

Дерево —

ISSN 0011-9008

4/2020 обрабатывающая
промышленность

University of Natural Resources
Венский университет природных ресурсов
(г. Вена, Австрия)



University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna

ВЕНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ



Венский университет природных ресурсов и естественных наук (Universität für Bodenkultur Wien) известный также по своей аббревиатуре «BOKU». Изначально основан как университет сельского и лесного хозяйства в 1872 году, в настоящее время он охватывает уникальный научный спектр – от аграрных вопросов до биотехнологических исследований.

Основная цель университета – исследовать и охранять природные ресурсы, отвечая на вопросы социально-политической важности, которые влияют на всех нас. BOKU пользуется прекрасной репутацией и предлагает исключительную среду: различные области науки, научно-исследовательские темы, мнения, мультинациональная открытость.

Неотъемлемой частью BOKU является Венский институт биотехнологии, он считается домом для тех институтов, которые занимаются современными технологиями будущего и постоянно исследуют экологические проблемы.

BOKU стал первым австрийским университетом, который получил сертификат Европейского EMAS за систему экологического менеджмента в 2006 году. "Центр глобальных изменений и устойчивого развития" поддерживает университет в реализации их социальной ответственности.



Язык обучения: немецкий и английский.

Основные направления: Вода, атмосфера и окружающая среда; Нанобиотехнологии; Химия; Интегративная биология и исследования в области биоразнообразия; Пищевые науки и технологии; Экономика и социальные науки; Устойчивые сельскохозяйственные системы; Гражданское строительство и опасные природные явления; Лесоведение и почвоведения; Исследование почвы; Агробiotехнология; Прикладная генетика и клеточная биология; Материаловедение и технологические процессы; Биотехнологии; Использование биоресурсов и окружающей среды; Коневодство.

Дерево —

4/2020 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 ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический
университет»

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

Григорьев Игорь Владиславович, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «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»

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

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

Dr. prof. Vlado Goglia
University of Zagreb, Croatia

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

Dr. prof. Nencho Delijski
University of Forestry, Bulgaria

Dr. prof. Ladislav Dzurenda
Technical University, Slovakia

Dr. prof. Etele Csanady
University of West Hungary

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

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

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

© «Редакция журнала
«Деревообрабатывающая
промышленность», 2020

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

- Побединский В. В., Ляхов С.В., Салихова М.Н., Иовлев Г.А.**
Моделирование процессов ТО и Р парка лесозаготовительных машин с учетом
производственной эксплуатации 3
- Побединский В.В., Обабков И.Н., Иовлев Г.А., Ляхов С.В., Салихова М.Н.**
Интеллектуальное управление антиблокировочной системой автомобиля 11

Физико-механические процессы в деревообработке

- Никитина Т.А., Шестаков Ю.Д., Лабудин Б.В., Куницкая О.А., Тихонов Е.А., Калига А.Ю.**
Прочностной ресурс древесины лиственницы Беломорского Севера при сжатии в главных и
диагональных осях анизотропии 19
- Сафина А.В., Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Валеев К.В., Арсланова Г.Р.**
Исследование влияния концентрации водно-этанольного раствора на выход биологически
активных веществ из древесины лиственницы 31
- Захаров П.С., Кудрявцев А.Д., Шкуро А.Е., Глухих В.В., Шишлов О.Ф.**
Применение биомассы опавших листьев в качестве наполнителя для древесно-полимерных
композитов 39
- Саттарова З.Г., Сафин Р.Г., Фахрутдинов Р.Р., Байгильдеева Е.И.**
Теплоизоляционный древесно-полимерный композиционный материал 46

Химическая технология древесины

- Татаринова Д.В., Незнанов В.А., Шкуро А.Е., Глухих В.В., Шишлов О.Ф., Кулаженко Ю.М.**
Исследование свойств композиционного материала на основе пластифицированного ацетата
целлюлозы и технической конопли 55
- Сафиуллина А.Х., Илалова Г.Ф., Халитов Р.А., Петров В.И.**
Актуальные проблемы и перспективы применения полигидроксикарбоксидов 62
- Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Китаев С.В., Игнатьева Г.И.**
Технология переработки отходов лесной отрасли в угольные брикеты высокой прочности 69
- Валеева Р.Т., Понкратова С.А., Шурбина М.Ю., Ананьева О.В., Понкратов А.С.**
Сравнительная оценка процессов гидролиза отходов переработки целлюлозосодержащего
сырья 76
- Макаров А.А., Забелкин С.А., Земсков И.Г., Грачев А.Н., Бикбулатова Г.М., Башкиров В.Н.,
Шарафутдинов И.Р.**
Исследование пропиточного состава отработанных деревянных шпал методом термического
анализа 84
- Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Сафина А.В.**
Исследование характеристик разнотипного древесного сырья при изменении
конструктивных особенностей тарелок в реакторе отжига 92

Лесоинженерное дело

УДК 656*071.8(630)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТО И Р ПАРКА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН С УЧЕТОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. В. Побединский, С.В. Ляхов, М.Н. Салихова, Г.А. Иовлев

Рассмотрена проблема совершенствования технической эксплуатации парка лесозаготовительных машин. Главная идея заключается организации процессов ТО и Р с учетом производственной эксплуатации. Решение такой задачи позволяет установить функциональную зависимость потери производственных и экономических ресурсов от простоев машин по причине внезапных отказов, а также получить зависимость интенсивности отказов парка техники от нормативной наработки. В дальнейшем такие результаты могут послужить основой для решения фундаментальной проблемы управления технической готовностью парка по критерию эксплуатационных затрат в зависимости от нормативной наработки между ТО. Таким образом определена цель настоящих исследований, которая заключалась в разработке имитационной модели процесса технической эксплуатации парка лесозаготовительных машин с учетом производственной эксплуатации лесопромышленного предприятия. Задачи исследований включали: 1) постановку задачи моделирования парка техники в содержательном виде; 2) разработку алгоритма модели; 3) реализацию имитационной модели в среде SimEvents приложения Matlab; 4) численные эксперименты с имитационной моделью на тестовых примерах. Результатами работы являются предложенная постановка задачи моделирования процессов ТО и Р с учетом производственной эксплуатации в общем виде; алгоритм модели; имитационная модель в формате-SimEvents. Анализ результатов. Результаты анализированы с позиций научной новизны, отличия от известных аналогичных исследований и практической применимости. Рассмотренная идея высказывалась и ранее, но реализована не была. Поэтому предложенные результаты получены впервые, от предыдущих исследований их отличает реализация в виде алгоритма и программы в системе визуально-блочного имитационного моделирования SimEvents. