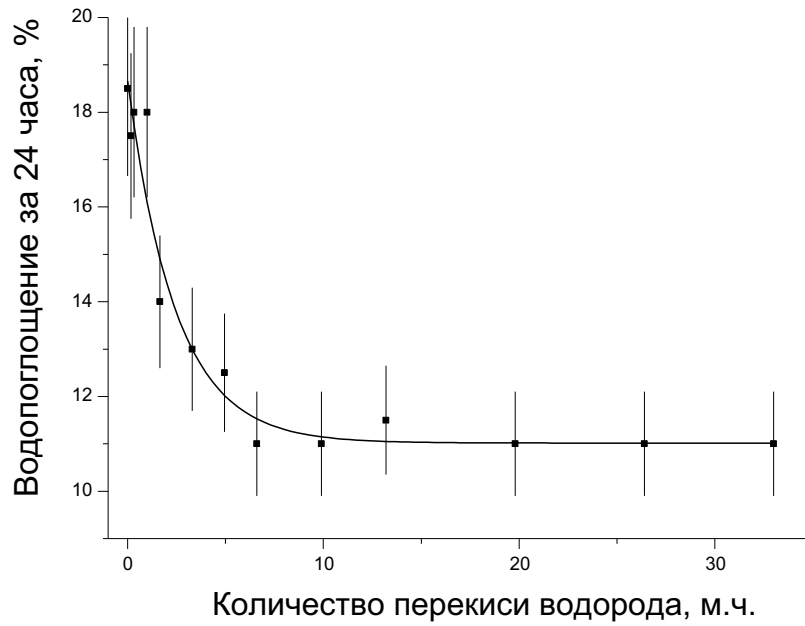


Рис. 10. Зависимость водопоглощения композиционного материала за 24 часа от содержания перекиси водорода в растворе для замачивания щелы (обработка 10 мин при 463K ($R_0=4466$ мин))

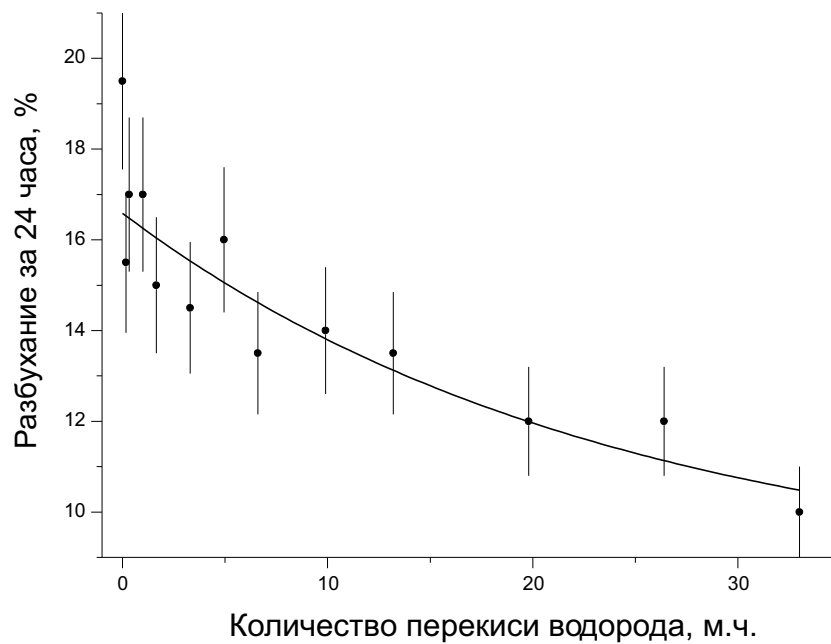


Рис. 11. Зависимость разбухания композиционного материала за 24 часа от содержания перекиси водорода в растворе для замачивания щелы (обработка 10 мин при 463K ($R_0=4466$ мин))

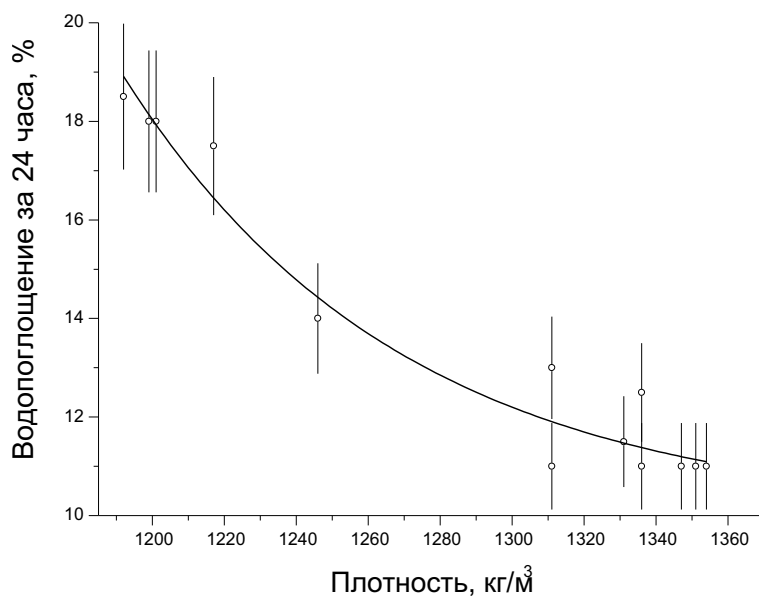


Рис. 12. Зависимость водопоглощения композиционного материала за 24 часа от его плотности

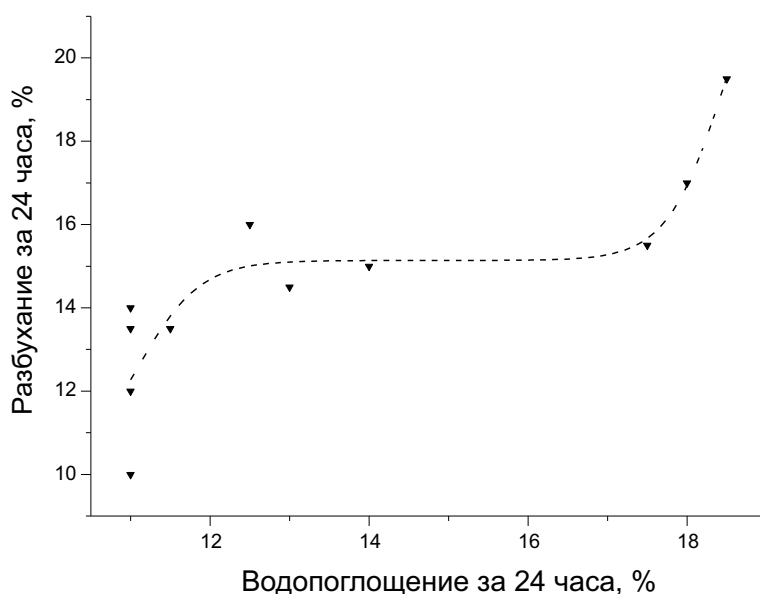


Рис. 13. Зависимость разбухания композиционного материала от его водопоглощения

На основе представленных зависимостей могут быть выбраны технологические режимы получения плитного композитного материала из гидролизованной древесины березы с заданными физико-механическими характеристиками.

Заключение

Применение перекиси водорода в качестве гидролизующего агента на стадии баротермической обработки древесины березы способствует интенсификации гидролитических превращений в ее компонентах. Плитный композиционный материал, получаемый из древесины, гидролизованной в присутствии перекиси водорода, обладает высокими физико-механическими и гидрофобными

характеристиками. Варьирование количества гидролизующего вещества, а также условий баротермической обработки (продолжительность, температура) позволяет получать композиционный материал в широком диапазоне свойств. Комплексное действие на древесину березы разных количеств перекиси водорода и температурно-временного фактора процесса баротермической обработки определяет возможность получения композиционного материала с высокими эксплуатационными показателями. Оптимальными параметрами обработки следует считать:

- количество перекиси водорода, используемой на стадии предварительного замачивания древесины – 6 - 9 м.ч. на 100 м.ч. исходной древесины;
- фактор жесткости процесса взрывного автогидролиза – 3400 - 4466 мин.

Использованные режимы позволяют получать композиционный материал, характеризующийся физико-механическими параметрами в следующих диапазонах:

- плотность 1100 - 1350 кг/м³;
- прочность при статическом изгибе 35 - 55 МПа;
- водопоглощение за 24 часа 11 - 18 %;
- разбухание за 24 часа 10 - 18 %.

На основе представленных зависимостей могут быть выбраны технологические режимы получения плитного композитного материала из гидролизованной древесины березы с заданными физико-механическими характеристиками. Варьирование условий получения композиционного материала может быть выполнено и за пределами представленных выше оптимальных технологических режимов. В таком случае из древесины березы может быть получен композиционный материал в следующих диапазонах характеристик:

- плотность 750 - 1400 кг/м³;
- прочность при статическом изгибе 10 - 60 МПа;
- водопоглощение за 24 часа 10 - 60%;
- разбухание за 24 часа 10 - 20%.

Преимущество применения перекиси водорода в качестве катализатора гидролиза обусловлено не только активизацией гидролитических процессов в компонентах древесины и образованием в них дополнительных количеств реакционноспособных групп. Пероксид водорода представляет собой неустойчивое вещество, подверженное быстрому разложению на простые компоненты – кислород и воду. При этом интенсивность процессов разложения значительно усиливается в жестких условиях баротермической обработки древесины - подобных тем, которые были использованы в данной работе. Таким образом, способствуя значительной интенсификации гидролитических процессов в древесине на стадии взрывного автогидролиза, перекись водорода уже не присутствует в волокнистой массе на стадии горячего прессования композиционного материала, а также в самом композиционном материале. Тем самым данный гидролизующий агент, в отличие от минеральных кислот и иных более устойчивых гидролизующих веществ, не способен оказывать деструктирующее действие на композиционный материал в процессе эксплуатации получаемых из него изделий.

Литература

1. Зорина Н.В., Евстафьев С.Н. Предварительная обработка соломы пшеницы перекисью водорода с последующим автогидролизом // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 2 (5). С. 33-36
2. Коньшин В.В., Протопопов А.В., Ефрюшин Д.Д. Химическая переработка биомассы растительного сырья // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова им. И. Раззакова. 2017. № 3 (43). С. 63-66
3. Скурыдин Ю.Г. Строение и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дисс. ... канд. техн. наук. : 05.23.05. Барнаул, 2000. 147с.
4. Патент № 2387669 Российская Федерация, МПК C08B 15/00, C08B 1/00, D21C 9/10, D21C 9/16, D21H 11/00, A61F 13/84. Лигноцеллюлозные материалы и продукция, изготовленная из них: 2007140732/04: заявл. 02.05.2006; опубл. 27.04.2010. Бюл. № 12. / Тан Женг, Лорензони Дамарис, Гоял Гоупэл, Янг Сэн

5. Ширяев Д.В. Теплоизоляционные материалы на основе модифицированных методом взрывного автогидролиза отходов растительного происхождения: диссертация ... кандидата технических наук : 05.21.03. Сиб. гос. технол. ун-т. Барнаул, 2013. 146 с.
6. Aguiar RS, Silveira MH, Pitarello AP, Corazza ML, Ramos LP. Kinetics of enzyme-catalyzed hydrolysis of steam-exploded sugarcane bagasse // *Bioresour Technol.* 2013 V. 147. pp. 416-423. doi: 10.1016/j.biortech.2013.08.067.
7. Douglas Henrique Fockink, Jorge Hernán Sánchez, Luiz Pereira Ramos Comprehensive analysis of sugarcane bagasse steam explosion using autocatalysis and dilute acid hydrolysis (H₃PO₄ and H₂SO₄) at equivalent combined severity factors // *Industrial Crops and Products.* 2018. V.123. pp. 563-572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.017>
8. Fan X, Cheng G, Zhang H, Li M, Wang S, Yuan Q. Effects of acid impregnated steam explosion process on xylose recovery and enzymatic conversion of cellulose in corncob // *Carbohydr Polym.* 2014 V.114. pp.21-26. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.07.051
9. Fengel D. and Wegener G. Wood – chemistry, ultrastructure, reactions, Walter de Gruyter. Berlin and New York. 1984 (Fengel D, Wegener G (1988) Wood (Chemistry, Ultrastructure, Reactions) Wood industry, Moscow).
10. Heitz, M., Capek-Ménard, E., Koeberle, P.G., Gagné, J., Chornet, E., Overend, R.P., Taylor, J.D., Yu, E. Fractionation of *Populus tremuloides* at the pilot plant scale: Optimization of steam pretreatment conditions using the STAKE II technology // *Bioresource Technology.* 1991. Vol. 35, pp. 23-32. DOI:10.1016/0960-8524(91)90078-X
11. Ho, Mun Chun & Ong, Victor Zhenquan & Wu, Ta Yeong. Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier.* 2019. Vol. 112(C). pp. 75-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.082>
12. Iogen Corporation. URL: http://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/index.html – свободный. Дата обращения: декабрь 2019г.
13. Jollez, P., Chornet, E. and Overend, R.P. Steam -aqueous fractionation of sugar cane bagasse: an optimization study of process conditions at the pilot plant level, in *Advances in Thermomechanical Biomass Conversion*, ed. A.V. Bridgwater, Blackie Academic and Professional, London. 1994. pp. 1659-1669.
14. Mason W.H. Low-temperature explosion process of disintegrating wood and the like US Patent 1586159 (USA). 1926.
15. Mason W.H. Process and apparatus for disintegration of wood and the like. US Patent 1578609 (USA). 1926.
16. Overend R.P., Chornet E. Fractionation of lignocelluloses by steam aqueous pretreatments // *Philosophical Transactions of the Royal Society A.* 1987. Vol. 321. № 1561. pp. 523-536
17. Shijie Liu. A synergetic pretreatment technology for woody biomass conversion // *Applied Energy.* 2015. Vol. 144. pp. 114–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.021>
18. Steam explosion for biomass pre-treatment. Danish technological institute. Energy & Climate Centre for Renewable Energy and Transport Section for Biomass. 2013. p.15.
19. Wenjie Sui, Mengjia Zhou, Yi Xu, Guanhua Wang, Xiaoling Lv Hydrothermal deglycosylation and deconstruction effect of steam explosion: Application to high-valued glycyrrhizic acid derivatives from liquorice // *Food Chemistry.* 2020. V.307. Article 125558 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125558>
20. Yuan-Zong Lai Wood and Wood Products // *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology.* 2017. P. 215. DOI: 10.1007/978-3-319-52287-6_5
21. YuTong Han, JiFei Xu, ZhiMin Zhao, Ji Zhao Analysis of enzymolysis process kinetics and estimation of the resource conversion efficiency to corn cobs with alkali soaking, water and acid steam explosion pretreatments // *Bioresource Technology.* 2018. V.264. pp. 391-394 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.045>

©Скурыдин Ю.Г. – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и электроники, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет» (ФГБОУ ВО «АГУ»), e-mail: skur@rambler.ru; Скурыдина Е.М. – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий, ФГБОУ ВО «АГУ», e-mail: skudem@rambler.ru; Хабибуллина А.Р. – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»); e-mail: almirah@rambler.ru; Байгильдеева Е.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: bai48@rambler.ru.

УДК 674.8:674.049.2:542.973

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS MADE OF BIRCH WOOD HYDROLYZED IN THE PRESENCE OF HYDROGEN PEROXIDE

Yu.G. Skurydin, E.M. Skuridina, R.G. Safin, A.R. Khabibullina

Physical and mechanical characteristics of wood composite materials obtained from birch wood were investigated. Composite materials were obtained after wood processing by explosive autohydrolysis in the presence of a catalyst. Hydrogen peroxide was used as a hydrolysis catalyst. The amount of catalyst varied from 0.165 to 33% by weight of the original wood. In an aqueous solution of the catalyst was carried out soaking the wood chips before barothermichesko treatment. Composite materials were made from hydrolyzed wood pulp by hot pressing without adding binders.

The dependences of density, bending strength, water absorption and swelling of composite materials on the amount of catalyst are obtained. The use of hydrogen peroxide at the preliminary stage of hydrolysis contributes to changes in the structure of wood pulp, and affects the physical and mechanical properties of composite materials obtained from it. The properties of the material depend on the amount of catalyst and the hardness of the barothermal treatment conditions. An increase in the content of hydrogen peroxide in the solution for soaking chips is initially accompanied by a proportional increase in density and strength. For most of the selected modes of barothermal treatment, the presence of a limit value of the amount of catalyst at which the density of the composite material reaches a maximum is characteristic. Further increase in the amount of the catalyst does not lead to an increase in the degree of dispersion of the resulting fibrous mass and an increase in the density of composite materials. The increase in the density and strength of the material in comparison with the material obtained without the use of a catalyst is up to 80%, depending on the conditions of barothermal treatment and the amount of catalyst. Hydrophobic characteristics are improved up to 100%. The increase in strength characteristics is proportional to the increase in the content of hydrogen peroxide only to a certain concentration. For a composite material obtained in the presence of hydrogen peroxide, it is characterized by the presence of extremum points in which the bending strength values are maximum. Further increase in the amount of the catalyst leads to a deterioration of strength characteristics, which is a consequence of the dominance of destructive processes over the processes of intermolecular crosslinking. The detected effects can be used in the process of optimization of technological modes for obtaining composite materials based on birch wood subjected to barothermic treatment by explosive autohydrolysis.

Keywords: explosive autohydrolysis, birch wood, composite material, strength, density, hydrophobic characteristics, hydrogen peroxide.

References

1. Zorina N.V., Evstafiev S.N. Pretreatment of wheat straw with hydrogen peroxide followed by autohydrolysis. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya* [News of universities. Applied Chemistry and Biotechnology], 2013, No. 2 (5), pp. 33-36.
2. Konshin V.V., Protopopov A.V., Efrushin D.D. Chemical processing of biomass of plant materials *Izvestiya Kirgizskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.Razzakova im. I. Razzakova* [Bulletin of the Kirgiz State Technical University. I. Razzakova them. I. Razzakova], 2017, No. 3 (43), pp. 63 - 66.
3. Skuridin Yu G. Structure and properties of composite materials obtained from waste wood after the explosive hydrolysis. Dissertation. Altai State Technical University. 2000]
4. Tan ZHeng, Lorenzoni Damaris, Goyal Goupel, YAng Sen. Lignocellulosic materials and products made from them. Patent RF, no 2387669, 2010
5. Shiryaev D.V. Thermal insulation materials based on plant waste modified by explosive autohydrolysis method. Dissertation. Siberian State Technological University. 2013
6. Aguiar RS, Silveira MH, Pitarello AP, Corazza ML, Ramos LP. Kinetics of enzyme-catalyzed hydrolysis of steam-exploded sugarcane bagasse // *Bioresour Technol.* 2013 V. 147. pp. 416-423. doi: 10.1016/j.biortech.2013.08.067.
7. Douglas Henrique Fockink, Jorge Hernán Sánchez, Luiz Pereira Ramos Comprehensive analysis of sugarcane bagasse steam explosion using autocatalysis and dilute acid hydrolysis (H₃PO₄ and H₂SO₄) at

equivalent combined severity factors // *Industrial Crops and Products*. 2018. V.123. pp. 563-572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.017>

8. Fan X, Cheng G, Zhang H, Li M, Wang S, Yuan Q. Effects of acid impregnated steam explosion process on xylose recovery and enzymatic conversion of cellulose in corncob // *Carbohydr Polym*. 2014 V.114. pp.21-26. doi: 10.1016/j.carbpol.2014.07.051

9. Fengel D. and Wegener G. Wood – chemistry, ultrastructure, reactions, Walter de Gruyter. Berlin and New York. 1984 (Fengel D, Wegener G (1988) Wood (Chemistry, Ultrastructure, Reactions) Wood industry, Moscow).

10.Heitz, M., Capek-Ménard, E., Koeberle, P.G., Gagné, J., Chornet, E., Overend, R.P., Taylor, J.D., Yu, E. Fractionation of *Populus tremuloides* at the pilot plant scale: Optimization of steam pretreatment conditions using the STAKE II technology // *Bioresource Technology*. 1991. Vol. 35, pp. 23-32. DOI:10.1016/0960-8524(91)90078-X

11.Ho, Mun Chun & Ong, Victor Zhenquan & Wu, Ta Yeong. Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. 2019. Vol. 112(C). pp. 75-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.082>

12.Iogen Corporation. URL: http://www.iogen.ca/cellulosic_ethanol/index.html – свободный. Дата обращения: декабрь 2019г.

13.Jollez, P., Chornet, E. and Overend, R.P. Steam-aqueous fractionation of sugar cane bagasse: an optimization study of process conditions at the pilot plant level, in *Advances in Thermomechanical Biomass Conversion*, ed. A.V. Bridgwater, Blackie Academic and Professional, London. 1994. pp. 1659-1669.

14.Mason W.H. Low-temperature explosion process of disintegrating wood and the like US Patent 1586159 (USA). 1926.

15.Mason W.H. Process and apparatus for disintegration of wood and the like. US Patent 1578609 (USA). 1926.

16.Overend R.P., Chornet E. Fractionation of lignocellulosies by steam aqueous pretreatments // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1987. Vol. 321. № 1561. pp. 523-536

17.Shijie Liu. A synergetic pretreatment technology for woody biomass conversion // *Applied Energy*. 2015. Vol. 144. pp. 114–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.021>

18.Steam explosion for biomass pre-treatment. Danish technological institute. Energy & Climate Centre for Renewable Energy and Transport Section for Biomass. 2013. p.15.

19.Wenjia Sui, Mengjia Zhou, Yi Xu, Guanhua Wang, Xiaoling Lv Hydrothermal deglycosylation and deconstruction effect of steam explosion: Application to high-valued glycyrrhizic acid derivatives from liquorice // *Food Chemistry*. 2020. V.307. Article 125558 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125558>

20.Yuan-Zong Lai Wood and Wood Products // *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*. 2017. P. 215. DOI: 10.1007/978-3-319-52287-6_5

21.YuTong Han, JiFei Xu, ZhiMin Zhao, Ji Zhao Analysis of enzymolysis process kinetics and estimation of the resource conversion efficiency to corn cobs with alkali soaking, water and acid steam explosion pretreatments // *Bioresource Technology*. 2018. V.264. pp. 391-394 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.045>

© **Skurydin Yu.G.** – PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of computer facilities and electronics, Altai State University (ASU), e-mail: skur@rambler.ru; **Skuridina E.M.** – PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of information technologies, ASU, e-mail: skudem@rambler.ru; **Khabibullina A. R.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: almira-h@rambler.ru; **Baigildeeva E.I.** – Ph.D in Engineering sciences, Associate Professor of the Department Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: bai48@rambler.ru.

УДК 674.02

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СКЛЕИВАНИЯ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ

А.А. Лукаш, Т.И. Глотова, В.А Романов, А. Феллух, О.Н. Чернышев

В статье предложен новый метод оценки прочности клеевых соединений при нормальном отрыве слоя, который может применяться при разработке новых составов клеев. Применяемые модифицирующие добавки различных видов, позволяют улучшить технологические и эксплуатационные свойства клеев, применяемых при склеивании древесины. Поэтому совершенствование технологии клеевых материалов базируется на разработке новых видов клеев и клеевых составов. В ходе исследований по установлению вида и состава модифицирующих добавок проводится большое количество экспериментов связанных с установлением влияния состава клея на прочность склеивания. В настоящее время в большинстве случаев адгезию оценивают по косвенному критерию - краевому углу смачивания, который непостоянен по времени из-за впитывания растекания и впитывания клея древесиной. Стандартный метод определения прочности при скалывании по клеевому слою достаточно трудоемкий, т.к. включает операции по выпиливанию брусков, строганию в размер, последующему склеиванию брусков, повторной механической обработке склеенных брусков после полного отверждения клея для придания образцам требуемых размеров и формы. Что в достаточной степени трудоемко. С целью снижения трудоемкости при проведении исследований по разработке новых клеевых составов разработан новый метод определения прочности клеевого соединения при нормальном отрыве. Прочность клеевого по предлагаемому данному методу оценивается максимальной нагрузкой, необходимой для нормального отрыва слоя. Применяемые приспособления (захваты) просты в изготовлении и надежны при эксплуатации. Новый предлагаемый метод определения прочности склеивания менее трудоемок, чем стандартный метод, т.к. не требуется повторная механическая обработка склеенных брусков потому, а образцы после отверждения клея имеют требуемые размеры и форму и готовы к испытанию. Приведен пример реализации предлагаемого нового метода оценки прочности склеивания при нормальном отрыве для установлении нового состава клея (мастики) при изготовлении багета для художественных рам.

Ключевые слова: прочность на нормальный отрыв, склеивания, древесина, метод, модифицирующие добавки.

Введение

Технологии создания новых видов продукции на основе склеивания древесины постоянно развиваются и совершенствуются. Это позволяет улучшать эксплуатационные характеристики древесных материалов, а также и решать вопросы переработки отходов, образующихся при обработке древесины [1, 2]. Одним из направлений совершенствования технологии склеивания древесины, является разработка новых видов клеев клеевых составов путем модификации. Модификацию осуществляют путем введения веществ, называемых модификаторами. Основное предназначение модифицирующих добавок – улучшение технологических и эксплуатационных свойств клеев [3, 4, 5]. Применение модификаторов, способных реагировать со свободным формальдегидом способствует снижению токсичности [6–11]. Модификаторы, рассмотренные в исследованиях [12, 13] применяют для повышения прочности клеевых соединений.

Актуальным является использование не содержащего хлор кремнефтористого аммония в качестве отвердителя карбамидоформальдегидных смол [14]. В качестве модификаторов могут применяться и другие клеи. Модификация латексами улучшает упруго-эластические свойства карбамидоформальдегидных смол [15]. При совмещении карбамидоформальдегидной смолы с поливинилацетатной дисперсией (ПВА) имеет место взаимодействие функциональных групп ПВА и компонентов смолы в ходе горячего прессования, что позволяет повысить прочность и водостойкость древесностружечных плит и фанеры [16, 17].

Некоторые вещества улучшают физико-химические свойства карбамидоформальдегидных смол [18]. А модификаторы, рассмотренные в исследованиях [19, 20], способны повышать адгезию. Вопросы, связанные с разработкой модифицирующих добавок и новых клеевых составов для улучшения технологических, эксплуатационных, экономических или экологических свойств клеев, являются

актуальными. Важно, чтобы применение добавок не привлекло к снижению прочности клеевого соединения. Поэтому актуальными также являются вопросы оценки адгезии.

При проведении исследований по разработке новых клеев или составов для оценки адгезии зачастую используют краевой угол смачивания поверхности материала клеевым составом, что не совсем корректно т.к. прочность оценивается краевым углом смачивания.

Стандартными методами адгезия определяется прочностью при скалывании по клеевому слою клееной слоистой древесины (рисунок 1) и клееной массивной древесины (рисунок 2).

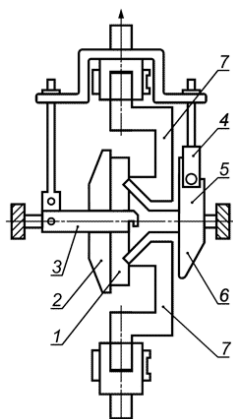


Рис. 1. Схема приспособления для определения прочности при скалывании по клеевому слою клееной слоистой древесины: 1 – образец; 2 – упорная планка; 3 – планка; 4 – захват; 5 – упор; 6 – траверса; 7 –испытательные губки

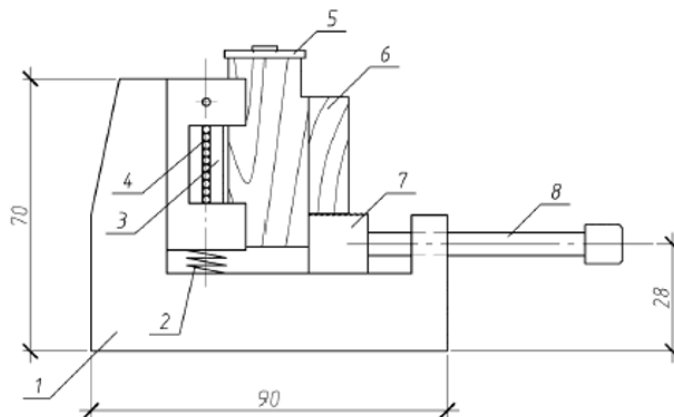


Рис. 2. Схема приспособления для определения прочности при скалывании по клеевому слою массивной древесины: 1 - корпус; 2 - пружина; 3 - подвижная планка; 4 - ролики; 5 - нажимная призма с шаровой опорой; 6 - образец; 7 - подвижная опора; 8 - устройство для прижима подвижной опоры

Операции для определения адгезионной прочности включают изготовление заготовок, их склеивание, выпиливание из склеенных заготовок образцов с соблюдением точных размеров и форм, что в определенной степени трудоемко. Поэтому для проведения поисковых экспериментов по разработке новых клеевых составов разработан новый, менее трудоемкий метод определения адгезионной прочности при нормальном отрыве.

Методы и материалы

Объектом исследования являются процессы разработки новых клеевых составов. Предметом исследования - метод оценки прочности клеевого соединения на нормальный отрыв. Исследование базируется на эмпирических подходах и методах, применение прямых численных методов линейной алгебры.

Результаты

Как отмечалось выше оценка прочности склеивания является важным составным элементом исследований по разработке новых клеевых составов. Предлагаемый метод оценки прочности клеевого соединения на нормальный отрыв, по сравнению со стандартным методом определения прочности при скалывании по клеевому слою, менее трудоемкий. Для его реализации не требуется повторная механическая обработка склеенных брусков потому, что образцы после отверждения клея готовы к испытанию т.к. имеют требуемые размеры и форму. Адгезия оценивается максимальной нагрузкой, необходимой для нормального отрыва слоя.

На рисунке 3 приведена схема размещения и испытания образца в захватах.

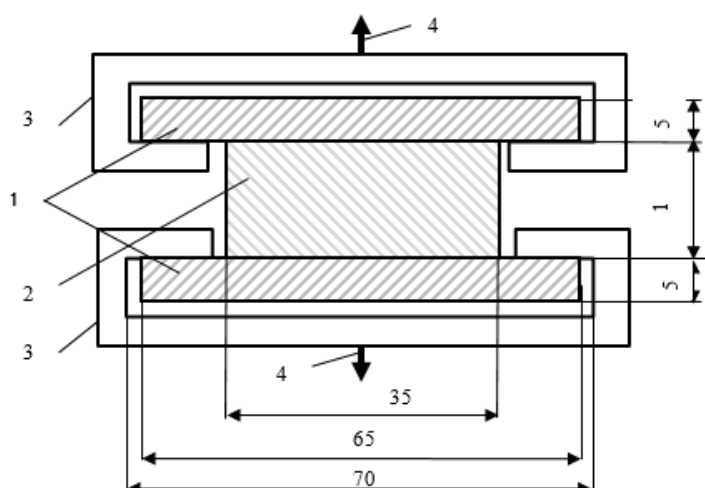


Рис. 3. Схема размещения и испытания образца в захватах: 1 и 2 – соответственно наружные и средняя части образца; 3 – захваты; 4 – растягивающая нагрузка

На рисунке 4 показан исследуемый образец и его установка в приспособлениях (металлических захватах) испытательной машины.

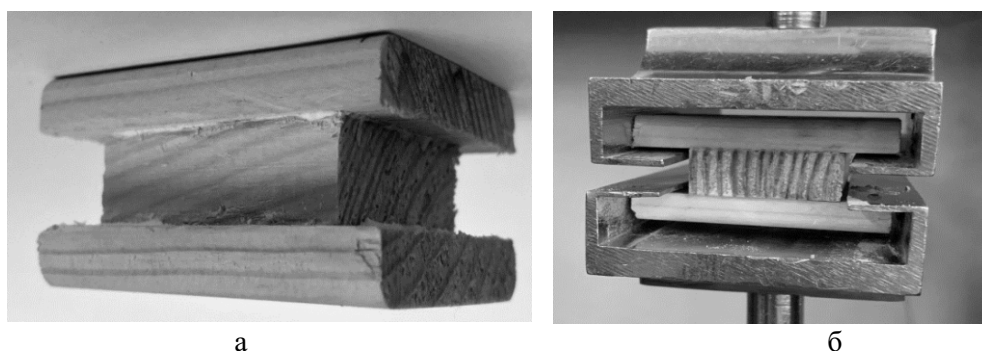


Рис. 4. Исследуемый образец (а) и его установка в приспособлении (металлических захватах) испытательной машины (б)

В качестве примера по реализации предлагаемого метода оценки прочности склеивания при нормальном отрыве приведены результаты исследования по установлению нового состава клея (мастики) при изготовлении багета для художественных рам. В состав клея входит поливинилацетатная дисперсия (ПВА) и гипс, который хорошо совмещается с ПВА. Учитывая, что гипс обладает некоторой адгезией к древесине можно считать его модифицирующей добавкой, уменьшающей продолжительность склеивания.

Исследование проводилось по плану второго порядка В-3. Постоянные факторы: порода – сосна; влажность древесины 8%. Установлены диапазоны варьирования переменных факторов. Переменные факторы варьировались в следующих пределах: количество ПВА (X_1) от 2 до 4 м.ч.; количество воды (X_2) от 3 до 5 м.ч.; количество гипса (X_3) от 4 до 6 м.ч. Уровни и интервалы варьирования переменных факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования переменных факторов

Факторы	Обозначения		Интервал варьирования	Уровни варьирования		
	натуральный вид	кодированный вид		нижний -	основой 0	верхний +
Количество ПВА, м.ч.	П	X_1	1	2	3	4
Количество воды, м.ч.	В	X_2	1	3	4	5
Количество гипса, м.ч.	Г	X_3	1	4	5	6

При проведении эксперимента определяли визуально характер разрушения адгезионное, когезионное или смешанное. Из фотографий образцов после испытания образцов (рисунки 5 и 6) видно, что присутствуют типы разрушений: адгезионный – разрушение происходит по границе «клей – древесина» (рисунок 5); когезионный – разрушение происходит по одному из контактирующих материалов – по древесине (рисунок 6).

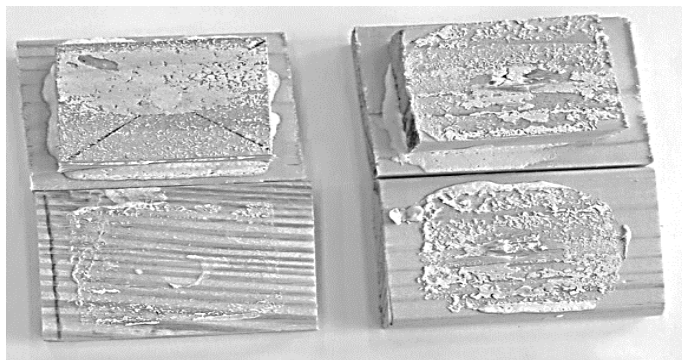


Рис. 5. Адгезионный тип разрушения

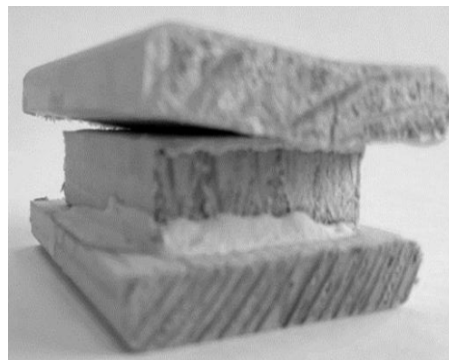


Рис. 6. Когезионный тип разрушения

Установлено, что преобладает адгезионный тип разрушения. Это свидетельствует о возможности увеличения адгезионной прочности клеевого состава.

Определены численные значения адгезионной прочности при нормальном отрыве. Получены математические зависимости прочности склеивания от количества ПВА (X_1), воды (X_2) и гипса (X_3) в кодированном виде:

$$Y = 1,383 + 0,091X_1 - 0,042 X_2 - 0,021 X_3 - 0,341 X_1^2 - 0,158 X_2^2 - 0,455X_3^2 - \\ - 0,065 X_1 X_2 + 0,002 X_1 X_3 - 0,045 X_2 X_3. \\ -1 \leq X_1 \leq +1; \\ -1 \leq X_2 \leq +1; \\ -1 \leq X_3 \leq +1.$$

Влияние переменных факторов на адгезионную прочность (прочность при нормальном отрыве) проиллюстрировано на рисунках 7 и 8.

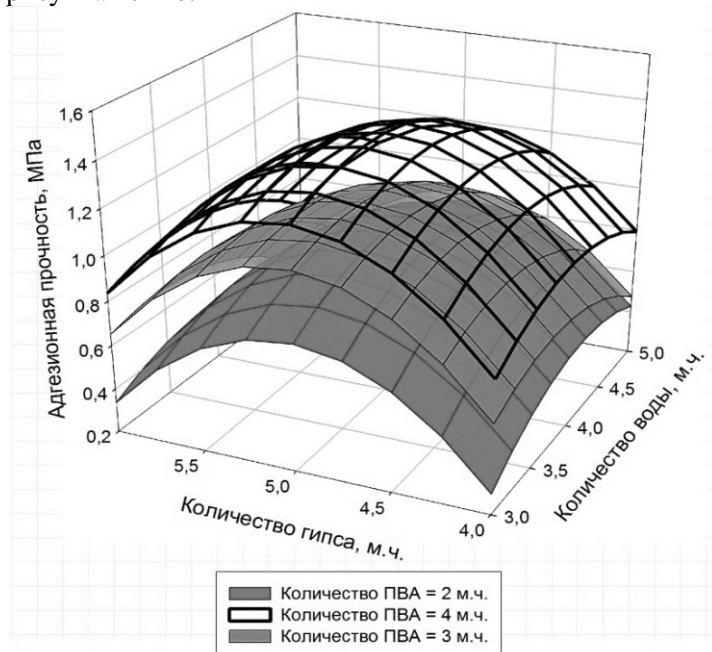


Рис. 7. Влияние гипса и воды адгезионную прочность

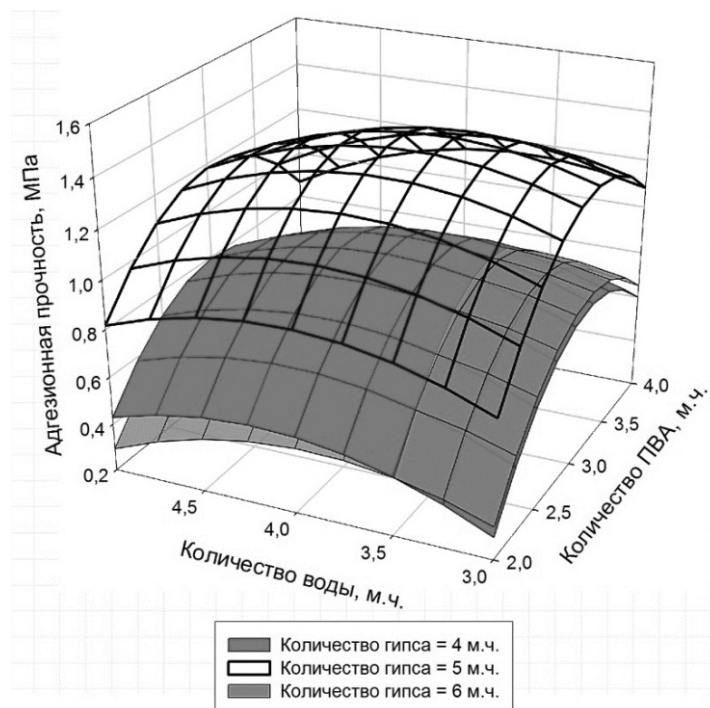


Рис. 8. Влияние количества ПВА и воды на адгезионную прочность

Наибольшее влияние на исследуемый параметр оказывает фактор X_1 - количество ПВА в клее. При увеличении его количества адгезионная прочность возрастает. Установлено соотношение количества ПВА, воды и гипса как 4 : 5 : 4,5.

Закключение

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено следующее.

1. Совершенствование технологии склеивания древесных материалов базируется на разработке новых клеев и клеевых составов, что требует проведения большого количества экспериментов связанных с установлением оценкой прочности склеивания.

2. В большинстве случаев исследователи адгезию оценивают по косвенному критерию - краевому углу смачивания, непостоянному по времени. Стандартный метод определения прочности склеивания при скалывании по клеевому слою достаточно трудоемкий т.к. включает операции по выпиливанию брусков, их склеиванию, повторному выпиливанию из склеенных брусков образцов с соблюдением точных размеров и формы. Поэтому для проведения поисковых экспериментов по выявлению новых клеевых составов разработан новый метод определения адгезионной прочности при нормальном отрыве. Этот метод не представляется альтернативой стандартным методам определения прочности склеивания.

3. При реализации предлагаемого нового метода не требуется механическая обработка для придания склеенным образцам требуемых размеров и формы, т.к. образцы после отверждения клея готовы к испытанию. Прочность склеивания по данному методу оценивается максимальной нагрузкой, необходимой для нормального отрыва слоя. Применяемые приспособления (захваты) просты в изготовлении и надежны при эксплуатации.

4. Приведен пример реализации предлагаемого нового метода оценки адгезии для установления нового состава клея (мастики) при изготовлении багета для художественных рам. Установлено соотношение количества ПВА, воды и гипса как 4 : 5 : 4,5.

Литература

1. Лукаш, А.А. Клееный арболит из древесины мягких лиственных пород // Строительные материалы. – 2016 – №8 – С. 63-65.
2. Лукаш, А.А. Гипсодревесные композиты из отходов переработки мягколиственной древесины Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. –2017.–N4.–С.25-32.

3. Варанкина Г.С., Модификация феноло- и карбаминоформальдегидных смол продуктами производства целлюлозы. / Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский //Клеи. Герметики, Технологии. 2017 № 8 С. 16-20.
4. Иванов А.М., Модификация алюмосиликатами феноло-формальдегидных смол для склеивания фанеры/ А.М. Иванов Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский //Клеи. Герметики, Технологии. 2017 № 3 С. 13-17.
5. Callum, A.S.H. Wood Modification-Chemical, Thermal and Other Processes / A.S.H. Callum. – Chichester: John Wiley & Sons, 2006. – 260 p.
6. Глущенко А.И. Низкотоксичная фурановая смола для производства древесно-стружечных плит / А.И. Глущенко // Деревообрабатывающая промышленность. - 2000. - № 2. - С. 15-16.
7. Леонович А.А. Использование золя кремнезема в качестве адгезива в производстве низкотоксичных древесно-стружечных плит /А.А. Леонович, Л.П. Коврижных // Деревообрабатывающая промышленность. - 1997. -№ 4.-С. 13-14.
8. Чубинский А.Н., Склеивание фанеры модифицированными клеями. / А.Н Чубинский., Г.С. Варанкина //Системы. Методы.Технологии. – 2015. №4 (28) С. 133-137.
9. Hui-wang Cui, Guan-ben Du. Development of a novel polyvinyl acetate type emulsion curing agent for urea formaldehyde resin. Wood Science and Technology, 2013. vol. 47 (1). pp. 105–119. DOI: 10.1007/s00226-012-0489
10. Matthew Edoga. Ethylated Urea-Ether-Modified Urea-Formaldehyde Resins, Part I: Structural and Physic chemical Properties. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2006. vol. 5(9). pp. 121–136.
11. Nadir Ayrimis, Jin-Heon Kwon, Seung-Hwan Lee, Tae-Hyung Han and Chan-Woo Park. Microfibrillated-cellulose-modified urea-formaldehyde adhesives with different F/U molar ratios for wood-based composites. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016. vol. 30(18). pp. 2032–2043. DOI: 10.1080/01694243.2016.1175246
12. Разиньков Е.М. Использование кремнефористого аммония в качестве отвердителя карбаминоформальдегидных смол / Е.М. Разиньков, Л.В. Пономаренко // Известия высших учебных заведений - Лесной журнал. - 2001. - № 5 - 6. - С. 76-80.
13. Глазков С.С. Модификация карбаминоформальдегидных смол латексами / С.С. Глазков, В.С. Болдырев // Деревообрабатывающая промышленность. - 1997. - № 4. - С. 15-18.
14. Плотников, Н.П. Модификация карбаминоформальдегидных связующих для производства ДСтП / Н.П. Плотников, Г.П. Плотникова // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 11. – С. 152 – 158.
15. Попов, В.М. Интенсивная технология создания клеевых соединений повышенной прочности на основе полимерных клеев, подвергнутых совместному воздействию физических полей / В.М. Попов, А.В. Латынин, Д.С. Григорьев // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 4. – С. 89–92.
16. Угрюмов, С.А. Кинетика разбухания и водопоглощения древесностружечных плит с водоотталкивающей добавкой / С.А. Угрюмов, Е.А. Боровков, А. Б. Щербаков // Вестник КГТУ: периодический научный журнал. – Кострома: КГТУ, 2004. – №9. – С. 99 – 101.
17. Цветков, В.Е. Оценка работы адгезии модифицированного фенолформальдегидного олигомера / В.Е. Цветков, С.А. Угрюмов // Лесной вестник. – 2009. – №4. – С. 127 – 129.
18. Шишаков Е.П., Влияние наполнителей и катализаторов на физико-химические свойства карбаминоформальдегидных смол / Шишаков Е.П., Шпак С.И., Чубис П.А., Шевчук М.О. / Е.П.Шишаков, С.И.Шпак, П.А.Чубис, М.О. Шевчук // Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2015. С 102–108.
19. Ebnesajjad, S. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding / S. Ebnesajjad. – Amsterdam: William Andrew, 2014. – 337 p.
20. Zamilova A.F. Influence of polarization of the walnut plywood in the process of preparation on its water and moisture absorption / A.F. Zamilova, M.F. Galikhanov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1767. – pp. 020038.

© Лукаш А.А. – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии деревообработки, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (ФГБОУ ВО «БГИТУ»), e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; Глотова Т.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии деревообработки ФГБОУ ВО «БГИТУ», e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru; Романов В.А. – канд.техн.наук, доцент, заведующий

кафедрой технологии деревообработки, ФГБОУ ВО «БГИТУ», e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru; **Феллух А.** – аспирант кафедры технологии деревообработки ФГБОУ ВО «БГИТУ», e-mail: fellouhabdo@gmail.com; **Чернышев О.Н.** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой механической обработки древесины и производственной безопасности, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: olegch62@mail.ru.

UDC 674.2

DETERMINATION OF BONDING STRENGTH AT NORMAL SEPARATION FOR THE DEVELOPMENT OF NEW ADHESIVE COMPOSITIONS

A.A. Lukash, T.I. Glotova, V.A. Romanov, A. Felluh, O.N. Chernyshev

The article proposes a new method for assessing the strength of adhesive joints at normal separation of the layer, which can be used in the development of new adhesive compositions. The applied modifying additives of various types allow to improve the technological and operational properties of adhesives used in gluing wood. Therefore, the improvement of the technology of glued materials is based on the development of new types of adhesives and adhesive compositions. In the course of research to establish the type and composition of modifying additives, a large number of experiments are carried out related to the establishment of the effect of the adhesive composition on the bonding strength. Currently, in most cases, adhesion is evaluated by an indirect criterion - the wetting edge angle, which is unstable in time due to the absorption of spreading and the absorption of glue by wood. The standard method for determining the strength when chipping along the adhesive layer is quite time-consuming, because it includes operations for sawing out bars, planing into size, subsequent gluing of bars, re-machining of glued bars after complete curing of the glue to give the samples the required size and shape. Which is laborious enough. In order to reduce the complexity of conducting research on the development of new adhesive compositions, a new method for determining the strength of the adhesive joint at normal separation has been developed. The strength of the adhesive according to the proposed method is estimated by the maximum load required for normal separation of the layer. The devices (grips) used are easy to manufacture and reliable during operation. The new proposed method for determining the bonding strength is less time-consuming than the standard method, because repeated machining of glued bars is not required, and the samples after curing the glue have the required dimensions and shape and are ready for testing. An example of the implementation of the proposed new method for assessing the strength of bonding at normal separation for the establishment of a new composition of glue (mastic) in the manufacture of a baguette for art frames is given.

Key words: strength for normal separation, bonding, wood, method, modifying additives.

References

1. Lukash A.A. Glued wood concrete made of soft hardwood. Building materials. 2016 No. 8. pp. 63-65.
2. Lukash, A.A. Gypsum-wood composites from softwood processing waste. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2017. N4. pp.25-32.
3. Varankina G.S., Chubinsky A.N. Modification of phenolic and urea-formaldehyde resins with cellulose production products. // Adhesives. Sealants, Technologies. 2017 No. 8 pp. 16-20.
4. Ivanov A.M., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Modification by aluminosilicates of phenol-formaldehyde resins for gluing plywood // Adhesives. Sealants, Technologies. 2017 No. 3 pp. 13-17.
5. Callum, A.S.H. Wood Modification-Chemical, Thermal and Other Processes / A.S.H. Callum. – Chichester: John Wiley & Sons, 2006. – 260 p.
6. Glushchenko A.I. Low-toxic furan resin for the production of particle boards / A.I. Glushchenko // Woodworking industry. - 2000. - No. 2. - pp. 15-16.
7. Leonovich A.A. The use of silica sol as an adhesive in the production of low-toxic particle boards /A.A. Leonovich, L.P. Kovrizhnykh // Woodworking industry. - 1997. -No 4.- pp. 13-14.
8. Chubinsky A.N., Varankina G.S. Plywood gluing with modified adhesives./ A.N. Chubinsky, G.S. Varankina // Systems. Methods. Technologies. - 2015. No. 4 (28) S. 133-137.

9. Hui-wang Cui, Guan-ben Du. Development of a novel polyvinyl acetate type emulsion curing agent for urea formaldehyde resin. Wood Science and Technology, 2013. vol. 47 (1). pp. 105–119. DOI: 10.1007/s00226-012-0489
10. Matthew Edoga. Ethylated Urea-Ether-Modified Urea-Formaldehyde Resins, Part I: Structural and Physic chemical Properties. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2006. vol. 5(9). pp. 121 - 136.
11. Nadir Ayrimis, Jin-Heon Kwon, Seung-Hwan Lee, Tae-Hyung Han and Chan-Woo Park. Microfibrillated-cellulose-modified urea-formaldehyde adhesives with different F/U molar ratios for wood-based composites. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016. vol. 30(18). pp. 2032–2043. DOI: 10.1080/01694243.2016.1175246
12. Razinkov E.M. The use of fluorosilicate ammonium as a hardener of urea-formaldehyde resins / E.M. Razinkov, L.V. Ponomarenko // News of higher educational institutions - Forestry magazine. - 2001. - No. 5 - 6. - pp. 76-80.
13. Glazkov S.S. Modification of urea-formaldehyde resins with latexes / S.S. Glazkov, B.C. Boldyrev // Woodworking industry. - 1997. - No. 4. - pp. 15-18.
14. Plotnikov, N.P. Modification of urea -formaldehyde binders for the production of particle board / N.P. Plotnikov, G.P., Plotnikova // Bulletin of KrasGAU. - 2013. - No. 11. - pp. 152 - 158.
15. Popov, V.M. Intensive technology for creating glue joints of increased strength on the basis of polymer adhesives subjected to joint influence of physical fields / V.M. Popov, A.V. Latynin, D.S. Grigoriev // Modern trends in the development of science and technology. - 2016. - No. 4. - pp. 89–92.
16. Ugryumov, S.A. Kinetics of swelling and water absorption of particle boards with a water-repellent additive / S.A. Ugryumov, E.A. Borovkov, A.B. Shcherbakov // Bulletin of KSTU: periodic scientific journal. - Kostroma: KSTU, 2004. - No. 9. - S. 99 - 101.
17. Tsvetkov, V.E. Evaluation of the adhesion work of the modified phenol -formaldehyde oligomer / V.E. Tsvetkov, S.A. Ugryumov // Forestry Bulletin. - 2009. - No. 4. - S. 127 - 129.
18. Shishakov E.P. Fillers and catalysts effect on the physicochemical properties of urea-formaldehyde resins / E.P. Shishakov, S.I. Shpak, P.A. Chubis, M.O. Shevchuk // Trudy BGTU [Proceedings of BSTU], series 4. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology, 2015. pp. 102–108.
19. Ebnesajjad, S. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding / S. Ebnesajjad. – Amsterdam: William Andrew, 2014. – 337 p.
20. Zamilova A.F.. Influence of polarization of the walnut plywood in the process of preparation on its water and moisture absorption / A.F. Zamilova, M.F. Galikhanov // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1767. – pp. 020038.

©**Lukash A.A.** – Grand PhD of Technical Sciences, Professor of the Department of woodworking technology, Bryansk State University of Engineering and Technology (BSUET), e-mail: mr.luckasch@yandex.ru; **Glotova T.I.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of woodworking technology, BSUET, e-mail: glotowa.tatjana2016@yandex.ru; **Romanov V.A.** – PhD of Technical Sciences, Head of the Department of woodworking technology, BSUET, e-mail: vromanov62@mail.ru; **Felluh A.** – graduate student of the Department of woodworking technology, BSUET, e-mail: fellouhabdo@gmail.com; **Chernyshev O.N.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Wood Processing and Industrial Safety, Ural State Forestry University, e-mail: olegch62@mail.ru.

УДК 674.816

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Р.Г. Сафин, Д.Б. Просвирников, Г.Р. Арсланова, К. В. Валеев, Д.Ф. Зиатдинова, Д.А. Гурьянов

В работе представлено физическое и математическое описание процесса экстракции фенольных соединений из растительного сырья, в частности из коры и листьев деревьев семейства «Salicaceae». Описана методика проведения экспериментальных и аналитических исследований и процесса экстракции. Определено влияние расхода экстрагента на скорость пропитки частиц. Оптимальное

значение расхода экстрагента, равное 100 л/мин, способствовало более быстрому проникновению растворителя внутрь частиц. Были получены расчетные и экспериментальные значения изменения температуры по слоям материала и кинетика концентрации извлеченных экстрактивных веществ в экстракте. Выявлено, что нагрев слоев материала различается в пределах 1-2 минуты, а полное время нагрева составило 7 минут. Оптимальная длительность процесса экстракции составляет 35-45 минут.

Ключевые слова: математическое описание, экстракция, фенольные соединения, семейство «Salicaceae».

Введение

В настоящее время экстракция отдельных компонентов из различных видов растительного сырья является одним из распространенных технологических процессов во многих отраслях промышленности. Особое внимание уделяется исследованиям в области физиологии и биохимии растительного сырья, связанных с разнообразием и биологическим действием фенольных соединений — веществ вторичного метаболизма, образующихся в растениях [1].

Большинство фенольных соединений являются фармакологически активными веществами, обладающими биологической активностью по отношению к живым организмам. К наиболее распространенным видам фенольных соединений с высокой биологической активностью относят фенолгликозиды и флавоноиды, содержащиеся в коре и листьях деревьев семейства ивовых «Salicaceae» [2, 3].

Главной стадией в процессе извлечения фенольных соединений является процесс экстракции. Суть процесса заключается в выделении полезных веществ из пористого твердого тела путем избирательной растворимости. Экстрагирование происходит путем диффузии извлекаемых веществ из пор растительных клеток в окружающую жидкую среду [4,5]. При экстрагировании древесного сырья и зелени наблюдаются следующие стадии:

- 1) проникновение экстрагента в сырье через первичную и вторичную стенки растительной клетки;
- 2) смачивание веществ, находящихся внутри клеток;
- 3) растворение веществ, находящихся в полостях клетки на ее стенках;
- 4) массоперенос веществ через клеточные стенки путем молекулярной диффузии;
- 5) массоотдача веществ от поверхности материала в окружающую жидкую среду.

Из основного уравнения массопередачи следует, что количество вещества, продиффундировавшего через некоторый слой, прямо пропорционально времени экстракции. Однако необходимо стремиться к максимальному извлечению в кратчайшие сроки, максимально используя все прочие факторы, ведущие к интенсификации процесса. Слишком высокая продолжительность процесса экстракции приводит к загрязнению вытяжек сопутствующими веществами [6].

На подвижной границе (фронте растворения) концентрация раствора равна концентрации насыщения. В периферийном слое создается поле концентраций, изменяющееся в пространстве и времени. Его можно представить в виде поверхностей одинаковых концентраций (изоконцентрационных), постепенно перемещающихся вглубь пористого тела. Их вид зависит от размеров, формы и структуры пористого тела, размеров и формы пор. На поверхности пористого тела концентрация извлекаемого компонента меньше, и больше, чем в основном объеме растворителя. Скорость диффузии вещества от фронта растворения к поверхности пористой частицы меньше скорости молекулярной диффузии вследствие извилистости пор, блокировки диффузионного потока инертным скелетом, торможения движения молекул стенками пор и других факторов [7,8]. При экстрагировании растительного сырья происходят три типа процессов – внутренний массоперенос, массоперенос через диффузионный подслои и конвективный массоперенос [9].

Целью работы является математическое описание и анализ результатов математического моделирования и экспериментальных данных процесса экстракции фенольных соединений.

Материалы исследований и математическое описание процесса экстракции фенольных соединений

На установке для циркуляционной экстракции (рис.1) были проведены экспериментальные исследования по экстракции фенольных соединений. Для исследования использовали измельченное

сырье - кора и листья ивы (*Salix*) и осины (*Populus tremula*) семейства (*Salicaceae*), собранные в Республике Татарстан в Лаишевском районе в период май-июнь 2018-2020 гг., проходящее сквозь сито с диаметром отверстий 2 мм.

Измельченный материал помещался в экстрактор установки (рис. 1), в который также подавался экстрагент (водно-этанольный раствор). Экстрагент, проходя через слой сырья сверху вниз, пропитывал его, насыщался экстрактивными веществами и, при помощи циркуляционного насоса 8, поступал в нижнюю часть испарителя 6, где нагревался и выпаривался. Образовавшиеся пары экстрагента поднимались в конденсатор паров 5, где конденсировались. Конденсат эжекторным насосом 4, через нагревательный элемент 3, вновь подавался в верхнюю часть экстрактора 1. Оставшийся выпаренный экстракт сливался и поступал на сушку.

Сырье и экстрагент имели начальную температуру 20 °С. Экстрагент, концентрация этанола в котором варьировалась от 40 до 80 %, подавался в верхнюю часть экстрактора посредством работы циркуляционного насоса, прокачивающего экстрагент через проточный нагревательный элемент. Температура экстрагента варьировалась от 25 до 75 °С.

При исследовании процесса пропитки материала экстрагентом во время экстракции каждые 4 минуты после подачи экстрагента отбирались пробы и весовым методом определялось содержание экстрагента в материале. Расход экстрагента регулировался вентилем и расходомером и составлял 20, 60, 100 л/мин. Начальное влагосодержание сырья составило 60 % [10].

Также, при нагревании сырья во время циркуляции экстрагента, измерялась температура в слоях материала на высотах 15, 250, 490 мм. Общая высота слоя материала составляла 500 мм.

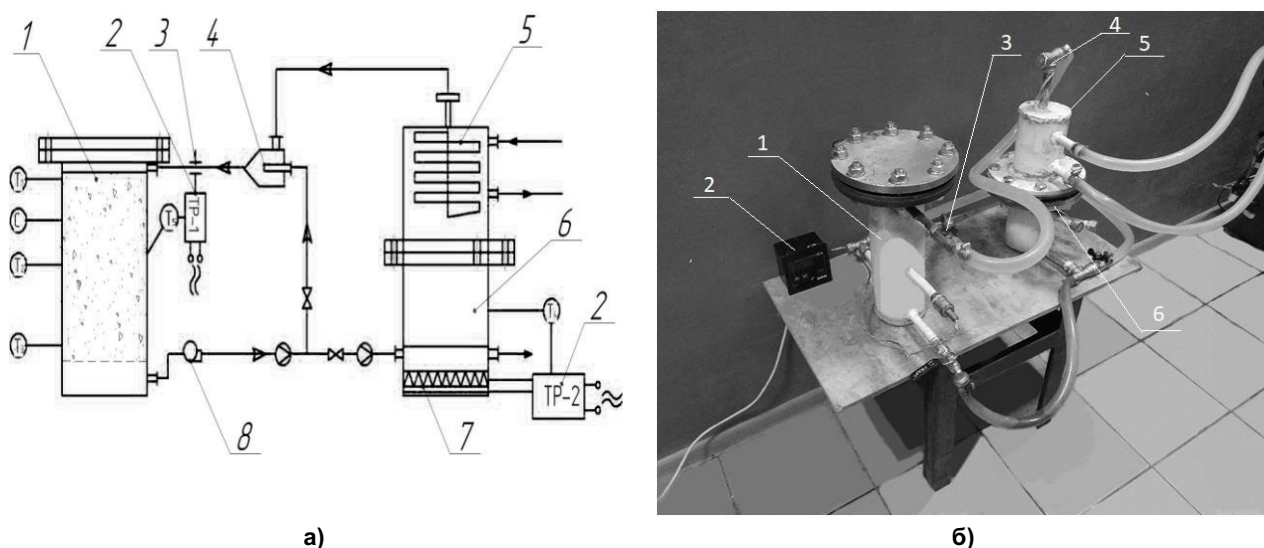


Рис. 1. Экспериментальная установка для экстракции растительного сырья: принципиальная схема (а) и внешний вид (б): 1 – экстрактор; 2 – регулятор температуры; 3 – проточный нагревательный элемент; 4 – эжекторный насос; 5 – конденсатор паров; 6 – испаритель; 7 – индукционная плита; 8 – циркуляционный насос

Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений состоит из уравнения движения жидкости в капилляре частицы с принудительной циркуляцией экстрагента, которое запишется в виде полной скорости движения жидкости (м/с) [11]:

$$V_n = \frac{\cos \theta}{4} \frac{\sigma}{\mu_{жс}} \frac{r}{l_q} \varphi_{тр} \cdot g \cdot \cos \varphi \cdot \tau + \frac{r^2 \Delta p}{2 \mu_{жс} l_{жс}}. \quad (1)$$

где r – радиус капилляра, м; θ – краевой угол смачивания пропитывающим раствором поверхности материала; l_q – толщина частицы, м; $\mu_{жс}$ – вязкость пропитывающего раствора, Па·с; σ – поверхностное натяжение пропитывающего раствора, Н/м; τ – время пропитки, с; $\varphi_{тр}$ – коэффициент трения; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ – угол наклона частиц; Δp – разность давлений снаружи и внутри частицы, Па.

В уравнении (1) первое слагаемое – скорость, приобретаемая жидкостью от сил капиллярного всасывания, второе – скорость, теряемая жидкостью от сил трения, третье – скорость, приобретаемая жидкостью от сил, возникающих при наличии принудительной циркуляции (закон Пуазейля).

Изменение содержания экстрагента в частице описывается уравнением [12]:

$$\frac{dC_{\varepsilon}}{dl_q} = - \frac{j_{\text{жс}}}{k_m \cdot \rho_{0q}}. \quad (2)$$

Учитывая, что поток жидкости в частице определяется поперечными размерами пор или пористостью частицы ε и скоростью жидкости v_n :

$$j_{\text{жс}} = v_n \rho_{\text{жс}} \varepsilon \quad (3)$$

в котором v_n , определяется по (1), можно записать:

$$\frac{dC_{\varepsilon}}{dl_q} = - \frac{v_n \rho_{\text{жс}} \varepsilon}{k_m \cdot \rho_{0q}}. \quad (4)$$

Поделив обе части (4) на $d\tau$, или, если учесть, что $dl_q = v_n d\tau$, получим:

$$\frac{dC_{\varepsilon}}{d\tau} = - \frac{v_n \rho_{\text{жс}} \varepsilon}{k_m \cdot \rho_{0q}} \frac{dl_q}{d\tau} \quad (5)$$

или

$$\frac{dC_{\varepsilon}}{d\tau} = - \frac{v_n^2 \rho_{\text{жс}} \varepsilon}{k_m \cdot \rho_{0q}}. \quad (6)$$

В уравнении (6) коэффициент массопроводности ($\text{м}^2/\text{с}$) k_m можно определить расчетным или экспериментальным путем.

Изменение температуры частицы во время принудительного обтекания нагретым экстрагентом описывается выражением [13]:

$$\frac{\partial l_{cl}}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t_{cl}}{\partial l_{cl}^2} \quad (7)$$

с начальным условием

$$t_{cl}(0, l_{cl}) = t_{clнач} \quad (8)$$

и граничным условием

$$\alpha(t_{\varepsilon} - t_{cl}) = - \lambda_{cl} \frac{\partial t_{cl}}{\partial l_{cl}} \Big|_{l_{cl}=0}, \quad (9)$$

где коэффициент теплоотдачи может быть определен как [14]:

$$\alpha = 0.01 \frac{\lambda}{h} (\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot Ga)^{1/3} \quad (10)$$

в случае турбулентного обтекания, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$ и:

$$\alpha = 0.67 \frac{\lambda}{h} \text{Re}^{1/3} \cdot \text{Pr}^{1/2} \cdot Ga^{2/9} \quad (11)$$

в случае ламинарного, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$.

Безразмерные критерии, входящие в (10), (11), имеют следующие значения: $\text{Re} = \frac{4\delta^*}{\mu g}$, где δ^* – плотность орошения в $\text{кг}/\text{м} \cdot \text{сек}$, то есть количество жидкости, орошающей 1 м периметра частицы в сек;
 $\text{Pr} = \frac{3600 C_{\varepsilon} \mu g}{\lambda}$; $Ga = \frac{g h^3}{\nu^2}$, где h – высота поверхности, м.

Коэффициент температуропроводности a в (7) определяется по формуле:

$$a = \frac{\lambda_{cl}}{c_{cl} \rho_{cl}}. \quad (12)$$

Поток диффундирующего растворенного вещества (экстрактивные вещества) опишется согласно первому закону Фика ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и определится как:

$$j_{\text{эв}} = D_{\text{эв}} \frac{dC_{\text{эв}}}{dl_q}, \quad (13)$$

где $C_{\text{эв}}$ – концентрация экстрактивных веществ, %; $D_{\text{эв}}$ – коэффициент диффузии, зависящий от параметров растворителя, проникающих частиц и температуры, см²/с, l_q – длина частицы.

Выразив из (13) $C_{\text{эв}}$ и дифференцируя по $\partial\tau$, получим:

$$\frac{dC_{\text{эв}}}{d\tau} = - \frac{j_{\text{эв}}}{D_{\text{эв}}} \frac{dl_{\text{сл}}}{d\tau}, \quad (14)$$

где $j_{\text{эв}} = \frac{dG_{\text{эв}}}{A_{\text{уд}} m_{\text{сл}} d\tau}$, а $\frac{dl_{\text{сл}}}{d\tau} = v_n$ – скорость движения жидкости, определяемая по уравнению (1), $G_{\text{эв}}$ – количество диффундирующих экстрактивных веществ, г; τ – продолжительность процесса диффузии, с; $m_{\text{сл}}$ – масса слоя, г; $A_{\text{уд}}$ – удельная поверхность частиц материала, м²/г.

В упрощенном виде уравнение (14) запишется в виде:

$$\frac{dC_{\text{эв}}}{d\tau} = - \frac{j_{\text{эв}} v_n}{D_{\text{эв}}}. \quad (15)$$

Коэффициент диффузии $D_{\text{эв}}$ (для каждого вида экстрактивных веществ имеет свои значения), который можно назвать коэффициентом массопроводности, по своей величине значительно ниже коэффициента свободной диффузии вследствие уменьшения площади переноса вещества (влияние пористости и капиллярной структуры пористого тела) [15].

Для решения уравнений, представленных в выше, был выбран метод конечных разностей [16], в основе которого лежит замена дифференциальных уравнений конечно-разностными выражениями. Блок-схема алгоритма расчета, позволяющая моделировать все стадии процесса экстракции фенольных соединений, представлена на рис. 2.

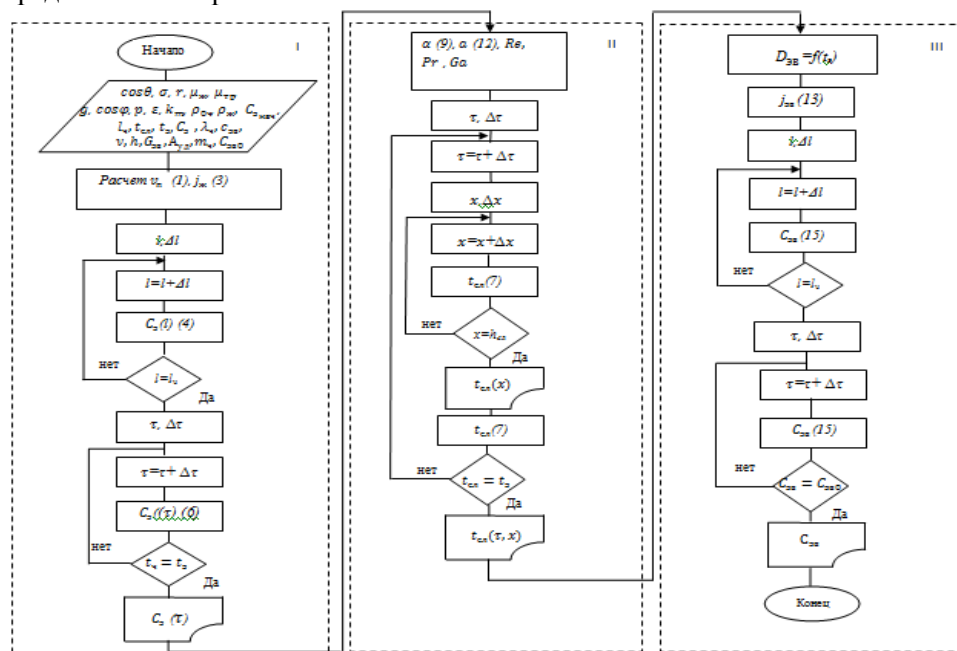


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета процесса экстракции фенольных соединений

Алгоритм расчета поделен на 3 секции: 1-ая секция позволяет рассчитать параметры процесса пропитки растительного сырья в присутствии экстрагента, 2-ая секция позволяет рассчитать изменение температуры, 3-я секция описывает расчет концентрации экстракта.

Таким образом, полученные данные в каждой секции, являются исходными данными для решения последующей секции. Для реализации представленного алгоритма расчета были использованы такие среды программирования как QBasic, MS Excel [17].

Анализ результатов математического моделирования и экспериментальных данных процесса экстракции фенольных соединений

Для анализа представленного математического описания были просчитаны ключевые дифференциальные уравнения (6), (7), (15), и использованы экспериментальные значения, полученные на установке (рис. 1)

Результаты измерения содержания экстрагента в сырье и расчетов уравнения (6) представлены на рис. 3. Точками показаны экспериментальные значения (по 2 параллельных опыта), линиями – расчетные значения.

Как видно из рис. 3 достижение максимального содержания экстрагента в сырье наблюдается для всех трех случаев подачи экстрагента с разницей примерно в 0,5-1 мин. Увеличение расхода экстрагента (при одинаковой температуре 75 °С) способствует более быстрому проникновению его внутрь частиц, что объясняется гидродинамикой потока в слое измельченных частиц. Увеличивая скорость подачи экстрагента, увеличивается перепад давления в слоях материала, что способствует ускорению процесса пропитки. Так, увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин способствует увеличению конечного содержания экстрагента в сырье на 6 %. При проведении процесса экстракции нельзя ограничиваться лишь естественной пропиткой, это приводит к увеличению продолжительности экстракции. Поэтому, интенсификация пропитки путем создания циркуляционного потока обеспечивает быстрый старт процессов экстракции [9].

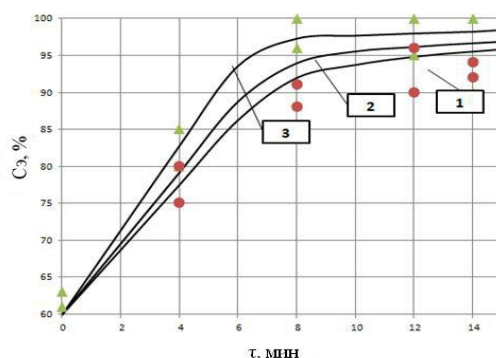


Рис. 3. Кинетика пропитки при различных расходах экстрагента: 1 – 20 л/мин, 2 – 60 л/мин, 3 – 100 л/мин

Также повышенные скорости жидкости способствуют отведению извлеченных веществ из слоя материала, что при условии подачи свежего экстрагента с постоянной концентрацией растворителя создает максимальный градиент концентраций.

На рис. 4. представлены результаты расчета и экспериментальные значения (точки) распределения температуры в слоях материала при нагревании во время циркуляции экстрагента. Как видно из рис. 4 первый слой (490 мм), наиболее близкий к подаче горячего экстрагента (температура 75 °С), нагревается быстрее остальных. Однако нагрев остальных слоев наблюдается с небольшим отставанием (1-2 мин), что в условиях продолжительной экстракции (до 60 мин) не является препятствием.

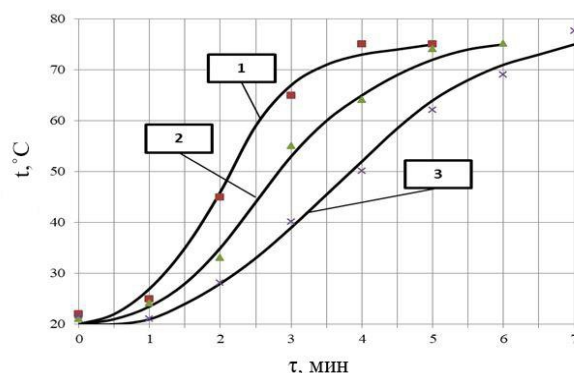


Рис. 4. Кинетика температуры по слоям материала при циркуляционной экстракции: 1 – высота слоя 490 мм, 2 – высота слоя 250 мм, 3 – высота слоя 15 мм

На рисунке 5 представлены кинетические зависимости концентрации извлеченных веществ в экстрактах ивы и осины, а также расчетные значения изменения концентраций. Экстракция проводилась с концентрацией экстрагента 80 %.

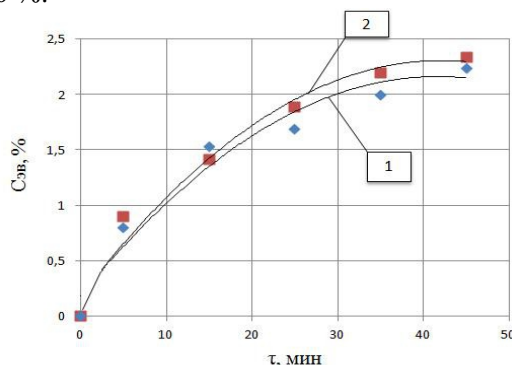


Рис. 5. Кинетические зависимости концентрации извлеченных экстрактивных веществ в экстракте: 1 – осина, 2 – ива

Исследования показывают, что экстрагирование растительного сырья в течение 35–45 минут показывает одинаковый суммарный максимальный выход извлеченных экстрактивных веществ в целом.

Заключение

В соответствии с физикой процесса экстракции растительного сырья разработано математическое описание процесса экстракции фенольных соединений. По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение расхода экстрагента способствует более быстрому проникновению растворителя внутрь частиц и ускорению отведения извлеченных веществ из слоя материала. Увеличение расхода экстрагента с 20 до 100 л/мин способствует увеличению конечного содержания экстрагента в сырье на 6 %. Определено, что распределение температуры в слоях материала достигает своего максимума в течение 7 минут, а оптимальная длительность процесса экстракции составляет 35–45 минут.

Литература

1. Пояркова Н. М., Сапарклычева С. Е. Физиологическая роль фенольных соединений // Аграрное образование и наука. – 2019. – № 4. – С. 14
2. Литвиненко В. И. Химия природных флавоноидов и создание препаратов при комплексной переработке растительного сырья: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: 15.00.02. – Харьков: ХНИИХФИ, 1990. – 29 с.
3. Сафина А.В., Арсланова Г.Р., Тимербаева А.Л., Зиятдинова Д.Ф. Анализ современного состояния технологий процесса экстракции биологически активных веществ из осины и ивы // Деревообрабатывающая промышленность. – 2019. - №4. - С. 51-62.
4. Жматова Г. В. Методы интенсификации технологических процессов экстрагирования биологически активных веществ из растительного сырья // Вестник ТГТУ. – 2005. –Т. – 11. - № 3. – 1085 с.
5. Просвирников Д. Б., Арсланова Г. Р. Исследования процесса экстракции и фенольных соединений коры осины и ивы // Международная научно-практической конференции «История, современное состояние и перспективы инновационного развития науки». – Самара, 2021. - С. 75-78.
6. Сафина А. В., Арсланова Г. Р., Зиятдинова Д. Ф., Ахметова Д. А., Сафин Р. Г., Халитов Р. А. Определение коэффициента массопроводности с учетом сложного строения растительных клеток в процессе экстракции // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 1. – С. 33-44.
7. Сафина А. В., Тимербаев Н. Ф., Зиятдинова Д. Ф. Экстракция ценных компонентов из лесосечных отходов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – Архангельск: «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – 2018. – № 1. – С. 109-119.
8. Сафина А. В., Арсланова Г. Р., Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Халитов Р. А. Моделирование процесса экстрагирования биологически активных веществ из осины и ивы // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 2. – С. 56-63.
9. R. G. Safin D. B. Prosvirnikov G. R. Arslanova Parametric Multidimensional Modeling of Extraction Processes in the Wood Chemical, Food and Pharmaceutical Industries // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). – 2021. –pp. 286-297.

10. Просвириков Д. Б., Арсланова Г. Р., Сафина А. В., Сафин Р. Г., Зиятдинова Д. Ф. Сравнительное исследование фенольных соединений листьев и коры деревьев семейства «Salicaceae» // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 55-66.
11. Азаров В. И. Химия древесины и синтетических полимеров: учебное пособие. – 5-е изд., испр. – СПб: Издательство «Лань», 2010. – 624 с.
12. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование. Система твердое тело -жидкость. – Ленинград: Химия, 1974. – 256 с.
13. Матвеев Е. В. Математическая модель процесса экстракции древесной зелени *Juniperus sibirica* водным раствором этилового спирта // Материалы международной заочной научной конференции «Проблемы современной аграрной науки». – Красноярск, 2015. – С. 169-174.
14. Измайлов А. В., Мальцев П. М., Мицкевич Э. Г. Математическое моделирование установившихся состояний противоточных экстракционных процессов // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – № 5. – С. 651-653.
15. Просвириков Д. Б., Сафин Р. Г., Арсланова Г. Р. Многофакторное параметрическое моделирование процесса экстракции кверцетина из листьев ивы (*Salix*) семейства (*Salicaceae*) // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 3 (51). – С. 143-150.
16. Petrovic S. S., Ivanovic J., Milovanovic S., Zizovic I. Comparative analyses of the diffusion coefficients from thyme for different extraction processes // Journal of the Serbian Chemical Society. 2012, 77, pp. 799-813.
17. Prosvirnikov, D. B. Modelling heat and mass transfer processes in capillary-porous materials at their grinding by pressure release // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). International Conference on. – IEEE– 2017. – pp. 1-7.

© Сафин Р.Г. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: safin@kstu.ru; Просвириков Д.Б. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; Арсланова Г.Р. – ассистент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: 94arslanovagulshat@mail.ru; Валеев К.В. – аспирант кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kirval116@mail.ru; Зиятдинова Д.Ф. – д-р техн. наук, профессор, кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; Гурьянов Д.А. – аспирант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ».

UDC 674.816.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE EXTRACTION PROCESS OF PHENOLIC COMPOUNDS

R.G. Safin, G.R. Arslanova, K.V. Valeev, D.F. Ziatdinova, D.A. Guryanov

The paper presents a physical and mathematical description of the process of extraction of phenolic compounds from plant raw materials, in particular from the bark and leaves of trees of the family "Salicaceae". The method of conducting experimental and analytical studies and the extraction process is described. The effect of the extractant consumption on the rate of impregnation of particles is determined. The optimal value of the extractant flow rate, equal to 100 l/min, contributed to a faster penetration of the solvent into the particles. Calculated and experimental values of temperature changes over the layers of the material and the kinetics of the concentration of extracted extractives in the extract were obtained. It was revealed that the heating of the material layers varies within 1-2 minutes, and the total heating time was 7 minutes. The optimal duration of the extraction process is 35-45 minutes.

Key words: mathematical description, extraction, phenolic compounds, family "Salicaceae".

References

1. Poyarkova N. M., Saparklicheva S. E. [The physiological role of phenolic compounds] Agrarnoe obrazovanie i nauka [Agricultural education and science]. – 2019. – № 4. – pp. 14. (InRuss.).
2. Litvinenko V. I. [Himiya prirodnih flavonoidov i sozдание preparatov pri kompleksnoi pererabotke rastitelnogo sirya] avtoref. dis. d-ra him. nauk 15.00.02. – 1990. – P. 29. (InRuss.).

3. Safina A. V., Arslanova G. R., Timerbaeva A. L., Ziatdinova D. F. [Analysis of the current state of technology for the extraction of biologically active substances from aspen and willow] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2019 - № 4. - pp. 51-62. (InRuss.).
4. Jmatova G. V. [Methods of intensification of technological processes of extraction of biologically active substances from plant raw materials] *Vestnik TGTU* [Bulletin of TSTU]. – 2005. – V. – 11. - № 3. – 1085 pp.
5. Prosvirnikov D. B., Arslanova G. R. [Studies of the extraction process of phenolic compounds of aspen and willow bark] *Mejdunarodnaya nauchno_prakticheskoi konferencii «Istoriya_sovremennoe sostoyanie i perspektivi innovacionnogo razvitiya nauki»* [International scientific and practical conference "History, current state and prospects of innovative development of science"]. – Samara 2021. – 75–78. pp. (InRuss.).
6. Safina A. V., Arslanova G. R., Ziatdinova D. F., D. A. Ahmetova, R. G. Safin, R. A. Halitov. [Determination of the mass conductivity coefficient taking into account the complex structure of plant cells during extraction] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. – 2020. - №1. - pp. 33-43. (InRuss.).
7. Safina A. V., Timerbaev N. F., Ziatdinova D. F., Arslanova G. R. [Extraction of valuable components from logging waste] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal.* – Arhangel'sk: «Severnyj (Arkticheskij) federal'nyj universitet imeni M.V. Lomonosova» [News of higher educational institutions. Forest magazine. - Arkhangelsk: "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov"]. 2018 - № 1. - pp. 106-119. (InRuss.).
8. Safina A. V. Arslanova G. R. Ziatdinova D. F. Safin R. G. Halitov R. A. [Modeling of the extraction process of biologically active substances from aspen and willow] *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2020 - № 2. - pp. 56-63. (InRuss.).
9. R. G. Safin D. B. Prosvirnikov G. R. Arslanova Parametric Multidimensional Modeling of Extraction Processes in the Wood Chemical, Food and Pharmaceutical Industries // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021).* – 2021. –pp. 286-297. (InRuss.).
10. Prosvirnikov D. B. Arslanova G. R. Safina A. V. Safin R. G. Ziatdinova D. F. Comparative study of phenolic compounds of leaves and bark of trees of the family «Salicaceae» *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost* [Woodworking industry]. 2021 - № 3. - pp. 55-66. (InRuss.).
11. Azarov V. I. [Chemistry of wood and synthetic polymers: a textbook] 5_e izd._ ispr. – SPb Izdatelstvo «Lan» [5th ed., ispr. - St. Petersburg: Publishing House «Lan»]. – 2010. – P. 624.
12. Akselrud G.A., Lisyanskii V.M. [Extraction «solid-liquid system»]. L.: « Chemistry ». - 1974. pp. 256.
13. Matveenkov E. V. [Mathematical model of the extraction process of Juniperus sibirica burgsd woody greenery with an aqueous solution of ethyl alcohol] *Materiali mejdunarodnoi zaochnoi nauchnoi konferencii «Problemi sovremennoi agrarnoi nauki»* [Materials of the international correspondence scientific conference "Problems of modern agricultural science"] – Krasnoyarsk – 2015. – 169-174 pp. (InRuss.).
14. Izmailov A. V. Malcev P. M. Mickevich E. G. [Mathematical modeling of steady states of countercurrent extraction processes] *Teoreticheskie osnovi himicheskoi tehnologii.* [Theoretical foundations of chemical technology]. –1975. – № 5. –. 651-653 pp. (InRuss.).
15. Prosvirnikov D. B. Safin R. G. Arslanova G. R. [Multivariate parametric modeling of quercetin extraction process from willow leaves (Salix) family (Salicaceae)] *Sistemi. Metodi. Tehnologii* [The system. Methods. Technologies] – 2021. – № 3 (51). – 143-150 pp. (InRuss.).
16. Petrovic S. S., Ivanovic J., Milovanovic S., Zizovic I. Comparative analyses of the diffusion coefficients from thyme for different extraction processes // *Journal of the Serbian Chemocal Society.* 2012, 77, pp. 799-813.
17. Prosvirnikov, D. B. Modelling heat and mass transfer processes in capillary-porous materials at their grinding by pressure release // *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* – IEEE– 2017. – pp. 1-7.

© **Safin R.G.** - Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Processing of wood materials, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: safin@kstu.ru; **Prosvirnikov D.B.** – Grand PhD in Engineering sciences, professor of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: prosvirnikov_dmi@mail.ru; **Arslanova G.R.** - Assistant of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: 94arslanovagulshat@mail.ru; **Ziatdinova D.F.** - Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; **Valeev K.V.** – postgraduate student of the Department of Processing of wood materials, KNRTU, e-mail: kirval116@mail.ru; **Guryanov D.A.** – postgraduate student of the Department of Processing of wood materials, KNRTU.

УДК 674.81

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАСТИКОВ БЕЗ СВЯЗУЮЩЕГО ПО ПОТЕРИ МАССЫ ПРИ БИОРАЗЛОЖЕНИИ

А.В. Артёмов, А.С. Ершова, В.Г. Бурындин, А.В. Савиновских

Данное исследование посвящено установлению зависимости изменения прочностных показателей (прочности при изгибе) пластиков без связующего (ПБС) в зависимости от потери массы при экспозиции в почво-грунте на биоразлагаемость. Были получены зависимости «прочность при изгибе – потеря массы» для ПБС на основе опилок сосны и шелухи пшеницы при экспозиции образцов в течение 30 суток в почво-грунте. С целью подтверждения полученных закономерностей были проведены испытания на биоразложение по отношению к почво-грунту в течение 90 суток пластиков полученных на основе древесного (опилки сосны, лиственницы и березы) и недревесного растительного (шелуха пшеницы, костра конопли и биомасса борщевика) сырья. Полученные результаты показали, что использование полученных зависимостей «потери массы – прочность при изгибе» рекомендуется применять с целью прогнозирования прочности при изгибе ПБС только на основе древесного сырья и при экспозиции в почво-грунте до 30 суток.

Ключевые слова: лигноуглеводные материалы, пластик, биоразложение, прочность при изгибе, потеря массы

Введение

Изделия из древесины и пластики на ее основе широко применяются в строительстве. Они используются как стеновой материал, для изготовления дверей, полов, потолков, а также отделанные декоративными материалами древесные пластики применяются для внутренней облицовки зданий.

В условиях закрытого доступа при прямом контакте с железобетонными или кирпичными стенами, под влиянием выпадающего конденсата древесные материалы увлажняются. Это способствует развитию на них грибной флоры. Кроме грибов повреждения древесных материалов вызывают насекомые.

Одним из наиболее распространенных способов защиты древесных материалов от биоповреждений является использование химических соединений (лакокрасочные материалы, антисептики, антипирены и проч.), обладающих, в том числе биоцидным действием [1].

Так в работе [2] выполнен статистический анализ полученных результатов в ходе исследований, определяющих возможность применения раствора, содержащего наноразмерные частицы серебра, в качестве биоцида для древесины, используемой в жестких условиях эксплуатации (повышенная влажность и температура). Результаты анализа показали высокую эффективность обработки древесины сосны и осины, относя исследуемый препарат к числу невымываемых защитных средств, что дает возможность получения экологически чистой, биозащищенной, дешевой древесины с большим эксплуатационным ресурсом, что крайне актуально в жестких условиях эксплуатации.

Кроме того возможно использование частиц наносеребра с целью получения с антимикробными свойствами биокompозитных пленок на основе полимолочной кислоты и термически обработанной древесной муки [3].

Один из способов защиты изделий на основе древесного сырья – это термомодификация последнего [4]. Установлено, что термомодифицированная древесина более чем обычная древесина, устойчива к биоповреждениям, таким как бурая трещиноватая гниль и плесень. Улучшение биостойкости связано со снижением гemicеллюлозы, так как многие грибки используют её сахарозные составляющие в качестве своей питательной среды [5].

Использование же самой биостойкой древесины (например, лиственницы), обладающей естественной стойкостью к воздействию дереворазрушающих грибов *Coniophora puteana* и *Gloeophyllum sepiarium*, позволяет получать фанеры и LVL с увеличенной прочностью и долговечностью [6].

Один из критериев использования химических реагентов для защиты изделий на основе древесины – это не ухудшение физико-механических показателей изготавливаемых материалов [1].

Полученные в работе [7] данные позволяют говорить об отсутствии отрицательного влияния глубокой пропитки древесины огнезащитными составами на ее прочностные свойства, что определяет

целесообразность проведения дальнейших исследований, направленных на выявление особенностей влияния различных антипиренирующих составов на показатели элементов деревянных конструкций.

Применение парафиновой эмульсии при производстве композиционной фанеры позволяет препятствовать сорбции воды, повышая её водостойкость [8], а использование кремнеорганических веществ – при получении ДВП [9].

Получение пластиков без добавления связующих (ПБС) осуществляется путем термопезообработки различных видов древесного и недревесного растительного сырья [10].

Такое сырьё для ПБС как древесная мука и опилки, плодовые оболочки злаков, волокна льна и конопля относятся к материалам, подвергающимся деструкции микробно-ферментативным путем [11-13].

В работе [14] при микроскопии образцов ПБС после 21 суток экспозиции в активном грунте на 100% образцов выявлены признаки роста плесневых грибов. Множественные крупные колонии плесневых грибов в разной фазе зрелости обнаружили на 62% ПБС.

Авторы [15-17], с целью повышения биостойкости материалов на основе ПБС, предлагают использовать различные химические добавки, такие как гидрофобизаторы, антисептики и модификаторы.

На сегодня существует более 200 различных методов испытаний разнообразных промышленных и строительных материалов на биостойкость. Наибольшая испытаний на биостойкость определяется методом визуальной оценки, а также проверкой некоторых физико-технических параметров исследуемых изделий, таких как убыль веса, прочность на разрыв и сжатие, удельное объемное и поверхностное сопротивление, tg угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость и т.д., которые могут изменяться при биологических повреждениях [18].

Отмечено [19], что существующие методы исследования биостойкости нельзя считать объективными, они требуют дополнений и уточнений, так как кроме стандартных тест-культур, истинными деструкторами материалов являются и другие микроскопические грибы.

В частности для изделий на основе древесины лиственницы под воздействием грибов *Coniophora putearia* и *Gloeophyllum seriarium* при помощи экспериментально полученных величин потерь массы вычислена константа разложения и теоретическое время полуразложения половину той массы образца, которую гриб способен разложить [20].

Исходя из выше сказанного, в работе поставлена цель – исследование биоразлагаемости ПБС по отношению к почво-грунту для установления зависимости изменения прочности образцов от потери массы при их экспозиции за установленное время, а также сравнительный анализ биоразлагаемости образцов на основе сосновых опилок и шелухи пшеницы с материалами ПБС на основе другого древесного и недревесного растительного сырья.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве исходного сырья использовались древесные опилки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и шелуха пшеницы (*Triticum*). В качестве объектов сравнения принято сырьё на основе древесного (опилки лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), опилки березы (*Betula*)) и недревесного растительного сырья (костра конопля технической (*Cannabis sativa* L.), биомасса борщевика Сосновского (*Heracleum Sosnowskyi* Manden)).

Фракционный состав сырья – 0,7 мм. Влажность исходного пресс-сырья – 12 %.

Морфологические и химические показатели исходного пресс-сырья представлены в табл.1.

Таблица 1 – Морфологические и химические показатели пресс-сырья

№	Сырье	Источник образования	Показатель, %	
			Лигнин (ГОСТ 11960)	Целлюлоза (Кюришнера-Хоффера)
1	Опилки сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i>)	Отходы пилорамы	31	45
2	Шелуха пшеницы (<i>Triticum</i>)	Отходы растительных остатков	21	21
3	Опилки лиственницы сибирской (<i>Larix sibirica</i>)	Отходы пилорамы	38	36
4	Опилки березы (<i>Betula</i>)	Отходы пилорамы	32	43
5	Костра конопли технической (<i>Cannabis sativa</i> L.)	Отходы растительных остатков	27	28
6	Биомасса борщевика Сосновского (<i>Heracleum Sosnowskyi</i> Manden)	Отходы растительных остатков	26	34

Методом горячего компрессионного прессования в закрытой пресс-форме были изготовлены образцы ПБС в виде дисков диаметром 90 мм и толщиной 3 мм.

Условия прессования:

- давление – 40 МПа;
- температура – 180 °С (для древесного сырья) и 160 °С (для недревесного растительного сырья);
- продолжительность прессования – 10 мин;
- продолжительность охлаждения под давлением – 10 мин;
- продолжительность кондиционирования – 24 ч.

Для депонирования образцов в почве, из полученных пластиков, подготавливались образцы в виде полосок шириной 20 мм. Исследуемые образцы ПБС помещались в контейнер с грунтом на глубину от 5 см в горизонтальном положении.

В качестве почвогрунта был принят грунт для рассады (ТУ 0392-001-59264059-03). После внесения образцов в грунт, производилось его засеивание семенами трав. Для засева использовалась травосмесь используемая для биологического этапа рекультивации нарушенных земель (ГОСТ Р 57446-2017).

Экспозиция образцов в грунте осуществлялась при комнатной температуре (20 ± 2 °С) и влажности грунта 40 ± 5 %. После экспозиции образцы изымались из грунта, промывались и высушивались при комнатной температуре в течение суток. Для высушенных образцов осуществлялась оценка их физико-механических свойств.

Испытания образцов на физико-механические свойства проводились по аккредитованным методикам (ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010)) и на поверенном оборудовании (разрывная машина марки «РМ-5-1»).

Микроскопирование поверхности образцов и бокового среза после экспозиции осуществлялось с помощью микроскопа «Микромед 3» при увеличении 1:400.

Результаты

У полученных образцов пластика были определены физико-механические свойства. Значения физико-механических показателей образцов ПБС приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения физико-механические показателей образцов ПБС

№ п/п	Исходное пресс-сырьё	Обозначение пластика	Физико-механические свойства	
			Плотность, кг/м ³	Модуль упругости при изгибе, МПа
1	Опилки сосны обыкновенной	ПБСс	1075	1211
2	Шелуха пшеницы	ПБСП	1165	1182
3	Опилки лиственницы сибирской	ПБСл	1123	3260
4	Опилки березы	ПБСб	1035	885
5	Костра конопли технической	ПБСк	1049	2343
6	Биомасса борщевика Сосновского	ПБСбс	1025	---

По показателю модуля упругости при изгибе ПБС можно косвенно судить о физико-механических свойствах полученных материалов, которые оказались приемлемыми для дальнейших испытаний [21].

Результаты физико-механических свойств после испытаний образцов на биоразлагаемость по отношению к почво-грунту за 30 суток представлены в табл.3.

Таблица 3 – Результаты изменения массы образцов ПБС при выдержке в почво-грунте (30 суток)

№	Пластик	Контроль	Время выдержки, сут			
			7	14	21	30
1	ПБСс	+0,006	+8,6	-4,3	-10,0	-15,4
2	ПБСП	+0,004	+41,4	-14,2	-21,8	-21,9

На основании табл.3 можно сделать следующие выводы.

1. Для образцов ПБСс и ПБСП наблюдается первичное увеличение массы в первые 7 суток. Первоначальное увеличение массы можно объяснить впитыванием избыточной влаги из грунта. Наибольшие первичное водопоглощение наблюдаются у ПБСП – масса увеличивается на 41,4%. У ПБСс данный показатель намного меньше и составляет всего 8,6 %.

2. После первичного водонасыщения образцов в первоначальное время после 7 суток наблюдается снижение массы образцов, скорее всего, за счет своей деструкции. Это снижение наблюдается за все оставшееся время (до 30 суток). Наибольшее падение массы у образцов ПБСП – 21,9%, тогда как у ПБСс – 15,4%.

Результаты изменения прочности при изгибе при экспозиции ПБС в почво-грунте представлены в табл.4.

Таблица 4 – Результаты изменения прочности при изгибе образцов ПБС при выдержке в почво-грунте (30 суток)

№	Пластик	Контроль	Время выдержки, сут			
			7	14	21	30
1	ПБСс	7,1	1,7	1,2	0,8	0,5
2	ПБСП	8,4	1,1	0,9	0,8	0,3

На основании табл.4 можно сделать следующие вывод, что для образцов ПБСс и ПБСП наблюдается снижение прочности при изгибе за 30 сут выдержке образцов в грунте. При этом падение прочности у ПБСс составило практически 93 %, у ПБСП – 96 %.

Полученные зависимости потери массы и прочности при изгибе от времени выдержки в грунте были аппроксимированы с помощью различных функций и представлены в табл.5.

Таблица 5 – Результаты аппроксимации зависимости потери массы и прочности при изгибе от времени выдержки в почво-грунте образцов ПБС

Вид пластика	Зависимость	Уравнение линии тренда	Величина достоверности аппроксимации
ПБСс	Линейная	$y = 0,0477x + 1,2818$	$R^2 = 0,9828$
	Экспоненциальная	$y = 1,2054e0,0477x$	$R^2 = 0,9168$
ПБСП	Линейная	$y = 0,0077x + 0,7821$	$R^2 = 0,537$
	Экспоненциальная	$y = 0,7138e0,011x$	$R^2 = 0,3807$

Величина достоверности аппроксимации R^2 :

- для ПБСс разных видов зависимости практически не имеет большого различия: наименьшее значение этой величины имеет экспоненциальная зависимость, наибольшее – линейная. Для обеих функций коэффициент имеет значимое значение ($R^2 \geq 0,92$);

- для ПБСП наибольшее значение зависимости имеет линейная зависимость, при этом величина значимости имеет невысокое значение ($R^2 < 0,92$).

В виду трудности описания и расчета экспоненциальной функции и невысоких величин достоверности, для описания зависимостей (прочность при изгибе) от потери массы возможно использования линейной.

Были получены следующие уравнения зависимости «потери массы – прочность при изгибе»:

- ПБСс: $y = 0,0477x + 1,2818$, $R^2 = 0,9828$;

- ПБСП: $y = 0,0077x + 0,7821$, $R^2 = 0,537$.

С целью подтверждения возможности использования полученных уравнений для прогнозируемой оценки прочности при изгибе от потери массы для ПБС в зависимости от продолжительности экспозиции их в почво-грунте, была выполнена экспозиция образцов из различного древесного (ПБСл, ПБСб) и недревесного растительного (ПБСк, ПБСбс) сырья в почво-грунте в течение 90 суток с последующей оценкой изменения их массы и прочности при изгибе.

Полученные расчетные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными и представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты, сопоставленные расчетных значений с экспериментальными данными

№	Плас- тик	Показатель	Время выдержки, сут					
			7	14	21	30	60	90
1	ПБСс	Изменение массы, %	+6,2	-0,2	-0,3	-1,6	-7,9	-49,4
		Прочность при изгибе (расчетная), МПа	1,6	1,3	1,3	1,2	0,9	—
		Прочность при изгибе (экспериментальная), МПа	1,7	1,2	1,2	0,5	0,3	---
		Расхождение фактического результата от расчётного, %	+5,9	-8,3	-8,3	-140,0	-200,0	НД
2	ПБСл	Изменение массы, %	+2,3	-2,5	-3,8	-5,2	-6,4	-13,8
		Прочность при изгибе (расчетная), МПа	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	0,6
		Прочность при изгибе (экспериментальная), МПа	1,5	1,2	1	0,9	0,9	0,5
		Расхождение фактического результата от расчётного, %	+6,7	0,0	-10,0	-11,1	-11,1	-20,0
3	ПБС б	Изменение массы, %	+4,7	-1,4	-2,9	-6,3	-9,7	-36,2
		Прочность при изгибе (расчетная), МПа	1,5	1,2	1,1	1,0	0,8	—
		Прочность при изгибе (экспериментальная), МПа	1,6	1,2	1	0,8	0,5	---
		Расхождение фактического результата от расчётного, %	+6,3	0,0	-10,0	-25,0	-60,0	НД
4	ПБС п	Изменение массы, %	+27,1	-14,5	-19,4	-24,3	-30,2	-55,6
		Прочность при изгибе (расчетная), МПа	1,0	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4
		Прочность при изгибе (экспериментальная), МПа	1,1	0,8	0,7	0,3	0,2	---
		Расхождение фактического результата от расчётного, %	+9,1	+12,5	+14,3	-100,0	-150,0	НД
5	ПБСк	Изменение массы, %	+8,1	-8,1	-14,8	-23,3	-28,2	-37,7
		Прочность при изгибе (расчетная), МПа	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5
		Прочность при изгибе (экспериментальная), МПа	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	---
		Расхождение фактического результата от расчётного, %	-14,3	0,0	-16,7	-50,0	-100,0	НД
6	ПБС бс	Изменение массы, %	+16,0	-2,9	-14,2	-15,0	-24,3	-35,4
		Прочность при изгибе (расчетная), МПа	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5
		Прочность при изгибе (экспериментальная), МПа	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,3
		Расхождение фактического результата от расчётного, %	-12,5	-14,3	-16,7	-16,7	-20,0	-66,7

Примечание: «—» – было получено отрицательное значение; «---» – образцы не были непригодны либо были разрушены в ходе испытаний; «НД» – нет данных.

На основании таблицы 6 можно сделать следующие выводы:

1. Для всех образцов ПБС наблюдается аналогичное (см.табл.3) первичное увеличение массы в первые 7 суток. Наибольшие первичное водонасыщение наблюдаются у ПБС на основе недревесного растительного сырья – от 8,1 до 27,1 %. Для ПБС на основе древесного сырья начальное водонасыщение образцами в меньше и составляет порядком от 2,3 до 3,2 %.

2. После первичного водонасыщения образцов наблюдается аналогичная картина (см.табл.3): происходит снижение массы всех образцов ПБС и это снижение наблюдается за все оставшееся время экспозиции (90 суток). Снижение массы у образцов ПБС на основе древесного сырья находится в интервале от 13,8 до 49,4 %, для ПБС на основе недревесного растительного сырья – от 35,4 до 55,6 %.

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Первичное влагонасыщение (первые сутки экспозиции в почво-грунте) и последующая деструкция ПБС для образцов на основе недревесного растительного сырья идет более интенсивней, чем у образцов

на основе древесного сырья. Это связано в первую очередь с самим составом исходного сырья, а именно наличием в недревесном растительном сырье большого количества гидрофильных соединений (водорастворимых пентазанов). Второй фактор влияния – это получение образцов на данном пресс-сырье в более «мягких» условиях – при температуре прессования 160 °С, которая не обеспечивают полноценного структуроформирования пластика.

2. После 90 суток экспозиции в почво-грунте большинство образцов были не пригодны для испытаний на прочность при изгибе. В среднем наибольшее снижение прочности при изгибе наблюдается у образцов ПБС на основе древесного сырья (73 %), чем у ПБС на основе недревесного растительного сырья (67%). Это связано с самим составом недревесного растительного пресс-сырья, а именно наличием большого количества пластичных полимеров, таких как гемицеллюлозы.

3. Согласно табл.6 при экспозиции в почво-грунте до 30 суток расхождение фактического значения прочности при изгибе от расчётного для всех видов исследуемых ПБС составляет не более 20 %. При экспозиции более 30 суток наблюдается уже большие значения расхождений, которые достигают до 200 %.

Это связано с деструктивными процессами после 30 суток выдержки, которые приводят к образованию свищей и трещин в полости пластика (см.рис.1), и как следствию изменению толщины испытываемых образцов.

Результаты изменения линейных размеров (толщины) образцов ПБС представлены в табл.7.

Таблица 7– Результаты изменения толщины образцов ПБС при экспозиции в почво-грунте (90 суток)

№	Пластик	Контроль	Время экспозиции, сут					
			7	14	21	30	60	90
1	ПБСс	+0,02	+35,9	+48,3	+37,5	+56,6	+76,1	+52,5
2	ПБСб	-0,01	+10,6	+20,1	+22,4	+26,2	+23,4	+8,8
3	ПБСл	-0,03	+17,0	+19,2	+23,3	+26,9	+37,8	+3,5
4	ПБСП	+0,04	+30,8	+33,0	+22,7	+36,9	+54,6	+76,0
5	ПБСбс	-0,02	+80,5	+90,7	+86,5	+121,0	+126,9	+103,1
6	ПБСк	-0,01	+64,5	+57,5	+38,4	+94,8	+117,6	+68,1

Увеличение линейных размеров (толщины) после экспозиции образцов 90 суток в почво-грунте у образцов ПБС на основе древесного сырья находится в интервале от 3,5 до 52,5 %, для ПБС на основе недревесного растительного сырья – от 68,1 до 103,1 %. Максимальное увеличение толщины у ПБСбс – 130,1%, минимальное – ПБСл – 3,5 %.



а)



б)



в)



г)

Рис.1. Результаты микроскопирования образцов ПБС в срезе: а – ПБСб, б – ПБСл, в – ПБСбс, г – ПБСк после экспозиции в почво-грунте (90 суток)

Таким образом, использование полученных закономерностей «потери массы – прочность при изгибе» рекомендуется применять с целью прогнозирования прочности при изгибе ПБС только на основе древесного сырья и при экспозиции в почво-грунте до 30 суток.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта "FEUG-2020-0013".

Литература

1. Биоповреждение и защита древесины и бумаги / Е.Л. Пехташева, А.Н. Неверов, Г.Е. Заиков, С.А. Шевцова, Н.Е. Темникова // Вестник Казан. технол. ун-та. 2012. Т. 15, № 8. С. 192–199.
2. Стенина, Е. И. Исследование возможностей применения коллоидного раствора наноразмерных частиц серебра в качестве биоцида для древесины в жестких условиях эксплуатации / Е. И. Стенина, Т.

Ю. Чеснокова // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2017. – № 1(192). – С. 152-155.

3. Ayrlimis, N. Properties of biocomposite films from PLA and thermally treated wood modified with silver nanoparticles using leaf extracts of oriental sweetgum / N. Ayrlimis, E. Yuttas, A. Durmus, F. Ozdemir // *Journal of Polymers and the Environment*. – 2021. – № 29. – P. 1-12.

4. Кайнов, П.А. Исследование биостойкости термомодифицированной древесины в условиях воздействия дереворазрушающих грибов / П.А. Кайнов, Р.Р. Хасаншин, С.В. Ахмадиева // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2012. – Т. 15. – № 15. – С. 233-235.

5. Хасаншин, Р.Р. Исследование биостойкости термически модифицированной древесины / Р.Р. Хасаншин // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17. – № 10. – С. 66-68.

6. The decay resistance and durability of wood and wood products from larch (*LARIX SIBIRICA*) / V. A. Soloviev, M. A. Chubinsky, A. N. Chubinsky [et al.] // *Mycology and Phytopathology*. – 2019. – Vol. 53. – No 3. – P. 156-161. – DOI 10.1134/S0026364819030061.

7. Физико-механические и пожароопасные свойства древесины с глубокой пропиткой огнебиозащитными составами / Д. М. Нигматуллина, А. Б. Сивенков, Е. Ю. Полищук [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2017. – Т. 26. – № 6. – С. 43-51. – DOI 10.18322/PVB.2017.26.06.43-51.

8. Угрюмов, С. А. Использование парафиновой эмульсии для повышения водостойкости композиционной фанеры с внутренним слоем на основе костры льна / С. А. Угрюмов // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. – 2007. – № 1. – С. 65-67.

9. Семенов, В. В. Гидрофобизация древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит кремнийорганическими мономерами и жидкостями / В. В. Семенов // *Химия растительного сырья*. – 2009. – № 4. – С. 177-181.

10. Плитные материалы и изделия из древесины и других одресневевших остатков без добавления связующих / В.Н.Петри [и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 360 с.

11. Satyanarayana KG, Arizaga GGC, Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – an overview. *Progress in Polymer Science* 2009;34:982–1021.

12. Пехташева Е., Неверов А., Заиков Г. Бициды и биоразложение органических и неорганических материалов. Биоповреждения и защита. – «LAP LAMBERT Academic Publishing», Saarbrucken, Deutschland, 2012. – 110 с.

13. Пехташева Е., Неверов А., Заиков Г. Биодеструкция и стабилизация природных и искусственных полимеров. Основные причины биоповреждений и способы их предотвращения. – «LAP LAMBERT Academic Publishing», Saarbrucken, Deutschland, 2012. – 248 с.

14. Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential / V. Glukhikh, P. Buryndin, A. Artyemov [et al.] // *Foods and Raw Materials*. – 2020. – Vol. 8. – No 1. – P. 149-154. – DOI 10.21603/2308-4057-2020-1-149-154.

15. Исследование влияния гидрофобизирующей добавки на физико-механические свойства древесного пластика без добавления связующего / А. В. Савиновских, А. В. Артемов, В. Г. Бурындина, А. Е. Шкуро // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020. – № 2. – С. 50-55.

16. Использование сульфата меди для получения биостойких растительных пластиков / А. В. Савиновских, А. В. Артемов, А. Е. Шкуро [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2020. – № 3. – С. 61-81. – DOI 10.15593/2224-9400/2020.3.05.

17. Артемов, А. В. Влияние карбамида на физико-механические свойства пластика на основе сосновых опилок / А. В. Артемов, В. Г. Бурындина, А. В. Савиновских // *Вестник Технологического университета*. – 2021. – Т. 24. – № 5. – С. 35-39.

18. Анализ методов оценки биостойкости промышленных материалов (критерии, подходы) / Д. В. Кряжев, В. Ф. Смирнов, О. Н. Смирнова [и др.] // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2013. – № 2-1. – С. 118-124.

19. Исследование устойчивости к действию микроскопических грибов лакокрасочных материалов, используемых в строительстве, приборо- и машиностроении / Н. А. Аникина, В. Ф. Смирнов, Д. В. Кряжев [и др.] // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2014. – № 2-1. – С. 100-105.

20. Чубинский, М. А. Кинетика разложения древесины лиственницы дереворазрушающими грибами / М. А. Чубинский // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы научно -*

технической конференции, Санкт-Петербург, 13–15 апреля 2016 года / Под. ред. В.М. Гедьо. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2016. – С. 187-190.

21. Артемов, А. В. Модуль упругости при изгибе как показатель физико-механических свойств древесных пластиков без добавления связующих / А. В. Артемов, А. В. Савиновских, В. Г. Бурындин // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 1(49). – С. 67-71. – DOI 10.18324/2077-5415-2021-1-67-71.

© **Артёмов А.В.** – канд.техн.наук, доцент кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: artemovav@m.usfeu.ru; **Ершова А.С.** – аспирант кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: ershovaas@m.usfeu.ru; **Бурындин В.Г.** – д-р техн.наук, профессор кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: buryndinv@m.usfeu.ru; **Савиновских А.В.** – канд.техн.наук, доцент кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров», ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: savinovskihav@m.usfeu.ru.

UDC 674.81

STUDY OF CHANGES IN STRENGTH CHARACTERISTICS OF PLASTICS WITHOUT RESINS BY WEIGHT LOSS DURING BIODEGRADATION

A.V. Artyomov, A.S. Ershova, V.G. Bryndin, A.V. Savinovskih

This study is devoted to establishing the dependence of the change in strength parameters (bending strength) of plastics without resins (PWR) depending on the loss of mass during exposure in the soil on biodegradability. The dependences "flexural strength – mass loss" were obtained for PWR based on pine sawdust and wheat husk when the images were exposed for 30 days in the soil. In order to confirm the obtained patterns, biodegradation tests were carried out with respect to the soil for 90 days of plastics obtained on the basis of wood (sawdust of pine, larch and birch) and non-wood vegetable (wheat husk, hemp bonfire and borscht biomass) raw materials. The obtained results showed that the use of the obtained dependencies "mass loss - bending strength" is recommended to be used in order to predict the bending strength of PWR only on the basis of wood raw materials and when exposed to soil for up to 30 days.

Keywords: lignocarbon materials, plastic, biodegradation, bending strength, weight loss.

References

1. Pehtasheva E.L., Neverov A.N., Zaikov G.E., Shevtsova S.A., Temnikova N.E. [Bio-damage and protection of wood and paper] Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University] 2012. Vol. 15. No. 8. pp. 192-199. (In Russ.)
2. Stenina E. I., Chesnokova T. Y. [Investigation of the possibilities of using a colloidal solution of nanoscale silver particles as a biocide for wood in harsh operating conditions] Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov [Works of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources] 2017. No. 1(192). pp. 152-155. (In Russ.)
3. Ayrlmis, N. Properties of biocomposite films from PLA and thermally treated wood modified with silver nanoparticles using leaf extracts of oriental sweetgum / N. Ayrlmis, E. Yuttas, A. Durmus, F. Ozdemir // Journal of Polymers and the Environment. – 2021. – № 29. – P. 1-12.
4. Kainov P.A., Khasanshin R.R., Akhmadieva S.V. [Investigation of the biostability of thermomodified wood under the influence of wood-destroying fungi] Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University] 2012. Vol. 15. No. 15. pp. 233-235. (In Russ.)
5. Khasanshin R.R. [Investigation of biostability of thermally modified wood] Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University] 2014. Vol. 17. No. 10. pp. 66-68. (In Russ.)
6. The decay resistance and durability of wood and wood products from larch (LARIX SIBIRICA) / V. A. Soloviev, M. A. Chubinsky, A. N. Chubinsky [et al.] // Mycology and Phytopathology. – 2019. – Vol. 53. – No 3. – P. 156-161.

7. Nigmatullina D. M., Sivenkov A. B., Polishchuk E. Y. [et al.] [Physico-mechanical and fire-hazardous properties of wood with deep impregnation with fire-protective compounds] Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and explosion safety] 2017. Vol. 26. No. 6. pp. 43-51. (In Russ.)
8. Ugryumov S. A. [The use of paraffin emulsion to increase the water resistance of composite plywood with an inner layer based on flax bonfires] Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik [Bulletin of the Moscow State University of Forests - Forest Bulletin] 2007. No. 1. pp. 65-67. (In Russ.)
9. Semenov V. V. [Hydrophobization of chipboard and fiberboard with organosilicon monomers and liquids] Himiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials] 2009. No. 4. pp. 1775-181. (In Russ.)
10. Petri V.N. [et al.] Plate materials and products made of wood and other desalinated residues without resins. [Moskva. Lesnaya promyshlennost'] Moscow. Forest industry. 1976. (In Russ.)
11. Satyanarayana KG, Arizaga GGC, Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – an overview. Progress in Polymer Science 2009;34:982–1021.
12. Pehtasheva E., Neverov A., Zaikov G. Biocides and biodegradation of organic and inorganic materials. Bio-damage and protection. Saarbrücken, Deutschland. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. (In Russ.)
13. Pehtasheva E., Neverov A., Zaikov G. Biodestruction and stabilization of natural and artificial polymers. The main causes of bio-injuries and ways to prevent them. Saarbrücken, Deutschland. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. (In Russ.)
14. Glukhikh V.V., Buryndin V.G., Artyomov A.V., Savinovskikh A.V., Krivonogov P.S., Krivonogova A.S. [Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential] // Foods and Raw Materials. 2020. Vol.8. No.1. pp. 149-154.
15. Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V. G., Shkuro A. E. [Research of the influence of hydrophobic additives on the physico-mechanical properties of wood plastic material without resins] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2020. No. 2. pp. 50-55. (In Russ.)
16. Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Shkuro A. E. [et al.] [The use of copper sulfate for obtaining biostable plant plastics] Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology] 2020. No. 3. pp. 61-81. (In Russ.)
17. Artyomov A.V., Savinovskikh A.V., Buryndin V.G. [Influence of urea on the physical and mechanical properties of plastic based on pine sawdust] Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Technological University] 2021. Vol. 24. No. 5. pp. 35-39. (In Russ.)
18. Kryazhev D. V., Smirnov V. F., Smirnova O. N. [et al.] [Analysis of methods for assessing the biostability of industrial materials (criteria, approaches)] Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky] 2013. No. 2-1. pp. 118-124. (In Russ.)
19. Anikina N. A., Smirnov V. F., Kryazhev D. V. [et al.] [Investigation of resistance to the action of microscopic fungi of paint and varnish materials used in construction, instrumentation and mechanical engineering] Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky] 2014. No. 2-1. pp. 100-105. (In Russ.)
20. Chubinsky M. A. [Kinetics of decomposition of larch wood by wood-destroying fungi] Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie : materialy nauchno-tekhnicheskoy konferencii [In the collection: Forests of Russia: politics, industry, science, education. Materials of the scientific and technical conference] 2016. pp. 187-190. (In Russ.)
21. Artyomov A.V., Savinovskikh A.V., Buryndin V.G. [Flexural modulus of elasticity as an indicator of the physical and mechanical properties of wood plastics without resins] Sistemy. Metody. Tekhnologii. [Systems. Methods. Technologies] 2021. No. 1 (49). pp. 67-71. (In Russ.).

© **Artyomov A.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Technology pulp and paper industries and polymer processing, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: artemovav@m.usfeu.ru; **Yershova A.S.** – Postgraduate student of the Department of Technology pulp and paper industries and polymer processing, USFEU, e-mail: ershovaas@m.usfeu.ru; **Buryndin V.G.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Technology pulp and paper industries and polymer processing, USFEU, e-mail: buryndinv@m.usfeu.ru; **Savinovskikh A.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Technology pulp and paper industries and polymer processing, USFEU, e-mail: savinovskihav@m.usfeu.ru.

УДК 674.816

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БЕТУЛИНА ИЗ БЕРЕСТЫ БЕРЕЗЫ

А.В. Сафина, Д.Р. Абдуллина, Д.Ф. Зиатдинова, Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, К.В. Валеев

В работе представлено математическое описание процесса пропитки и экстракции бересты березы толуолом. Сопоставление результатов математического моделирования и экспериментальных данных подтвердило адекватность разработанной математической модели. Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 18 %. Для определения коэффициентов массопроводности на этапах пропитки и извлечения бетулина спроектирована экспериментальная установка. В температурном диапазоне 100-105 °С коэффициенты составили, соответственно, $a_{тЕ} = 5,2 \cdot 10^{-12}$ и $a_{тм} = 7,8 \cdot 10^{-11}$ м²/с. В результате моделирования установлено, что средняя продолжительность стадии пропитки бересты составляет 25 мин, а время экстракции при периодическом процессе составляет около 2 часов. Однако выход бетулина при удельном расходе толуола в соотношении 1:7 составляет 60-70 % и для повышения степени извлечения целесообразно организовать процесс в несколько циклов и продолжить исследования по оптимизации параметров процесса.

Ключевые слова: береста, пропитка, экстракция, бетулин, массопроводность, моделирование.

Введение

В бересте березы содержится до 40 % бетулина, который является ценным продуктом и имеет широкое применение в промышленности [1-5]. Наличие бетулина в бересте делает источник сырья практически бесплатным, так как кора березы остается невостребованной и используется в основном как твердое топливо [6-7].

Исследованиями ряда авторов показано, что бетулин имеет хорошую растворимость в органических растворителях. В частности, высокая эффективность извлечения достигается при использовании такого экстрагента как толуол. [8-11].

Процесс извлечения бетулина включает стадии: измельчение, пропитку растворителем, экстракцию и выделение бетулина из экстракта. Скорость процесса извлечения бетулина из бересты и качество готового экстракта зависит от различных факторов, таких как, температура, степень измельчения сырья, гидромодуль и гидродинамика процесса и т.д. [12]. Так, повышение температуры ускоряет переход целевых компонентов в экстрагент, однако влияет на сохранение ферментных и лекарственных свойств получаемых экстрактов. Процесс экстракции ускоряется и с уменьшением степени измельчения сырья. Однако при этом увеличивается сопротивление слоя измельченных частиц, что ведет к необходимости увеличения удельного расхода толуола для равномерного процесса экстракции по сечению аппарата. Таким образом, необходимо создать математическую модель процесса, адекватно соответствующую реальной физической картине для оптимизации процесса извлечения бетулина из бересты. Имеющие в литературе математические описания и их решения получены эмпирически, путем обработки экспериментальных данных, поэтому работают только в узком диапазоне [13-14].

Целью настоящей работы является создание адекватного математического описания процесса извлечения бетулина из бересты березы, проверка ее адекватности реальным процессам извлечения и определение рациональных режимных параметров.

Методы и материалы

Из априорной информации [15-16] установлено, что удельный расход толуола экономически целесообразно поддерживать в пределах 7÷10 по отношению к бересте.

Вследствие большого удельного расхода толуола ($M=7\div 10$), считаем, что температура толуола в процессе пропитки и экстракции не меняется. В виду малой толщины измельченных частиц бересты считаем, что прогрев сырья происходит мгновенно и процессы пропитки толуолом и экстракции бетулина из сырья лимитируется лишь градиентом концентрации и молекулярной массопроводностью бересты. Измельченные частицы бересты имеют малую толщину $\approx 0,5$ мм, поэтому считаем частицу бесконечной пластиной. При этих условиях процесс пропитки бесконечной частицы описывается дифференциальным уравнением массопроводности:

$$\frac{\partial C_{EW}}{\partial \tau} = \alpha_{mE} \frac{\partial^2 C_{EW}}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C_{EW} – локальная концентрация экстрагента в сырье (бересте) при пропитке; α_{mE} – коэффициент массопроводности бересты по экстрагенту; x – текущая координата в частице, отсчёт ведётся от поверхности частицы.

Поскольку перед пропиткой экстрагент в бересте отсутствует, то начальное условие имеет вид:

$$C_{EW}(x; \tau) \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (2)$$

Считаем, что при пропитке экстракция не происходит, поэтому концентрация бетулина в экстракте равна нулю, то есть для решения дифференциального уравнения (1) можно принять граничные условия I рода:

$$C_{EW}(x; \tau) \Big|_{x=0} = C_{EH} = 100\% \quad (3)$$

Процесс экстракции бетулина из бересты, также, можно описать дифференциальным уравнением Фика для бесконечной пластины:

$$\frac{\partial C_{BW}}{\partial \tau} = \alpha_m \frac{\partial^2 C_{BW}}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где C_{BW} – локальная концентрация бетулина в бересте; α_m – массопроводность пропитанной экстрагентом бересты.

Исходная концентрация бетулина в бересте березы равна C_{BWH} . Тогда начальные условия записываются соотношением:

$$C_{BW}(x; 0) = C_{BWH} \quad (5)$$

Текущая концентрация бетулина на поверхности частицы бересты соответствует текущей концентрации бетулина в толуоле $C_{BD}(\tau)$.

$$C_{BW}(0; \tau) = C_{BD}(\tau) \quad (6)$$

Текущая концентрация бетулина в толуоле определяется решением дифференциального уравнения материального баланса – приток бетулина в экстракте равен стоку бетулина из сырья:

$$(m_B + m_T) dC_{BD} = q_m F d\tau, \quad (7)$$

где m_B – текущая масса бетулина в экстракте; m_T – масса толуола в экстракте.

Суммарная поверхность всех частиц бересты зависит от массы сырья m_w и удельной поверхности частицы f .

$$F = f \cdot m_w \quad (8)$$

Соотношение сырья и экстрагента определяет удельный расход толуола:

$$M = \frac{m_m}{m_w}, \quad (9)$$

где m_m – масса экстрагента (толуола).

Поток извлекаемого бетулина из бересты определяется градиентом концентрации бетулина на поверхности частицы:

$$q_B = \alpha_m \cdot \text{grad} C_{BW} \Big|_{x=0} \quad (10)$$

Текущую концентрацию бетулина в экстракте при проведении экстракции в периодическом режиме можно рассчитать из совместного решения уравнений (7)-(10):

$$dC_{B\partial}(\tau) = \alpha_m (\text{grad} C_{BW} \Big|_{x=0}) \cdot \left(\frac{f}{C_{BW} + M} \right) d\tau \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (4)-(6) и (11) позволят определить изменение локальной концентрации бетулина в бересте и экстракте.

Рассчитать коэффициент массопроводности можно на основании зависимости, полученной преобразованием дифференциального уравнения (10) в уравнение с конечной разностью:

$$q = \alpha_m \frac{\Delta C}{b}, \quad (12)$$

где ΔC – разность концентраций экстрагентов на противоположных сторонах испытуемой бересты; b – толщина бересты.

Для экспериментального определения коэффициентов массопроводности для этапов пропитки и экстракции создана установка, представленная на рис.1.

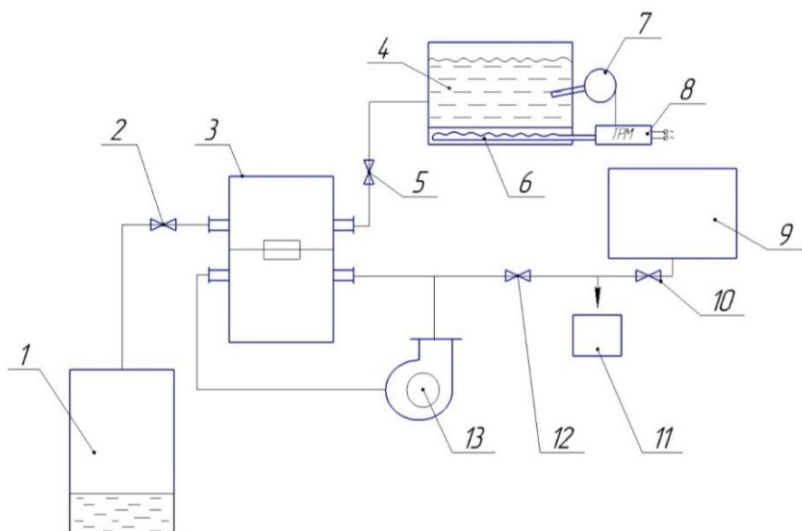


Рис.1. Схема установки для определения коэффициента массопроводности

Установка состоит из емкости 1 для приема и емкости 4 для подачи насыщенного бетулинового экстракта, вентилях 2,5,10,12, экспериментальной камеры 3, нагревательного элемента 6, датчика температуры 7, терморегулятора 8, емкости с толуолом 9, пробоотборника 11, центробежного насоса 13.

Верхнюю емкость установки 3 непрерывно обновляют подачей насыщенного бетулинового экстракта из емкости 4 в емкость 1 открытием вентилей 2,5 для поддержания постоянной концентрации экстракта. Температура экстракта в верхней емкости установки по определению коэффициента массоотдачи α_m 3 поддерживается в пределах 100-105 °С с помощью терморегулятора 8, датчика температуры 7 и нагревательного элемента 6.

Для поддержания равномерной концентрации в нижней емкости установки по определению коэффициента массоотдачи α_m 3 экстракт непрерывно циркулируется центробежным насосом 13, отбор пробы экстракта 11 осуществляется открытием вентиля 12.

Экспериментальная камера, сечение которой представлено на рис. 2, состоит из верхней – 1 и нижней – 2 емкостей со штуцерами подвода и отвода экстрактов – 3. Испытуемый образец 4 закрепляется между фланцем 5 и шайбой 6 с внутренними диаметрами, равными $d=80\text{мм}$, винтом 7 и создает изолированные полости, в которые подаются экстрагенты с разной концентрацией.

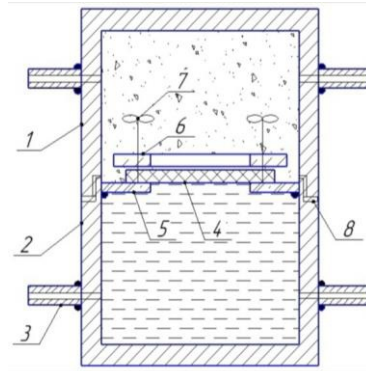


Рис.2. Экспериментальная камера для определения коэффициента массопроводности (сечение)

При определении коэффициента массопроводности при пропитке α_{mE} в нижнюю, предварительно нагретую емкость заливается чистый толуол с температурой $100-105\text{ }^{\circ}\text{C}$, закрывается берестой толщиной $0,5\text{ мм}$, переворачивается на 180° и определяется время появления толуола на противоположной стороне бересты, а затем определяется удельный поток массы толуола через образец.

$$q = \frac{\Delta m}{F \cdot \Delta \tau}, \quad (13)$$

где Δm – масса толуола, просочившаяся через бересту за время $\Delta \tau$.

Поверхность массоотдачи определяется внутренним диаметром фланца:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \quad (14)$$

Совместное решение уравнений (12) и (13) позволяет рассчитать коэффициент массопроводности при пропитке:

$$\alpha_{mE} = \frac{q \cdot b}{\Delta C} \quad (15)$$

При пропитке разность концентраций ΔC берем равной 1.

При определении коэффициента массопроводности при экстракции α_{mE} в качестве испытуемого образца используется береста, пропитанная толуолом. Для поддержания максимальной разности концентраций на разных сторонах бересты через верхнюю емкость 1 пропускается толуол, насыщенный бетулином с концентрацией $C_{БД\text{max}}$, а нижняя емкость 2 заполняется чистым толуолом. Разность концентраций ΔC в формуле (12) будет равна $C_{БД\text{max}}$.

По изменению концентрации бетулина в нижней емкости рассчитывается удельный поток бетулина через образец по соотношению:

$$q_B = \frac{\Delta m_B}{F \cdot \Delta \tau}, \quad (16)$$

а затем коэффициент массопроводности при экстракции по соотношению:

$$\alpha_m = \frac{q_B}{F \cdot C_{БД\text{max}}} \quad (17)$$

Для снятия кинетических кривых пропитки берется береста массой m_{WH} , погружается в толуол с заданной температурой и фиксируется изменение веса, которое отражает массу впитанного толуола.

Текущая средняя концентрация толуола в бересте в процессе пропитки рассчитывается по соотношению:

$$\overline{C_{EW}} = \frac{m_E}{m_{WH} + m_{E\max}}, \quad (18)$$

где m_E – текущая масса толуола в бересте. Она определяется разницей текущей массы бересты после ее выдержки в толуоле и начальной массой бересты (сухой) m_{WH} ; $m_{E\max}$ – максимальная масса толуола в бересте после завершения пропитки. Она определяется изменением исходной массы бересты при пропитке.

Для определения концентрации бетулина в толуоле C_{BD} в процессе экстракции или при определении коэффициента массопроводности отобранная проба экстракта взвешивается m_{DH} , затем вакуумной сушкой удаляется толуол и определяется масса бетулина m_B .

Текущее значение концентрации бетулина в толуоле определяется по соотношению:

$$\overline{C_{BD}} = \frac{m_B}{m_{DH}}, \quad (19)$$

где m_B – масса бетулина в экстракте, которая определяется удалением толуола из пробы экстракта с начальной массой m_{DH} .

Результаты математического моделирования

Экспериментальные значения коэффициентов массопроводности при пропитке и экстракции, определенные в соответствии с описанной методикой, в температурном диапазоне 100 -105 °С составили, соответственно, $a_{mE} = 5,2 \cdot 10^{-12}$ и $a_m = 7,8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$.

По числовым значениям коэффициентов массопроводности можно отметить, что массопроводность сухой бересты значительно меньше массопроводности пропитанной бересты.

На рис.3 представлены локальные значения концентрации толуола в бересте при пропитке, полученные моделированием дифференциального уравнения (1).

Расчетные значения получены интегрированием локальных кривых концентрации толуола в бересте при заданном времени. Анализ кривых показывает, что при достижении 25 минут пропитанность бересты достигает 90 %.

Расчетные и экспериментальные значения изменения средней концентрации толуола в бересте при пропитке представлены на рис. 4.

Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышает 18 %. Это позволяет сделать вывод о возможности применения уравнений (1÷3) для моделирования процесса пропитки бересты при проведении инженерных расчетов.

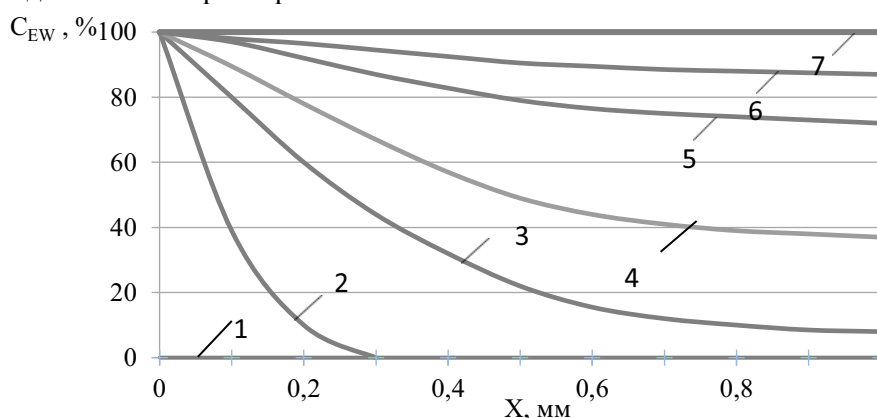


Рис.3. Локальные значения концентрации толуола в бересте при пропитке: 1- $\tau=0$ мин; 2- $\tau=1$ мин; 3- $\tau=5$ мин; 4- $\tau=10$ мин; 5- $\tau=15$ мин; 6- $\tau=25$ мин; 7- $\tau=\infty$

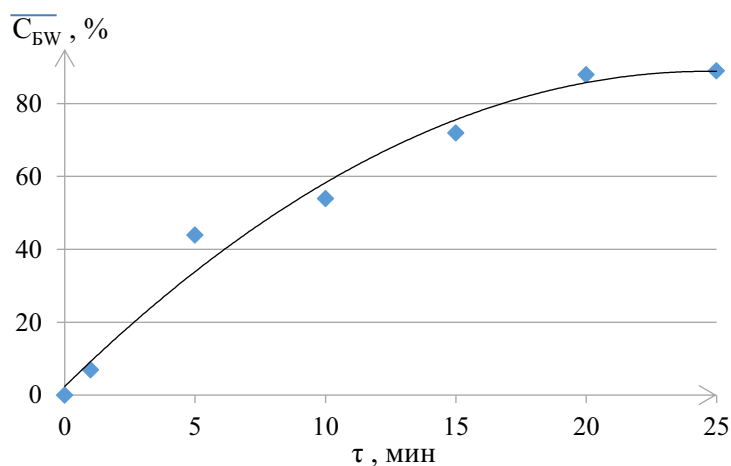


Рис.4. Кинетические кривые средней концентрации толуола в бересте при пропитке

Моделированием дифференциального уравнения (4) получены расчетные кривые изменения локальных значений концентрации бетулина в бересте при экстракции, представленные на рисунке 5.

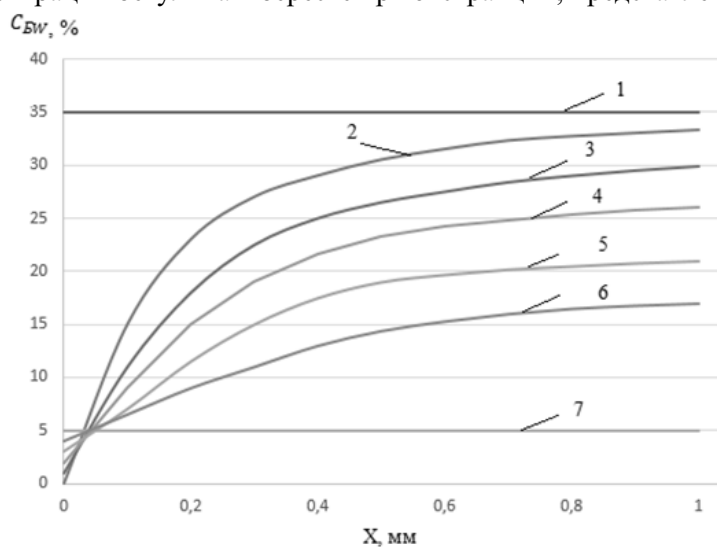


Рис.5. Локальные значения концентрации бетулина в бересте: 1- $\tau=0$ ч; 2- $\tau=0,1$ ч; 3- $\tau=0,5$ ч; 4- $\tau=1$ ч; 5- $\tau=2$ ч; 6- $\tau=3$ ч; 7- $\tau=\infty$

Анализ кривых показывает, что в процессе экстрагирования концентрация на поверхности частиц при $x=0$ поднимается с 0 % до 5 %. Это связано с тем, что концентрация бетулина в толуоле также повышается до 5 %. Интегрируя полученные кривые, можно получить расчетные значения средней концентрации бетулина в бересте в текущее время.

На рисунке 6 представлены расчетные и экспериментальные средние значения концентрации бетулина в бересте.

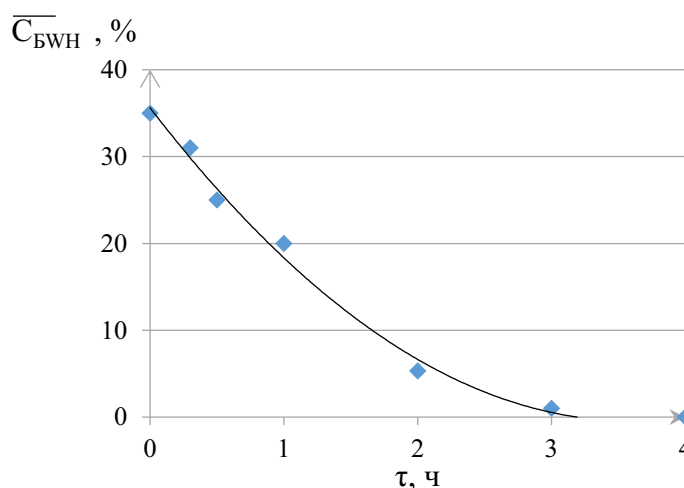


Рис.6. Кинетические зависимости концентрации бетулина в бересте

Отклонение расчетных данных от экспериментальных составляет 17 %. Из представленного графика видно, что при достижении 3 часов концентрация бетулина в бересте не меняется, поэтому можно сделать вывод о том, что рациональная продолжительность экстрагирования составляет 2 часа. При дальнейшем экстрагировании скорость процесса резко падает, целесообразно организовать второй цикл с подачей чистого толуола.

На рисунке 7 представлены расчетные и экспериментальные значения средней концентрации бетулина в толуоле при периодическом процессе экстракции.

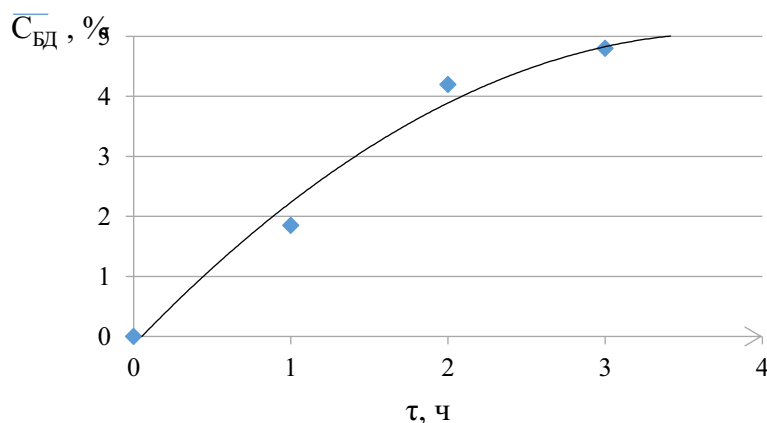


Рис.7. Кинетические зависимости средней концентрации бетулина в толуоле при периодическом процессе экстракции

Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 15%. Как видно, спустя 3 часа концентрация бетулина в толуоле не менялась. Для более полного извлечения бетулина необходимо увеличить удельный расход толуола или проводить экстракцию в несколько циклов с обновлением экстрагента.

Количество циклов экстрагирования определяется моделированием процесса с учётом экономической целесообразности, затрат на регенерацию толуола из экстракта.

Заключение

Разработана математическая модель, адекватно описывающая процесс извлечения бетулина из бересты берёзы.

Моделированием процесса установлено, что оптимальное время пропитки измельчённой бересты составляет 15-20 минут, а время экстракции толуолом при температуре 100-105 °С составляет 3 часа.

Установлено, что выход бетулина в аппарате периодического действия при удельном расходе толуола 1:7 составляет 60-70 %. Для более полного извлечения бетулина необходимо продолжить

исследование с увеличением удельного расхода толуола до оптимального значения путём организации процесса экстрагирования в несколько циклов.

Литература

1. Почицкая И.М., Воропай Е.Н. Возможность применения бетулина в качестве multifunctional биологически активной добавки к пище // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2015. № 2 (28). С. 60-64.
2. Ивахнюк Г.К., Скрипник И.Л., Воронин С.В. Исследование возможности применения бетулина для очистки воды от вредных примесей // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2020. Т. 25. № 1. С. 55-61.
3. Задорожная М.В., Лыско С.Б., Красиков А.П., Деев Л.Е. Применение бетулина в птицеводческих хозяйствах для повышения поствакцинального противовирусного иммунитета у птиц // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2012. № 4 (8). С. 87-91.
4. Hordyjewska, A., Ostapiuk A., Horecka A. Betulin and betulinic acid in cancer research // Journal of Pre-Clinical and Clinical Research. 2018. Vol.2, № 12. pp. 72-75.
5. Базарнова Ю.Г. Биологическая активность сухого экстракта бересты и его применение в масложировых продуктах // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. № 2. С. 32-39.
6. Кузнецов Б.Н., Рязанова Т.В., Щипко М.Л., Кузнецова С.А. Оптимизация термических и биохимических методов утилизации отходов экстракционной переработки березовой коры // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13. С. 441-449.
7. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 10. С. 148-155.
8. Способ химической переработки бересты: пат. № 2306318 РФ, заявл. 2005127381/04, 31.08.2005; опубл. 20.09.2007.
9. Способ получения бетулина: пат. № 2192879 РФ, заявл. 2002101403/14, 04.01.2002; опубл. 20.11.2002.
10. Способ получения бетулина: пат. № 2184120 РФ, заявл. 2001103062/04, 02.02.2001; опубл. 27.06.2002.
11. Способ получения бетулина (варианты): пат. № 2523545 РФ, заявл. 2013104064/04, 30.01.2013; опубл. 20.07.2014.
12. Тимербаев Н. Ф., Сафина А. В., Арсланова Г.Р., Зиятдинова Д.Ф. Повышение энергоэффективности процесса экстракции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19. № 5-6. С.35-40.
13. Сафина А. В., Арсланова Г. Р., Зиятдинова Д. Ф., Ахметова Д. А., Сафин Р. Г., Халитов Р. А. Определение коэффициента массопроводности с учетом сложного строения растительных клеток в процессе экстракции // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. №1. С. 33-43.
14. Касенов Р.З., Демец О.В., Картбаева Г.Т., Жумадилов С.С., Бакибаев А.А., Ахмеджанов Р.Р. Исследование количественного выхода бетулина из березы киргизской и синтез его фосфорилированного производного // Вестник Карагандинского университета. Серия: Биология. Медицина. География. 2019. Т. 95. № 3. С. 13-19.
15. Лигостаева Ю.В., Ханина М.А., Грек О.Р., Родин А.П. Влияние методов измельчения бересты на выход биологически активных веществ // Journal of Siberian Medical Sciences. 2021. №3. С.14-24.
16. Сафина А.В., Абдуллина Д.Р., Сафин Р.Г., Арсланова Г.Р., Валеев К.В. Энерго - и ресурсосберегающая технология экстрагирования бетулина из отходов бересты березы // Лесной вестник. 2021 Т. 25 № 4. С. 99-106.

© **Сафина А. В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: alb_saf@mail.ru; **Абдуллина Д.Р.** – магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: dilya.panda@yandex.ru; **Зиятдинова Д.Ф.** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; **Сафин Р. Г.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: safin@kstu.ru; **Тимербаев Н.Ф.** – д.т.н., профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: cpekgeu@gmail.com; **Валеев К.В.** – аспирант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kirvall16@mail.ru.

UDC 674.816

MODELING OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF BETULIN FROM BIRCH BARK

A.V. Safina, D.R. Abdullina, D.F. Ziatdinova, R.G. Safin, N.F. Timerbaev, K.V. Valeev

The paper presents a mathematical description of the process of impregnation and extraction of birch bark with toluene. Comparison of the results of mathematical modeling and experimental data confirmed the adequacy of the developed mathematical model. The deviation of the calculated values from the experimental data does not exceed 18%. An experimental installation has been designed to determine the mass conductivity coefficients at the stages of impregnation and extraction of betulin. In the temperature range of 100-105 °C, the coefficients were, respectively, $a_{mE} = 5,2 \cdot 10^{-12}$ and $a_m = 7,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{c}$. As a result of modeling, it was found that the average duration of the birch bark impregnation stage is 25 minutes, and the extraction time during the periodic process is about 2 hours. However, the yield of betulin at a specific toluene consumption in a ratio of 1:7 is 60-70% and to increase the degree of extraction, it is advisable to organize the process in several cycles and continue research on optimizing the process parameters.

Keywords: birch bark, impregnation, extraction, betulin, mass conductivity, modeling.

References

1. Pochickaya I.M., Voropaj E.N. [The possibility of using betulin as a multifunctional biologically active food supplement] *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii* [Food industry: science and technology] 2015. No. 2 (28). pp. 60-64. (In Russ.)
2. Ivahnyuk G.K., Skripnik I.L., Voronin S.V. [Study of the possibility of using betulin for water purification from harmful impurities] *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the International academy of environmental sciences and life safety]. 2020. V. 25. No. 1. pp. 55-61. (In Russ.)
3. Zadorozhnaya M.V., Lysko S.B., Krasikov A.P., Deev L.E. [The use of betulin in poultry farms to increase post-vaccination antiviral immunity in birds] *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Omsk State Agrarian University]. 2012. No. 4 (8). pp. 87-91. (In Russ.)
4. Hordyjewska, A., Ostapiuk A., Horecka A. Betulin and betulinic acid in cancer research // *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*. 2018. V. 2, No. 12. pp. 72-75. (In Russ.)
5. Bazarnova Yu.G. [Biological activity of birch bark dry extract and its use in oil and fat products] *Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv* [Processes and apparatuses of food production]. 2011. No. 2. pp. 32-39. (In Russ.)
6. Kuznecov B.N., Ryazanova T.V., Shchipko M.L. [Optimization of thermal and biochemical methods of utilization of wastes of extraction processing of birch bark] *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya* [Chemistry for Sustainable Development]. 2005. V. 13. pp. 441-449. (In Russ.)
7. Andreev A.A. [Resource-saving and use of wastes from harvesting and processing of wood raw materials] *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty* [Fundamental and applied research: problems and results]. 2014. No. 10. pp. 148-155. (In Russ.)
8. Method for chemical processing of birch bark: patent No. 2306318 Russian Federation, declared 2005127381/04, 31.08.2005; publ. 20.09.2007. (In Russ.)
9. Method for obtaining betulin: patent. No. 2192879 Russian Federation, declared 2002101403/14, 04.01.2002; publ. 20.11.2002. (In Russ.)
10. Method for obtaining betulin: patent. No. 2184120 Russian Federation, declared 2001103062/04, 02.02.2001; publ. 27.06.2002. (In Russ.)
11. Method for obtaining betulin (options): patent No. 2523545 Russian Federation, declared 2013104064/04, 30.01.2013; publ. 20.07.2014. (In Russ.)
12. Timerbaev N. F., Safina A. V., Arslanova G.R., Ziatdinova D.F. [Increasing the energy efficiency of the extraction process] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* [Izvestia of higher educational institutions. Energy problems]. 2017. V.19. No. 5-6. pp. 35 - 40. (In Russ.)
13. Safina A. V., Arslanova G. R., Ziatdinova D. F., Ahmetova D. A., Safin R. G., Halitov R. A. [Determination of the mass conductivity coefficient taking into account the complex structure of plant cells in

the extraction process] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. [Woodworking industry]. 2020. No. 1. pp. 33-43. (In Russ.)

14. Kasenov R.Z., Demec O.V., Kartbaeva G.T., Zhumadilov S.S., Bakibaev A.A., Ahmedzhanov R.R. [Study of the quantitative yield of betulin from the Kyrgyz birch and the synthesis of its phosphorylated derivative] Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Medicina. Geografiya [Bulletin of the Karaganda University. Series: Biology. The medicine. Geography]. 2019. V. 95. No. 3. pp. 13-19. (In Russ.)

15. Ligostaeva Yu.V., Hanina M.A., Grek O.R., Rodin A.P. [Influence of birch bark grinding methods on the yield of biologically active substances] Journal of Siberian Medical Sciences. 2021. No. 3. pp. 14-24. (In Russ.)

16. Safina A.V., Abdullina D.R., Safin R.G., Arslanova G.R., Valeev K.V. [Energy- and resource-saving technology for extracting betulin from birch bark waste] Lesnoj vestnik [Forestry Bulletin]. 2021 V. 25 No. 4. pp. 99-106. (In Russ.).

©**Safina A.V.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: alb_saf@mail.ru; **Abdullina D.R.** – Master's student of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: dilya.panda@yandex.ru; **Ziatdinova D.F.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: ziatdinova2804@gmail.com; **Safin R. G.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Head of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: safin@kstu.ru; **Timerbaev N.F.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: cpekgeu@gmail.com; **Valeev K.V.** – postgraduate student of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: kirval116@mail.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 x 12 см.

Название таблиц: шрифт «Arial» кеглем 8 полужирный, выравнивание по ширине (**Таблица 1 - Название таблицы**)

Формулы, представленные в статье, должны по размеру помещаться в одну колонку, то есть иметь размер не более чем 8,5 x 5 см (шрифт «Times New Roman»).

Образец оформления статьи указан в конце журнала.

Химическая технология древесины

УДК 676+504.064.2.001.18

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ САМООЧИЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВОДОЕМА ПРИ ВЛИЯНИИ СТОКОВ СУЛЬФАТ - ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.С. Строганова, Н.А. Жильникова

В работе предложена трехкомпонентная модель биохимического окисления органического вещества, описывающая формирование качества воды участка водного бассейна и учитывающая не только специфичные показатели для стоков конкретного производства, но и наличие, а также видовой состав микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических веществ. Данная модель основана на уже существующей бимолекулярной модели биохимического окисления Шишкина А.И. С целью совершенствования данного подхода в математическую модель введен коэффициент учета микроорганизмов, отражающий скорость окисления органического вещества. Для расчета коэффициента учета микроорганизмов предложен алгоритм идентификации параметров модели биохимического окисления органических веществ. Представлены результаты исследований сточных вод сульфат-целлюлозного производства по сезонам и показателям растворенного кислорода, численности микроорганизмов и органических соединений, специфичных для данного типа стоков. Дан прогноз и сделана оценка качества природной воды озера в месте начального и основного разбавления сточных вод с использованием методов математического моделирования процессов биохимического окисления органического вещества. На основе разработанной модели сформирована методика оценки самоочищающей способности водоема, которая позволяет оценить допустимый уровень сброса загрязняющих веществ в водоем и сократить платежи за негативное воздействие сточных вод сульфат-целлюлозного предприятия на водный объект на 25-99% в зависимости от природы вещества и от сезона года. В качестве примера рассмотрены специфические вещества, которые контролируются в месте выпуска сточных вод сульфат-целлюлозного предприятия и в контрольном створе водного объекта – БПК_{полн}, метанол и лигнин сульфатный. Предложенные в работе модель и методика позволяют увеличить норматив сброса загрязняющих веществ в соответствии с реальной способностью водоема к самоочищению, а также снизить годовое значение платы за негативное воздействие на окружающую среду для показателей, отражающих органические вещества, за счет уменьшения платежей за сверхнормативный сброс.

Ключевые слова: *трехкомпонентная модель биохимического окисления органического вещества, методика оценки самоочищающей способности водоема, сульфат-целлюлозное предприятие, сточные воды сульфат-целлюлозного производства.*

Введение

Задачи оценки и прогноза качества воды в зонах влияния промышленных предприятий в городах - центрах нашей страны с каждым годом все больше набирают актуальность. Согласно Федеральному проекту «Сохранение уникальных водных объектов», который является частью Национального проекта «Экология», на данный момент следует уделить внимание сохранению уникальных водных объектов за счет восстановления и экологической реабилитации, очистки берегов и прибрежной акватории озер и рек, в том числе озера Байкал, Ладожского и Онежского озер, на берегах которых располагаются крупные градообразующие предприятия. Некоторые из этих предприятий относятся к отрасли целлюлозно-бумажной промышленности и являются объектами I категории негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) согласно Постановлению Правительства РФ N 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий от 31 декабря 2020 г.» [1]. В связи с изменением природоохранного законодательства, для таких предприятий разрабатывается комплексное экологическое разрешение, которое включает в себя экологические нормативы в области охраны атмосферного воздуха, водных объектов, обращения с отходами, а также закрепляет принципы технологического нормирования на

основе наилучших доступных технологий (НДТ) и выдается, на основании заявки, подаваемой в уполномоченный Правительством Российской Федерации федеральный орган исполнительной власти.

Целью работы является разработка трехкомпонентной модели биохимического окисления и методики оценки самоочищающей способности водоема для обоснования сброса очищенных сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Для достижения данной цели решались следующие задачи - формирование трехкомпонентной модели биохимического окисления сточных вод сульфат-целлюлозного производства на основе экспериментальных данных сведением коэффициента учета деятельности микроорганизмов в процессах биохимического окисления органических веществ и методики оценки самоочищающей способности водоема для согласования экологических нормативов и технологических показателей производства.

Методы исследования

В работе использовались методы химического и биологического лабораторного анализа компонентов сточных и природных вод, математическое моделирование с использованием программы MathCad 15.

Для определения концентрации растворенного кислорода, требуемого на окисление легкоокисляемого органического вещества в пробе с пересчетом в БПК, использовался стандартизированный метод йодометрического титрования согласно методике ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97. Для оценки процесса нитрификации параллельно проводились лабораторные исследования на содержание нитрит-ионов по методике ПНД Ф 14.1:2:43-95. Лигнин сульфатный определялся фотометрическим методом согласно ПНД Ф 14.1:2.216-06.

Определение количества клеток микроорганизмов проводилось по методу Коха путем посева на питательную среду для мезофильных аэробных микроорганизмов и факультативных анаэробов. Основная часть микроорганизмов (82%), обнаруженных в ходе исследований в зоне влияния сточных вод, относится к палочковидным формам, большая часть которых попадает в природные воды вместе со сточными из системы биологической очистки. Оставшаяся часть микроорганизмов относится к сапрофитам, населяющим водоем, и составляет 18%, которые питаются продуктами распада органических веществ. Результаты количественного определения микроорганизмов, проведенного по методу Коха, выражают в колониеобразующих единицах (КОЕ) в 1 см³ исследуемого субстрата.

Расчет коэффициента учета микроорганизмов осуществлялся с помощью численного моделирования на основе программы MathCad 15.

Основная часть исследования

На первом этапе рассмотрены подходы исследователей в области идентификации параметров модели биохимического окисления сточных вод различной степени очистки – Streeter H.W., Phelps E.B. (1925), Базякина Н.А. (1948), Терио Э.Д. (1937), Thomas R. Camp (1963), Шишкин А.И. (1989), Готовцев А.В. (2010) [2-6]. Следует отметить, что все подходы основаны на определении констант биохимического окисления эмпирическим или лабораторным методами.

Предложенный подход по идентификации параметров модели биохимического окисления сточных вод, который учитывает не только концентрацию органического вещества, выраженную в биохимическом потреблении кислорода (БПК) и растворенного кислорода, но и концентрацию микроорганизмов, участвующих в процессе биохимического окисления:

$$\frac{dC_{OB}}{dt} = -kC_{OB}^m C_{O_2}^n C_B^p, \quad (1)$$

где k – константа биохимического окисления органических соединений; C_{OB} – концентрация органических загрязнений по БПК, мг/дм³, C_{O_2} – концентрация растворенного кислорода мг/л, C_B – концентрация микроорганизмов или количество микроорганизмов, содержащихся в 1 дм³ воды, участвующих в процессе окисления; m , n , p — константы соответственно для показателя БПК, растворенного кислорода и концентрации микроорганизмов, специфичные для данного типа сточных вод, определяются эмпирическим путем по данным лабораторных и натурных исследований.

О росте микроорганизмов в естественных субстратах или в питательных средах судят по изменению количества их клеток или биомассы в единице объема. Методы определения этих показателей могут быть

прямыми (подсчет клеток под микроскопом, взвешивание) или косвенными. Косвенные методы основаны на измерении параметров, величина которых зависит от количества или биомассы микроорганизмов. Выбор метода зависит от целей исследования, свойств питательной среды или субстрата, а также особенностей роста и морфологии микроорганизмов.

Для расчета кислородного режима водоемов, а также для определения динамики изменения количества растворенной в воде органики используются мономолекулярная и бимолекулярная модели [3].

При большом дефиците кислорода и в условиях анаэробного режима кривая кислородного прогиба, построенная по уравнениям Стритера-Фелпса дает неправдоподобную картину – отрицательное значение растворенного кислорода в воде.

Профессором Шишкиным А.И. предложена схема процесса, в основе которой лежит положение о том, что скорость изменения БПК пропорциональна не только значению БПК, но и концентрации растворенного кислорода. В данном случае исследовалась применимость моно- или бимолекулярной модели для конкретного типа стоков с разной степенью очистки – очищенные или неочищенные. При этом, мономолекулярная модель записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_{БПК}}{dt} = -k_1 \cdot C_{БПК}^0 \\ \frac{dC_{O_2}}{dt} = -k_1 \cdot C_{БПК}^0 + k_2 \cdot (C_{O_{2np}} - C_{O_2}) \end{cases}, \quad (2)$$

где $C_{БПК}$ – концентрация органического углерода по БПК, мг/дм³; C_{O_2} – концентрация растворенного в воде кислорода, мг/дм³; $C_{O_{2np}}$ – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре, мг/дм³; k_1 – коэффициент биохимического окисления (минерализации), сут⁻¹; k_2 – коэффициент реаэрации (обогащение кислородом), сут⁻¹; t – время, сут.

Бимолекулярная модель записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_{БПК}}{dt} = -\alpha \cdot C_{БПК} \cdot C_{O_2} \\ \frac{dC_{O_2}}{dt} = -\alpha \cdot C_{БПК} \cdot C_{O_2} + \beta \cdot (C_{O_{2np}} - C_{O_2}) \end{cases}, \quad (3)$$

где α – коэффициент биохимического окисления для бимолекулярной модели, β – коэффициент реаэрации по бимолекулярной модели.

Процесс описывается системой уравнений Фелпса-Стритера. Система имеет ограниченный диапазон применимости: при больших дефицитах кислорода в условиях анаэробного режима кривая кислородного прогиба, построенная по уравнениям Фелпса-Стритера дает количественно неправдоподобную картину – отрицательное значение величины концентрации кислорода в воде, чего быть не может. Отсюда следует, что при такой концентрации БПК применять мономолекулярную модель нельзя. В этом случае можно использовать бимолекулярную или новую трехкомпонентную модель [3].

Кислородный режим оказывает большое влияние на процессы самоочищения, то есть окисление органических примесей и жизнедеятельность гидробионтов – организмов, населяющих водоем.

Основными факторами, зависящими от концентрации растворенного кислорода и влияющими на кислородный режим, являются температурный режим, гидрологический режим, уровень pH, легкоокисляемые и трудноокисляемые органические вещества, биогенные элементы и их производные, а также видовое разнообразие фито- и зоопланктона, донные отложения, сапробность водного объекта.

Обосновано применение взаимодополняемых интегральных параметров сточных вод сульфат-целлюлозного предприятия для внутрипроизводственного эколого-аналитического контроля и нормирования [7]. На основе литературы по теме работы и нормативных документов, в том числе ИТС 1 НДТ «Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона» [8-9], выбраны репрезентативные показатели качества сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности – БПК_{полн}, метанол лигнин

вод до контрольного створа в водоеме с учетом всех специфических показателей. Основным показателем окисления вещества является скорость его биохимического окисления.

Расчет скорости константы биохимического потребления кислорода осуществлялся по общей формуле [10]:

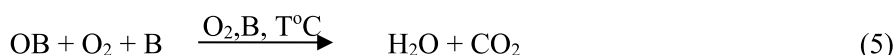
$$k_1 = \frac{1}{t} \lg \left(\frac{C_t}{C_{2t} - C_t} \right) \quad (4)$$

где C_{2t} , C_t – соответственно потребление кислорода по экспериментальным данным за время $2t$ и t .

Сложность применения бимолекулярной модели заключается в отсутствии данных по значениям коэффициента α . Для его определения в области применения мономолекулярной модели находится решение задачи в графическом виде. Оно единственно правильно, поэтому графический вид решения задачи по бимолекулярной модели совпадает с ним.

Растворенное и взвешенное органическое вещество природных вод является основным регулятором метаболизма водных экосистем. Общий органический углерод, из которого состоят органические соединения, по способности к биоокислению подразделяется на лабильный (который подвергается биохимическому окислению) и консервативный (водное гуминовое вещество - высокомолекулярный комплекс, помимо углерода состоящий из биогенных веществ и металлов, содержащихся в озере). Лабильная фракция озерного органического вещества значительно меньше консервативной, которая непрерывно находится в экосистемном круговороте веществ, то есть биологически доступная часть органического вещества, выраженная в показателе БПК_{полн} [11].

Тримолекулярные реакции можно рассматривать, как сложный процесс состоящих из двух бимолекулярных стадий. На первой стадии из двух частиц образуется промежуточная, которая реагирует с третьей молекулой и образуется продукт, в данном случае продуктом будет являться углекислый газ и вода:



Предложенная трехкомпонентная модель биохимического окисления органических веществ под воздействием растворенного в воде кислорода и микроорганизмов основана на бимолекулярной модели и записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_{OB}}{dt} = -\alpha \cdot C_{OB} \cdot C_{O_2} \cdot C_B \cdot n \\ \frac{dC_{O_2}}{dt} = -\alpha \cdot C_{OB} \cdot C_{O_2} \cdot C_B \cdot n + \beta \cdot (C_{O_{2np}} - C_{O_2}), \\ \frac{dC_B}{dt} = -\alpha \cdot C_{OB} \cdot C_{O_2} \cdot C_B \cdot n + \beta \cdot (C_{O_{2np}} - C_{O_2}) - \gamma \cdot C_B \end{cases} \quad (6)$$

где C_{OB} – концентрация органического вещества, мг/дм³; C_{O_2} – концентрация растворенного в воде кислорода, мг/дм³; C_B – концентрация микроорганизмов, участвующих в процессе биохимического окисления, мг/дм³, $C_{O_{2np}}$ – предельное содержание растворенного в воде кислорода при данной температуре, мг/дм³; α – коэффициент биохимического окисления для бимолекулярной и трехкомпонентной моделей, сут⁻¹; β – коэффициент реэрации для бимолекулярной и трехкомпонентной моделей, сут⁻¹, γ – коэффициент учета микроорганизмов в ходе процессов окисления, определяется экспериментальным путем, сут⁻¹; n – коэффициент согласования размерности (дм³)²/(мг)², принятый за 1. Начальными условиями модели являются $t = 0$ сутки; $C_{OB} = C_{OB}^0$, мг/дм³; $C_{O_2} = C_{O_2}^0$, мг/дм³; $C_B = C_B^0$, мг/дм³.

С помощью данной модели на основе исходных данных, полученных экспериментальным путем в ходе ряда исследований для разных сезонов с учетом изменения гидрометеорологических характеристик (температура воды и воздуха, осадков, скорости течения), рассчитан коэффициент γ для органических соединений, который отражает процессы биохимического окисления с учетом деятельности микроорганизмов. Значение данного коэффициента выше, чем ранее предложенного коэффициента k (4), поскольку скорость окисления с учетом микроорганизмов выше.

После определения параметров модели биохимического окисления органических веществ проводится расчет нормативов допустимого воздействия при участии микроорганизмов (γ) и платы за НВОС для отдельных показателей и на основе методики оценки самоочищающей способности водного объекта (рис. 1) формируются выводы качества водного объекта и могут быть предложены мероприятия, повышающие эффективность очистки и технологических процессов производства конечного продукта.

Идентификация параметров трехкомпонентной модели биохимического окисления щелочосодержащих сточных вод была проведена на основе экспериментальных данных, полученных в ходе исследования. Для расчета коэффициента, учитывающего процесс концентрации микроорганизмов в ходе окисления, применено программное обеспечение *MathCAD 15*.



Рис. 1. Алгоритм расчета параметров модели биохимического окисления загрязняющих веществ в сточных водах

Этапы алгоритма идентификации параметров модели:

1. Обозначить значения БПК, растворенного в воде кислорода и концентрацию микроорганизмов и присвоить им необходимые исходные значения.

Исходные данные для расчета задачи биохимического окисления, полученные экспериментальным путем в ходе исследований трансформации органического вещества от места выпуска сточных вод до контрольного створа, представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные для решения предложенной трехкомпонентной модели

t	c ₁	c ₂	c ₃	k ₁	k ₂	c _{опр}	v	H
°C	мг/дм ³	мг/дм ³	млн.кл./дм ³	сут ⁻¹	сут ⁻¹	мг/дм ³	м/с	м
14,3	5,5	5,7	4,4	0,061	0,4	10,2	0,67	25

Задача сводится к определению коэффициента учета микроорганизмов в ходе процессов окисления и трансформации органического вещества.

Обозначим концентрации через букву x с соответствующими индексами: $x_0 - c_1$ – значение показателя БПК, $x_1 - c_2$ – концентрация растворенного кислорода, $x_3 - c_3$ – концентрация микроорганизмов по КОЕ. При этом необходимо помнить, что в программе *MathCAD 15* индексы идут от нуля, не от единицы.

2. Задать начальные условия. Начальные условия задаются в виде матрицы:

$$x \equiv \begin{pmatrix} 5.5 \\ 5.7 \\ 4.4 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где c_1 – величина БПК, равна 5,5 мг/дм³, c_2 – концентрация растворенного кислорода равно 5,7 мг/дм³, c_3 – концентрация микроорганизмов, равна 4,4 мг/дм³.

3. Записать дифференциальные уравнения в виде, требуемом системой *MathCAD 15* для расчетов.

Запись дифференциальных уравнений определяется требованиями записи той функции, которую необходимо использовать для расчетов и в программе *MathCAD 15* будет выглядеть следующим образом:

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} -0.061x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 \\ -0.061x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.4(10.2 - x_1)^2 \\ -0.061x_0 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.4(10.2 - x_1)^2 - y \cdot x_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Буквой D обозначается дифференциальное уравнение в обыкновенных производных, она фигурирует в решающих функциях. В скобках t – время и переменная во времени величина.

4. Подобрать и правильно записать необходимую функцию для решения системы уравнений (4).

Для решения данного вида дифференциальных уравнений можно воспользоваться функцией *Bulstoer*. *MathCAD* дает следующее описание данной функции: «Возвращает матрицу значений решений для дифференциальных уравнений, указанных D с начальными условиями y_1, y_2 , используя метод Бюрлих-Стоера:

$$Z := \text{Bulstoer}(x, 0, 20, 40, D) \quad (9)$$

В данном случае, исходя из опыта, можно рекомендовать проводить расчет в сутках и задавать продолжительность процесса порядка 10-50 суток, например, 30 суток.

Для функции необходимо указать саму переменную (x) на интервале от 0 до 50, количество рядов выходной матрицы 40.

5. Построить графики зависимости концентраций БПК, растворенного кислорода и микроорганизмов, участвующих в процессе окисления, от времени.

6. Идентификация параметров модели биохимического окисления сточных вод. В ходе проведенного этапа моделирования и апробации тримолекулярной (трехкомпонентной модели) расчетным путем получен коэффициент γ , отражающий полноту биохимического окисления органического вещества с учетом взаимовлияния трех компонентов – органического вещества, растворенного кислорода и микроорганизмов, участвующих в процессе окисления. Значение коэффициента γ согласно проделанным исследованиям равно 0,6 сут⁻¹ и может являться параметром для многопараметральной конвективно-диффузионной модели трансформации загрязняющего вещества.

Методика идентификации параметров модели биохимического окисления, реализована на основе трехкомпонентной модели и применима для оценки и прогноза концентрации органических соединений, позволяет рассчитать параметры биохимического окисления загрязняющих веществ сточных вод, в том числе, коэффициент учета микроорганизмов и установить зависимости между величиной БПК, растворенного кислорода и количеством микроорганизмов в пробе в определенный момент времени. На

основе алгоритма идентификации параметров разработана методика оценки самоочищающей способности водоёма.

Методика оценки самоочищающей способности водоёма включает в себя несколько взаимосвязанных между собой этапов и основана на математической модели биохимического окисления (рис. 2).

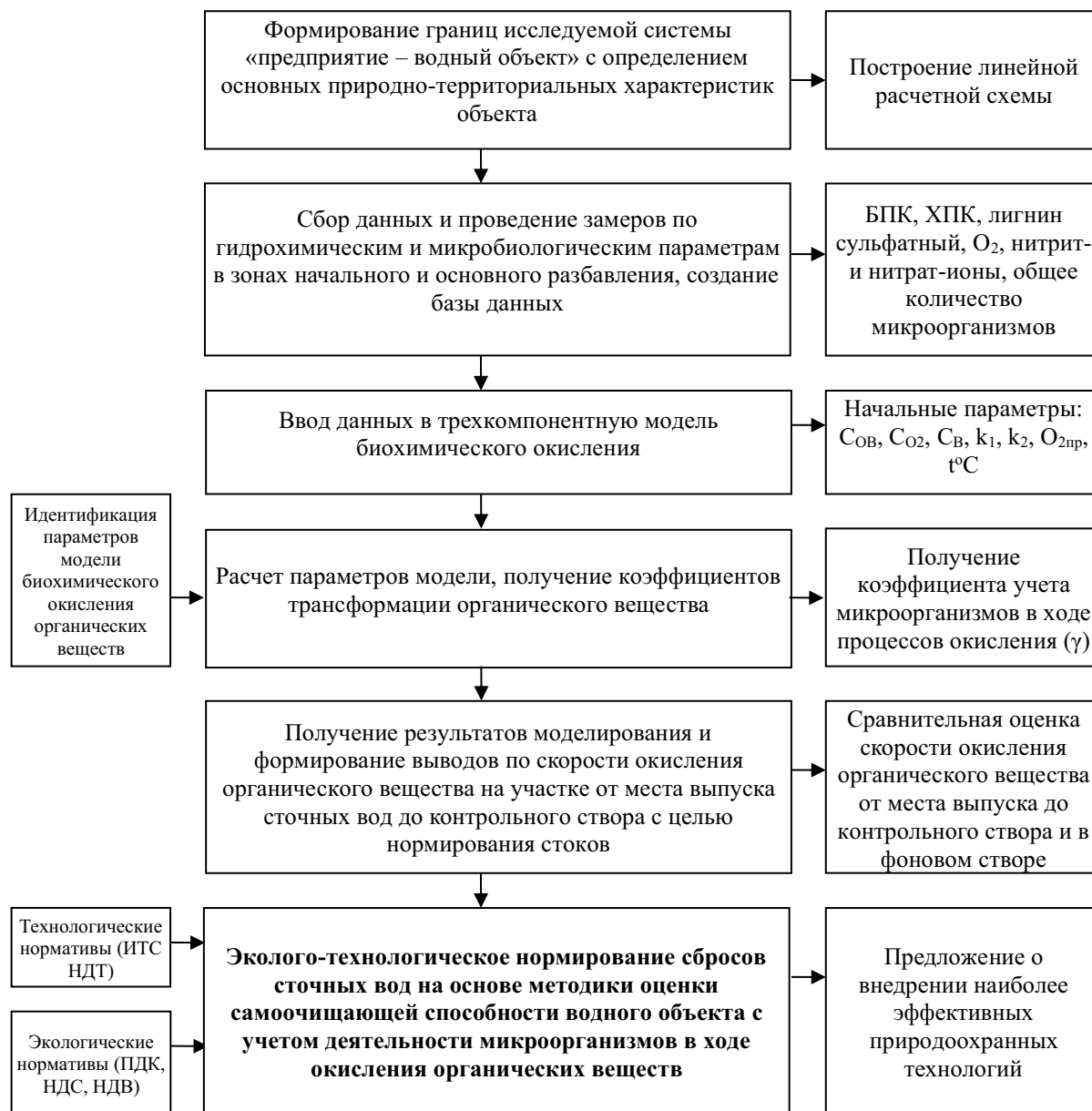


Рис. 2 - Методика оценки самоочищающей способности водного объекта

На следующем этапе определить репрезентативные показатели качества воды исследуемой зоны контроля, провести сбор данных и замеры по гидрохимическим и микробиологическим параметрам в зонах начального и основного разбавления. Сформировать базу данных по исследованным параметрам, отражающих специфику сточных вод (БПК₅, БПК_{полн}, ХПК, метанол, лигнин сульфатный, фенолы, нитрат-ионы, нитрит-ионы, растворенный кислород, количество микроорганизмов, выраженных в КОЕ).

Далее осуществляется ввод начальных параметров, необходимых для введения в модель – концентрация органического вещества (на примере БПК_{полн}), концентрация растворенного кислорода, количество микроорганизмов, участвующих в процессах окисления, выраженных в концентрациях, коэффициент биохимического окисления, коэффициент реаэрации, температурный режим.

Согласно разработанному ранее алгоритму идентификации параметров модели биохимического окисления органических веществ, представленному в предыдущей главе, производится расчет параметров модели, получение коэффициентов трансформации органического вещества. В ходе расчета получаются коэффициенты учета микроорганизмов в ходе процессов окисления (γ).

После чего следует этап получения результатов моделирования и формирование выводов по скорости трансформации органического вещества. Проводится сравнительная оценка скорости окисления органического вещества от места выпуска до контрольного створа и в фоновом створе с целью оценки процесса утилизации загрязняющего органического вещества. Следует отметить, что необходимо учитывать не только химическую трансформацию вещества, но и процессы перемешивания в толще воды и осаднения.

Процедура нормирования сточных вод завершается сравнением с нормативом репрезентативных показателей в контрольном створе и предложение мероприятий по корректировке технологических параметров производства и систем очистки согласно утвержденным наилучшим доступным технологиям в рассматриваемой отрасли.

Применение модели и методики отражено на примере расчета нормативов допустимого сброса в водный объект и установление размера платы за негативное воздействие на водный объект.

Расчет нормативов допустимого сброса в водный объект от целлюлозно-бумажного предприятия с учетом концентрации микроорганизмов

Подробный расчет для показателя БПК_{полн} приведен ниже. Исходные данные для расчета НДС с учетом микроорганизмов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета НДС по БПК_{полн}

Сезон	С _{БПКполн}	С _{БПК фон}	С _{О2}	С _{м/о}	Т	О _{2пр}	к (БПК)	γ (БПК)	q
	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	х10 ⁶ КОЕ/дм ³	°С	мг/дм ³	сут ⁻¹	сут ⁻¹	тыс. м ³ /сезон
ПДК _{р/х}	3,0	3,0	6,0/4,0						
весна	5,5	2,18	6,7	2,52	14,3	10,2	0,03	0,341	4284
лето	3,3	2,13	5,0	4,4	27	8,07	0,03	0,339	4083
осень	4,7	2,23	5,57	1,97	18	9,64	0,03	0,195	5049
зима	5,8	2,31	6,1	0,98	12	10,83	0,02	0,126	4450

где γ – коэффициент лабильности (способности к окислению) с учетом деятельности микроорганизмов.

Значение γ отражает скорость окисления органического вещества и получено расчетным путем на основе трехкомпонентной модели (6) биохимического окисления органического вещества. Исходные данные для расчета вспомогательных величин (γ) по трехкомпонентной модели (табл. 3).

Таблица 3 – Исходные данные для расчета вспомогательных величин по трехкомпонентной модели

Глубина участка, м	Скорость течения, м/с	Расстояние до контрольного створа, м	Время добегаания, сут	k ₂ , сут ⁻¹
25	0,05	500	0,12	0,02

Расчет допустимой концентрации (С_{НДС}) и нормативов допустимого сброса НДС проведен для специфичных показателей для целлюлозно-бумажного производства: БПК_{полн}, лигнин сульфатный, метанол.

При этом для расчета НДС использована формула с коэффициентом скорости γ , учитывающая деятельность микроорганизмов:

$$C_{НДС} = n(ПДК e^{\gamma t} - C_{\phi}) + C_{\phi} \quad (10)$$

где ПДК - предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в воде, мг/дм³; C_{ϕ} - условная фоновая концентрация загрязняющего вещества в водотоке выше выпуска сточных вод, определяемая в соответствии с действующими методическими документами по проведению расчетов условных фоновых концентраций химических веществ, мг/дм³; n - кратность общего разбавления сточных вод в водотоке; γ – введенный коэффициент учета микроорганизмов в ходе процессов окисления органического вещества, сут⁻¹; t - время добегания от места выпуска сточных вод до расчетного створа, сутки.

Рассмотрено два случая расчета для сравнения полученных величин НДС без учета микроорганизмов и с учетом. В таблице 4 приведены все исходные данные для расчета за разные сезоны для исследуемого объекта.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета нормативов допустимого сброса

<i>Сезон</i>	<i>Весна</i>	<i>Лето</i>	<i>Осень</i>	<i>Зима</i>
$T, ^\circ C$	14,3	27,0	18,0	12,0
$C_{БПК}$	5,5	3,3	4,7	5,8
$C_{лигнин}$	15,0	12,0	39,0	16,6
$C_{метанол}$	0,16	0,17	0,26	0,15
C_{O_2}	6,7	5,0	5,6	6,1
$C_{м/о}$	2,52	4,4	1,97	0,98
k (БПК)	0,03	0,03	0,03	0,02
γ (БПК)	0,341	0,339	0,195	0,126
k (лигнин)	0,04	0,03	0,04	0,03
γ (лигнин)	0,173	0,227	0,137	0,066
k (метанол)	0,04	0,045	0,05	0,04
γ (метанол)	0,533	0,181	0,117	0,371

Первый случай подразумевает, что $C_{доп}$ равен установленным значениям ПДК_{рыбхоз}, тогда величина НДС рассчитана по формуле 1 (табл. 5).

Таблица 5 – Величины $C_{доп}$ и НДС за каждый сезон без учета микроорганизмов

<i>$C_{доп}, \text{мг/дм}^3$ / НДС т/сезон без учета микроорганизмов</i>			
<i>Сезон / показатель</i>	<i>БПК_{полн}</i>	<i>Метанол</i>	<i>Лигнин сульфатный</i>
Зима	2,1 / 9,00	0,1 / 0,43	2,0 / 8,57
Весна	2,1 / 8,57	0,1 / 0,41	2,0 / 8,17
Лето	2,1 / 10,60	0,1 / 0,50	2,0 / 10,10
Осень	2,1 / 9,35	0,1 / 0,45	2,0 / 8,90

Во втором случае величина $C_{доп}$ рассчитана с учетом микроорганизмов по формуле 7, а величина НДС рассчитана по формуле 10 (табл. 6).

Значения $C_{доп}$ и НДС с учетом микроорганизмов возросли по сравнению с теми же величинами, но без учета деятельности микроорганизмов, что говорит о том, что микроорганизмы способны переработать большее количество органического вещества при сбросе в водный объект, что увеличивает самоочищающую способность водного объекта.

Таблица 6 – Величины $C_{\text{доп}}$ и НДС за каждый сезон с учетом микроорганизмов

$C_{\text{доп}}$, мг/дм ³ / НДС т/сезон с учетом микроорганизмов			
Сезон / показатель	БПК _{полн}	Метанол	Лигнин сульфатный
Зима	15,08 / 64,59	0,29 / 1,25	10,17 / 43,58
Весна	17,96 / 73,33	0,16 / 0,67	2,00 / 8,17
Лето	18,04 / 91,07	0,14 / 0,71	2,00 / 10,10
Осень	15,21 / 67,66	0,23 / 1,04	5,65 / 25,14

Расчет платы за негативное воздействие от предприятий ЦБП

По постановлению Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду" рассчитана плата за негативное воздействие от исследуемого целлюлозно-бумажного предприятия [12]. Ставка платы по показателям определена по Постановлению Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах" [13].

В таблицах 7 и 8 приведены результаты расчета с целью сравнения двух случаев для четырех сезонов, полученных по данным 2020 года, а также % снижения платы с учетом новой методики.

Таблица 7 – Общая плата за НВОС без учета микроорганизмов

Сезон	БПК _{полн}	Метанол	Лигнин сульфатный
Ед. измерения	руб/сезон	руб/сезон	руб/сезон
Зима	810607	211228	4779702
Весна	1271273	195259	4231200
Лето	1801182	365559	4428358
Осень	686867	1032331	3548624
Год	4569930	1804378	16987884

Учет микроорганизмов в расчете НДС позволяет увеличить норматив на 50-95% для показателей органического вещества (БПК_{полн}, лигнин сульфатный, метанол). Изменение значений НДС влечет за собой изменение платы за сброс загрязняющих веществ, в этом случае плата за сверхнормативный сброс снижается, что приводит к уменьшению издержек предприятия по экологическим платежам.

Таблица 8 – Общая плата за НВОС с учетом микроорганизмов

Сезон	БПК _{полн}	Метанол	Лигнин сульфатный
Ед. измерения	руб/сезон	руб/сезон	руб/сезон
Зима	11215	5482	2020873
Весна	15676	5164	4231200
Лето	21676	207332	4428358
Осень	10098	567851	2268858
Год	58664	785829	12949288
% снижения	98,7	56,4	23,7

Таким образом, предложенные в работе научные разработки позволяют увеличить норматив для сброса органического вещества, специфичного для рассматриваемой отрасли, при разработке проекта

НДС и получении комплексного экологического разрешения для предприятий целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, а также снизить годовое значение платы для показателей, отражающих органические вещества за счет уменьшения платежей за сверхнормативный и сверхлимитный сброс – по БПК_{полн}, плата снизится на 99%, метанол – на 55%, а лигнин сульфатный на 24 % за год.

Заключение

В ходе работы проведено теоретическое обоснование показателей биохимического окисления органических веществ сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Рассмотрены процессы окисления легкоокисляемых и трудноокисляемых органических вещества, которые выражены в показателях БПК_{полн}, метанол, лигнин сульфатный. Проведены экспериментальные исследования по определению взаимовлияния этих показателей с концентрацией растворенного кислорода и микроорганизмов, которые позволили определить основные параметры модели биохимического окисления органического вещества.

Введен и обоснован коэффициент учета деятельности микроорганизмов (γ) в процессах биохимического окисления органических веществ в стоках сульфат-целлюлозного производства, который уточняет значение скорости окисления органического вещества.

На основе существующих моно- и бимолекулярных уравнений, описывающих процессы окисления в зоне дефицита кислорода и без дефицита кислорода, разработана трехкомпонентная модель биохимического окисления сточных вод сульфат-целлюлозного производства. Данная модель позволяет рассчитать коэффициент учета деятельности микроорганизмов (γ) в ходе окисления вещества.

Предложен алгоритм идентификации параметров модели биохимического окисления органических веществ в стоках сульфат-целлюлозного производства, который позволяет определить расчетную схему участка в зависимости от рассматриваемых условий – по моно-, би- и тримолекулярным уравнениям.

На основе трехкомпонентной модели разработана методика оценки самоочищающей способности водоёма, применяемая в условиях влияния стоков предприятия для целей прогноза и нормирования качества водных экосистем, на которые оказывается техногенное воздействие.

Предложенные модель и методика оценки самоочищающей способности водоёма позволяют оценить реальную нагрузку со стороны исследуемого предприятия, рассчитать допустимую концентрацию загрязняющего вещества и норматив допустимого сброса этого вещества с учетом деятельности микроорганизмов. При этом значение НДС будет больше в сравнении с ранее предложенными методиками, которые не учитывают микробиологическую составляющую окисления органического вещества.

В работе проведена оценка экономического эффекта с учетом применения трехкомпонентной модели и уточненной формулы расчета НДС, результаты которой показали, что годовое значение платы для показателей, отражающих органические вещества, снизится на 25-99%. Данная позиция указывается предприятием при разработке комплексного экологического разрешения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90128.

Литература

1. Базякина Н.А. Расчет константы скорости потребления кислорода при определении БПК сточной жидкости. – Санитарная техника. №2, 1933, с.17-24.
2. Боголицын К.Г., Москалюк Е.А., Костогоров Н.М., Шульгина Е.В., Иванченко Н.Л. Применение интегральных показателей качества сточных вод для внутрипроизводственного эколого-аналитического контроля производства целлюлозы // Химия растительного сырья. 2021. №2. С. 343–352 DOI: 10.14258/jcrpm.2021027871
3. Готовцев А.В. Модификация системы Стритера–Фелпса с целью учета обратной связи между концентрацией растворенного кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы, 2010, т. 37, №2. С. 250–256.
4. Дружинин Н.И., Шишкин А.И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши /Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 329 с.
5. ИТС 1-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона (утв. Приказом Росстандарта от 15.12.2015

№ 1571) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200128661>. (Дата обращения – 12.12.2021).

6. Личутина Т.Ф., Боголицын К.Г., Гусакова М.А. Комплексная оценка негативного воздействия на окружающую среду предприятий ЦБП в соответствии с технологическими нормативами Европейского сообщества // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2011. – № 8. – С. 52–62.

7. Лозовик П.А., Рыжаков А.В. Трансформация, круговорот лабильных веществ и продукционно-деструкционные процессы в озерных экосистемах. // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. Journal of Siberian Federal University. Biology; 2017 № 10 (4) – с. 404-421. DOI: 10.17516/1997-1389-0042.

8. Постановление Правительства РФ N 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий от 31 декабря 2020 г.

9. Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду".

10. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах".

11. Терью Э.Д. Скорость потребления кислорода в загрязненных водах. Пер. с англ. В кн.: Вопросы загрязнения и самоочищения водоемов. Инст. комм, гигиены АН СССР, М., 1937.

12. Thomas R. Camp. Water and its impurities, VIII, 1963. -355 с.

13. Streeter H.W., Phelps E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River // U.S. Publ. Health Service Bull. . № 146. 1925. - pp. 1–75.

© **Строганова М.С.** – ассистент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (ФГБОУ ВО «СПбГУПТИД»), e-mail: masha199407@list.ru; **Жильникова Н.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ФГАОУ ВО «СПбГУАП»), e-mail: nataliazhilnikova@gmail.com.

UDC 676+504.064.2.001.18

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE SELF-PURIFYING CAPACITY OF WATER BODY UNDER THE INFLUENCE OF SULFATE -PULP PRODUCTION EFFLUENT

M.S. Stroganova, N.A. Zhilnikova

The paper proposes a three-component model of biochemical oxidation of organic matter, describing the formation of water quality in a water basin area and taking into account not only specific indicators for effluents of a particular production, but also the presence and species composition of microorganisms involved in the processes of oxidation of organic substances. This model is based on the already existing bimolecular model of biochemical oxidation by Professor A.I. Shishkin. In order to improve this approach, a coefficient of accounting for microorganisms was introduced into the mathematical model, reflecting the rate of oxidation of organic matter. An algorithm for identifying parameters of the model of biochemical oxidation of organic substances is proposed to calculate the coefficient of accounting for microorganisms. The results of studies of wastewater from sulfate-pulp production by seasons and indicators of dissolved oxygen, the number of microorganisms and organic compounds specific to this type of wastewater are presented. A forecast is given and an assessment of the quality of the natural water of the lake at the site of the initial and main dilution of wastewater is made using methods of mathematical modeling of the processes of biochemical oxidation of organic matter. Based on the developed model, a methodology for assessing the self-cleaning ability of a reservoir has been formed, which allows assessing the permissible level of discharge of pollutants into the reservoir and reducing payments for the negative impact of wastewater from a sulfate-pulp enterprise on a water body by 25-99%, depending on the nature of the substance and the season of the year. As an example, the specific substances that are controlled at the wastewater discharge site of a sulfate-pulp enterprise and in the control section of a water body - BOD_{tot} , methanol and sulfate lignin – are considered. The model and methodology proposed in the work allow to increase the standard of discharge of pollutants in accordance with the actual ability of the reservoir to self-purification, as well as to reduce the annual value of the fee for

negative environmental impact for indicators reflecting organic substances by reducing payments for excess discharge.

Keywords: *three-component model of biochemical oxidation of organic matter, methodology for assessing the self-purification capacity of a water body, sulfate-pulp plant, wastewater of sulfate-pulp production.*

References

1. Bazyakina N.A. Raschet konstanty skorosti potrebleniya kisloroda pri opredelenii BPK stochnoj zhidkosti. [Calculation of the oxygen consumption rate constant when determining the BOD of the waste liquid.] – Sanitarnaya tekhnika. [Sanitary equipment.] No. 2, 1933, pp.17-24. (In Russ.).
2. Bogolitsyn K.G., Moskalyuk E.A., Kostogorov N.M., Shulgina E.V., Ivanchenko N.L. Primenenie integral'nyh pokazatelej kachestva stochnyh vod dlya vnutriprouizvodstvennogo ekologo-analiticheskogo kontrolya prouizvodstva cellyulozy. [Application of integral indicators of wastewater quality for in-production ecological and analytical control of pulp production]. // Himiya rastitel'nogo syr'ya. [Chemistry of plant raw materials]. 2021. No.2. pp. 343-352 DOI: 10.14258/jcprm.2021027871. (In Russ.).
3. Gotovtsev A. B. Modifikaciya sistemy Stritera–Felpsa s cel'yu ucheta obratnoj svyazi mezhdu koncentraciej rastvorennogo kisloroda i skorost'yu okisleniya organicheskogo veshchestva [Modification of the system Streeter–Phelps with the aim of accounting for the feedback between the concentration of dissolved oxygen and oxidation rate of organic matter] // Vodnye resursy Water resources, 2010, vol. 37, No. 2. P. 250-256. (In Russ.).
4. Druzhinin N.I., Shishkin A. I. Matematicheskoe modelirovanie i prognozirovanie zagryazneniya poverhnostnyh vod sushi [Mathematical modeling and forecasting of pollution of the surface waters] / Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. - 329 p. (In Russ.).
5. ITS 1-2015. Information and technical guide to the best available technologies. Production of pulp, wood pulp, paper, cardboard (approved by Rosstandart Order No. 1571 dated 12/15/2015) [Electronic resource]. - Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200128661> . (Accessed 12.12.2021).
6. Lichutina T.F., Bogolitsyn K.G., Gusakova M.A. Kompleksnaya ocenka negativnogo vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu predpriyatij CBP v sootvetstvii s tekhnologicheskimi normativami Evropejskogo soobshchestva. [Comprehensive assessment of the negative environmental impact of CBP enterprises in accordance with the technological standards of the European Community] // Cellyuloza. Bumaga. Karton. [Cellulose. Paper. Cardboard]. - 2011. - No. 8. - pp. 52-62. (In Russ.).
7. Lozovik P.A., Ryzhakov A.V. Transformaciya, krugovorot labil'nyh veshchestv i produkcionno-destrukcionnye processy v ozernyh ekosistemah. [Transformation, the cycle of labile substances and productive and destructive processes in lake ecosystems] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya. [Journal of the Siberian Federal University. Biology]. 2017 No. 10 (4) - pp. 404-421. DOI: 10.17516/1997-1389-0042. (In Russ.).
8. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2398 "On Approval of Criteria for Classifying Objects that Have a Negative Impact on the Environment as Objects of Categories I and II, III and IV of December 31, 2020.
9. Decree "On the calculation and collection of fees for negative environmental impact" from 03.03.2017 N 255 (ed. from 17.08.2020).
10. Decree of the Government of the Russian Federation of 13.09.2016 N 913 (ed. of 24.01.2020) "On the rates of payment for negative environmental impact and additional coefficients".
11. Teryo E.D. Skorost' potrebleniya kisloroda v zagryaznennyh vodah. Per. s angl. V kn.: Voprosy zagryazneniya i samoochishcheniya vodoemov. [The rate of oxygen consumption in polluted waters]. Trans. from English. In the book: Issues of pollution and self-purification of reservoirs].// Inst. komm, Hygiene of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 1937. (In Russ.).
12. Thomas R. Camp. Water and its impurities, VIII, 1963. -355 p.
13. Streeter H.W., Phelps E.B. Investigation of pollution and natural purification of the Ohio River // USA Publishing House. Bull from the Health Service. . No. 146. 1925. - pp. 1-75.

© **Stroganova M.S.** – Assistant of the Department of Environmental Protection and rational use of natural resources; St-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, e-mail: masha199407@list.ru; **Zhilnikova N.A.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of innovation and integrated quality systems department; St-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: nataliazhilnikova@gmail.com.

УДК 678

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ДРЕВЕСНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

П.С. Захаров, Д.Д. Чирков, А.Е. Шкуро А.С. Ершова

В настоящей работе были рассмотрены вопросы термомеханической активации наполнителей для древесно-минеральных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Целью работы являлась оценка возможности повышения эксплуатационных свойств древесно-минеральных ПКМ с помощью термомеханической активации. В качестве полимерной матрицы для получения ПКМ в работе использован поливинилхлорид марки SG-5. В качестве наполнителей использовались смеси древесной муки марки 180 и пудры оксида кремния. Для активации древесно-минеральных смесей наполнителей, использованных в работе, применялись следующие методы: нагрев в открытой пресс-форме, нагрев в закрытой пресс-форме под давлением, кипячение смеси наполнителей в воде с последующей сушкой. Компаундирование компонентов осуществлялось методом экструзии. Для образцов полученных композитов были определены значения показателей ключевых физико-механических свойств: твердость по Бринеллю, контактный модуль упругости при сжатии, прочность при изгибе, ударная вязкость и водопоглощение после 24 часов выдержки. Установлено что термомеханическая активация древесно-минеральных смесей наполнителей является эффективным способом повышения их физико-механических свойств, в частности твердости, прочности при изгибе, а так же модуля упругости при сжатии. Наиболее эффективным методом термомеханической активации наполнителя показала себя выдержка древесно-минеральной смеси под давлением 0,7 МПа и температуре 150 °С в течение 60 минут. Активация данным методом также приводит к значительному увеличению производительности процесса экструзии.

Ключевые слова: ПКМ, термомеханическая активация, активация наполнителей, древесно-полимерные композиты, оксид кремния, ПВХ, минеральный наполнитель, физико-механические свойства, ДПК.

Введение

Введение минеральных наполнителей в состав полимерных материалов является широко распространённым и достаточно эффективным способом улучшить физико-механические свойства материала и снизить его стоимость [1]. Так, например, введение талька увеличивает прочность при растяжении и прочность при изгибе полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе полипропилена [2]. Введение в состав ПКМ карбоната кальция не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства материала, но позволяет, существенно снизить его стоимость. Использование минеральных наполнителей позволяет уменьшать ползучесть и усадку композитов. Некоторые виды минеральных наполнителей могут брать на себя функции смазывающих агентов [3].

Однако применение минеральных наполнителей, как правило, сопряжено с рядом трудностей. Их получение, особенно в случае получения высоконаполненных композиций, несет угрозу ускоренного абразивного износа деталей оборудования. В большинстве случаев добавление в ПКМ минерального наполнителя не волокнистой природы приводит к снижению ударной вязкости материала [4]. В работе [11] описывается негативное влияние минерального наполнителя в термопластичной полимерной матрице на показатель прочности при растяжении. Авторы отмечают, что при уменьшении размеров частиц наполнителя, прочность при растяжении возрастает. Присутствие мелкодисперсного минерального наполнителя также негативно сказывается и на показателе прочности при изгибе ПКМ. Снижение механических свойств ПКМ связанных с введением в их состав минеральных наполнителей можно компенсировать увеличением содержания агентов, улучшающих совместимость между фазами наполнителя и полимера, называемых компатибилизаторами.

Перспективными минеральными наполнителями для ПКМ являются различные минералы, в основе которых лежит оксид кремния, например кварц. Известно, что замена части древесной муки в составе ДПКт на измельчённый кварц приводит к значительному росту водостойкости материала. Известно, что введение нанодисперсного кварца в состав ПКМ оказывает положительный эффект на огнестойкость и термическую стабильность композиционного материала. При одновременном использовании в

полимерном композиционном материале полифосфата аммония и нанодисперсного кварца наблюдается синергетический эффект: значительно возрастает огнестойкость и физико-механические свойства [5].

Сегодня актуальными представляются попытки разработать оптимальные способы получения методом экструзии древесно-полимерных композитов с добавками пудры оксида кремния (ПОК). В работах [6, 7] показано, что замена части древесной муки на пудру оксида кремния (ПОК) в составе ДПКт приводит к значительному увеличению твердости по Бринеллю, модуля упругости при сжатии и водостойкости материала. Однако тоже время наблюдается заметное снижение показателей прочности при изгибе и ударной вязкости. Эти показатели являются одними из ключевых для изделий строительно-конструкционного назначения, сырьем для производства которых являются древесно-минеральные ПКМ. Одним из способов сохранения и улучшения свойств ПКМ с древесно-минеральными наполнителями может являться термомеханическая модификация наполнителя.

В основе принципов механической и термомеханической активации наполнителей лежит положение о том, что все материалы, независимо от их природы и агрегатного состояния, являющиеся в нормальных условиях химически пассивными, при определенных режимах обработки могут стать химически активными. Известно, что в рамках энергетического подхода механическую активацию описывают как процесс преобразования энергии из одних ее форм в другие. Считается, что определенная часть подводимой энергии поглощается твердым телом, что в свою очередь приводит к возникновению в нем дефектов структуры [7]. Дефекты структуры поверхности частиц наполнителей выполняют роль активных центров межфазного взаимодействия и положительно влияют на процессы структурообразования композита, обеспечивая прочные связи в системе наполнитель-матрица.

Наиболее распространенным методом механической активации наполнителей является помол. В настоящей работе помолу смеси наполнителей предшествовало их предварительное спекание, под давлением, либо совместное кипячение и последующая сушка. Целью данной работы являлась оценка возможности повышения эксплуатационных свойств древесно-минеральных ПКМ с помощью термомеханической активации наполнителя.

Методы и материалы

В качестве полимерной матрицы при получении древесно-полимерных и древесно-минерально-полимерных композиционных материалов в настоящей работе использовался суспензионный поливинилхлорид (ПВХ) марки SG-5 (Китай). Основным направлением применения ПВХ SG-5 является изготовление труб для наружных систем канализации. В качестве наполнителей были использованы древесная мука марки 180, производства ООО «Юнайт» (ГОСТ 16361-87) и пудра оксида кремния марки ПОК, ТУ 2169-001-21633301-2012, предоставлена ООО "МАН" (г. Челябинск). Пудра оксида кремния представляет собой мелкодисперсный материал (с размером частиц не более 0,5 мкм), состоящий из частиц формы близкой к сферической, получаемый в процессе высокотемпературной обработки кремнеземсодержащего сырья. Основным компонентом материала является диоксид кремния (не менее 85% по массе) аморфной модификации. Пудра оксида кремния марки ПОК предназначена для применения в качестве инертной добавки к каучуковым смесям, полимерам, пластикам, резинотехническим смесям и нанокерамике. В качестве смазывающего агента (лубриканта) смесь техническая стеариновая кислота марки Т-32.

Для активации древесно-минеральных смесей наполнителей, использованных в работе, применялись следующие методы: нагрев в открытой пресс-форме, нагрев в закрытой пресс-форме под давлением, кипячение смеси наполнителей в воде с последующей сушкой. В результате обработки наполнителей образовывались наполнитель таблетировался. Таблетки наполнителей измельчались с помощью лабораторной аналитической мельницы A1 Basic непосредственно перед экструзией. Рецептуры исследованных в работе композиционных материалов и условия активации наполнителей, входящих в их состав, представлены в таблице 1.

В соответствии с представленными рецептурами композиционных материалов, их компоненты были смешаны с помощью одношнекового лабораторного экструдера с тремя зонами нагрева при температуре 170 °С. После охлаждения из полученных стренгов методом горячего прессования изготавливались пластины, использованные для подготовки стандартных образцов для испытаний физико-механических свойств образцов ДПК.

Таблица 1 – Состав композитов и условия активации наполнителей

№ Опыта	Содержание компонента, %					Условия активации наполнителей			
	ПВХ	ДМ-180	ПОК	ДФФ	Стеарино вая кислота	Температура, °C	Давление, МПа	Время выдержки, минут	Время кипячения, минут
1	47,25	23,625	23,625	4	1,5	не подвергался модификации			
2	47,25	23,625	23,625	4	1,5	150	0,1	60	-
3	47,25	23,625	23,625	4	1,5	150	0,7	60	-
4	47,25	15,75	31,5	4	1,5	не подвергался модификации			
5	47,25	15,75	31,5	4	1,5	-		60	

Для полученных композитов были определены показатели следующих свойств: твердость по Бринеллю, контактный модуль упругости при сжатии, предел прочности при изгибе, ударная вязкость (прочность), а так же водопоглощение после 24 часов экспонирования в водной среде.

Результаты

Результаты испытаний физико-механических свойств образцов исследуемых композитов представлены на рисунках 1-6.

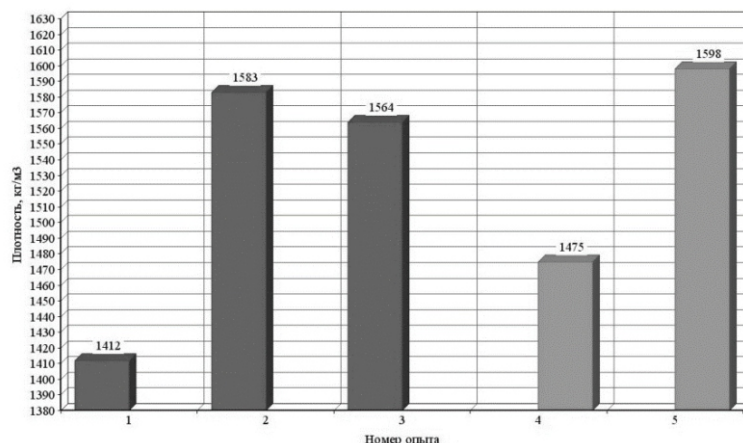


Рис. 1. Результаты определения плотности образцов композитов

Все рассмотренные варианты активации древесно-минерального наполнителя приводят к значительному увеличению показателей плотности, твердости и жесткости (модуля упругости), что объясняется в первую очередь улучшением взаимодействия между частицами древесной муки и пудры оксида кремния в процессе уплотнения и образования компактного тела. Вываривание наполнителей в пресной воде приводит к потере древесной мукой части экстрактивных веществ и связанной влаги, за счет чего древесная часть наполнителя становится тверже и жестче. Кроме того, совместное кипячение ПОК и ДМ обеспечивает высокую диффузию, а выделяющиеся из древесины экстрактивные вещества дополнительное склеивание частиц наполнителей.

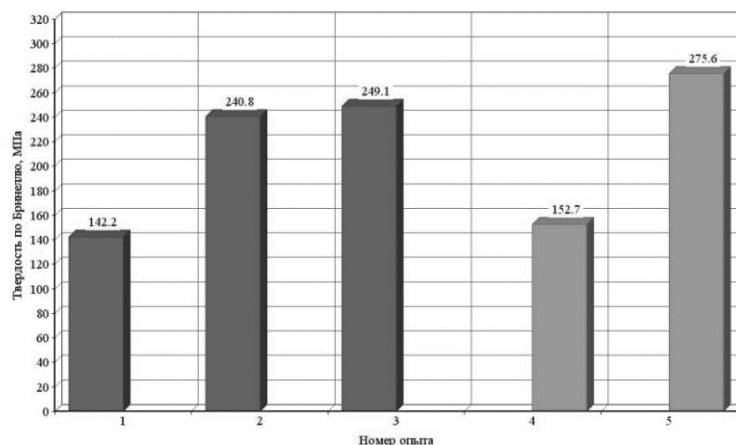


Рис. 2. Результаты определения твердости образцов композитов

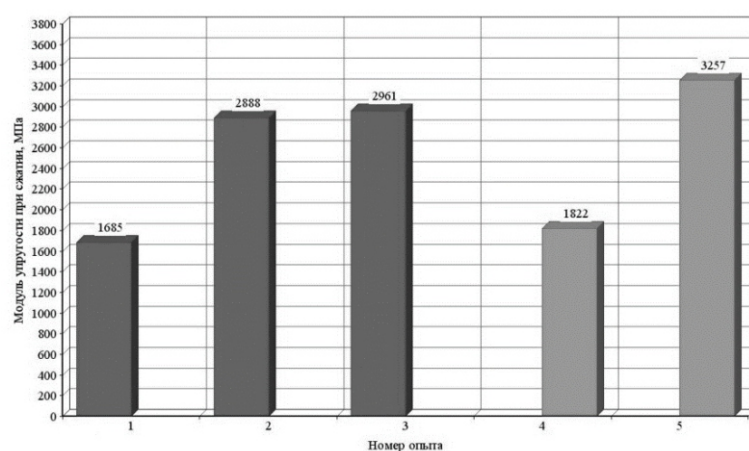


Рис. 3. Результаты определения модуля упругости при сжатии образцов композитов

Вследствие лучшего межфазного взаимодействия частиц наполнителей, наблюдается рост показателя прочности при изгибе у образцов с наполнителями, подвергнутыми термомеханической активации. Наиболее эффективным методом активации показала себя выдержка при температуре 150 °C и давлении 0,7 МПа (опыт 3). Вываривание древесины приводит к снижению показателя ударной вязкости материала и незначительно влияет на показатель прочности при изгибе

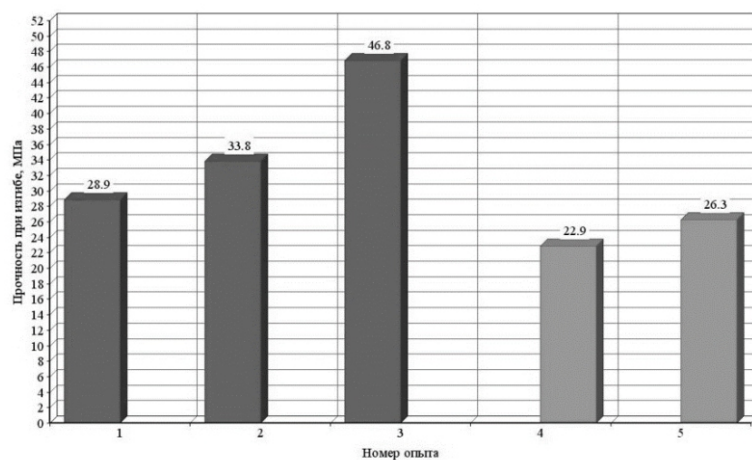


Рис. 4. Результаты определения прочности при изгибе образцов композитов

Термомеханическая активация наполнителей увеличивает жесткость частиц древесины, но так же повышает и хрупкость композиционного материала. При увеличении давления подпрессовки

возрастающая адгезия частиц наполнителей ведет к росту ударной прочности материала. Вываривание древесины приводит к значительному снижению показателя ударной вязкости, что объясняется повышением жесткости древесных частиц, связанной с потерей части влаги и экстрактивных веществ, оказывающих пластифицирующее действие на древесину.

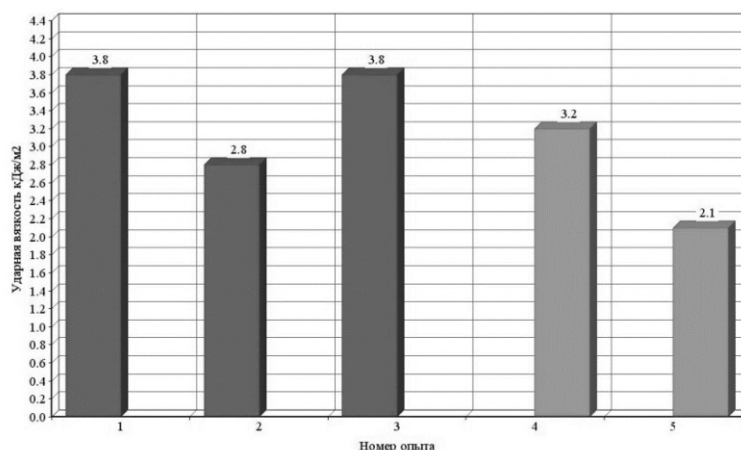


Рис. 5. Результаты определения ударной вязкости образцов композитов

Установлено, что, несмотря на значительное увеличение плотностей материалов, термомеханическая активация наполнителя практически не оказывает влияния на показатель водопоглощения за 24 часа образцов древесно-минеральных композитов.

Предварительная подпрессовка наполнителя приводит к значительному увеличению производительности процесса экструзии композиционного материала и может стать эффективной альтернативой стадии предварительной грануляции.

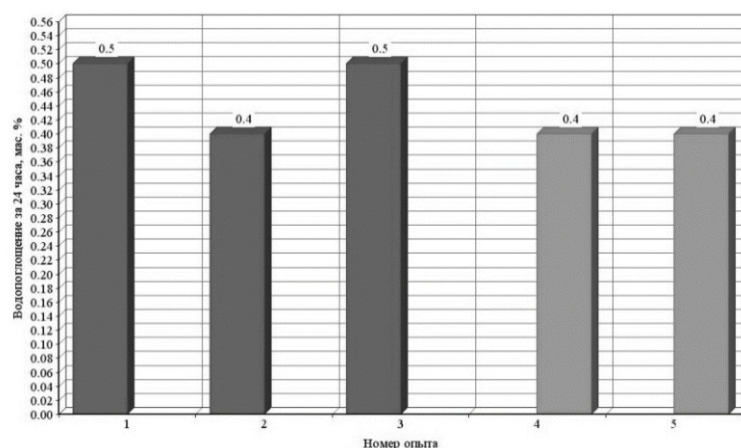


Рис. 6. Результаты определения водопоглощения за 24 часа образцов композитов

Заключение

Установлено что термомеханическая активация древесно-минеральных смесей наполнителей состава ПОК-древесная мука является эффективным инструментом повышения их физико-механических свойств, в частности твердости по Бринеллю, прочности при изгибе, а так же модуля упругости при сжатии. Исследованные способы активации наполнителя для древесно-минеральных композитов практически не оказывают влияния на показатель водопоглощения за 24 часа. Активация смеси наполнителей с помощью совместного кипячения приводит значительному снижению показателя ударной вязкости, что объясняется повышением жесткости древесных частиц, связанной с потерей части влаги и экстрактивных веществ, оказывающих пластифицирующее действие на древесину.

Наиболее эффективным методом термомеханической активации наполнителя для древесно-минеральных ПКМ среди рассмотренных является выдержка древесно-минеральной смеси под давлением 0,7 МПа и температуре 150 °С в течение 60 минут.

Активация наполнителя с помощью нагрева и выдержки под давлением наполнителя приводит к значительному увеличению производительности процесса экструзии материала и может стать эффективной и экономически целесообразной альтернативой стадии предварительной грануляции.

Литература

1. Клёсов А.А. Древесно-полимерные композиты/Клёсов А.А.//СПб: Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
2. Huda M. S. Mechanical, thermal, and morphological studies of poly(lactic acid) PLA/talc/recycled newspaper fiber hybrid green composites/ M.S. Huda, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, K. Williams, D.F. Mielewski, M. Misra//8th International Conference on Woodfiber - Plastic Composites, Madison. 2003. P. 11 -12.
3. Lerner I. High durability and low maintenance boost WPC prospects/I. Lerner//Chemical Market Reporter. 2003. V. 264. P.12.
4. Godara, A. Influence of additives on the global mechanical behavior and the microscopic strain localization in wood reinforced polypropylene composites during tensile deformation investigated using digital image correlation/ A. Godara, D. Raabe, I. Bergmann, R. Putz, U. Muller//Composites Science and Technology, 2009. V.69, P.139-146.
5. Mingzhu P. Synergistic effect of nano silicon dioxide and ammonium polyphosphate on flame retardancy of wood fiber-polyethylene composites/P. Mingzhu, M. Changtong, D. Jun, L. Guochen//Composites A. 2014. V. 66. P.128-134.
6. Шкуро А.Е. Древесно-полимерные композиты с пудрой оксида кремния / А.Е. Шкуро, А.Н. Матонин // Вестник технологического университета. 2020. Т.23, №6. С. 73-77
7. Шкуро А.Е. Получение и исследование свойств древесно-полимерных композитов с пудрой оксида кремния/ А.Е. Шкуро, А.Н. Матонин // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. №2. С. 63-70.
8. Авакумов, Е.Г. Механические методы активации химических процессов / Е.Г. Авакумов. - Новосибирск: Наука, 1986. - 306 с.

© **Чирков Д.Д.** – инженер-исследователь кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: den.chirkov12@yandex.ru; **Захаров П.С.** – аспирант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: zazaver@mail.ru; **Шкуро А.Е.** – канд.техн.наук, доцент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Ершова А.С.** - аспирант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: ershovaas@m.usfeu.ru.

UDC 678

THERMOMECHANICAL ACTIVATION OF WOOD-MINERAL FILLERS

D.D. Chirkov, P.S. Zakharov, A.E. Shkuro A.S. Ershova,

In this work, the issues of thermomechanical activation of fillers for wood-mineral polymer composite materials (PCM) were considered. The work aimed to assess the possibility of increasing the operational properties of wood-mineral PCM using thermomechanical activation. Polyvinyl chloride SG-5 was used as a polymer matrix for the production of PCMs. As fillers, mixtures of 180-grade wood flour and silica powder were used. To activate the wood-mineral mixtures of fillers used in the work, the following methods were used: heating in an open mold, heating in a closed mold under pressure, boiling the mixture of fillers in water followed by drying. Compounding of the components was carried out by extrusion. For the samples of the obtained composites, the values of indicators of key physical and mechanical properties were determined: Brinell hardness, contact modulus of elasticity in compression, flexural strength, impact strength, and water absorption after 24 hours of exposure. It has been established that the thermomechanical activation of wood-mineral mixtures of fillers is an effective way to increase their physical and mechanical properties, in

particular hardness, bending strength, as well as the modulus of elasticity in compression. The most effective method of thermomechanical activation of the filler was shown to be holding the wood-mineral mixture under a pressure of 0.7 MPa and a temperature of 150 ° C for 60 minutes. Activation by this method also leads to a significant increase in the productivity of the extrusion process.

Keywords: PCM, thermomechanical activation, filler activation, wood-polymer composites, silicon oxide, PVC, mineral filler, physical and mechanical properties, WPC.

References

1. Klyosov A.A. Wood-polymer composites / Klyosov A.A. // SPb: Scientific bases and technologies, 2010. 736 p.
2. Huda M. S. Mechanical, thermal, and morphological studies of poly (lactic acid) PLA / talc / recycled newspaper fiber hybrid green composites / M.S. Huda, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, K. Williams, D.F. Mielewski, M. Misra // 8th International Conference on Woodfiber - Plastic Composites, Madison. 2003. P. 11 -12.
3. Lerner I. High durability and low maintenance boost WPC prospects / I. Lerner // Chemical Market Reporter. 2003. V. 264. P.12.
4. Godara, A. Influence of additives on the global mechanical behavior and the microscopic strain localization in wood reinforced polypropylene composites during tensile deformation investigated using digital image correlation / A. Godara, D. Raabe, I. Bergmann, R. Putz, U Muller // Composites Science and Technology 2009. V. 69, P. 139-146.
5. Mingzhu P. Synergistic effect of nano silicon dioxide and ammonium polyphosphate on flame retardancy of wood fiber – polyethylene composites / P. Mingzhu, M. Changtong, D. Jun, L. Guochen // Composites A. 2014. V. 66. P. 128–134.
6. Shkuro A.E. Wood-polymer composites with silicon oxide powder / A.E. Shkuro, A.N. Matonin // Bulletin of the Technological University. 2020. Vol. 23, No. 6. S. 73-77.
7. Shkuro A.E. Obtaining and research of properties of wood-polymer composites with silicon oxide powder / A.E. Shkuro, A.N. Matonin // Woodworking industry. 2020. No. 2. S. 63 -70.
8. Avakumov, E.G. Mechanical methods of activation of chemical processes / E.G. Avakumov. - Novosibirsk: Nauka, 1986. -- 306 p.

© **Chirkov D.D.** – research engineer of the Department of PPI and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: den.chirkov12@yandex.ru; **Zakharov P.S.** – post graduate student of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: zazaver@mail.ru; **Shkuro A.E.** - PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Ershova A.S.** – postgraduate student of the Department of PPI and Polymer Processing, USFEU, e-mail: ershovaas@m.usfeu.ru.

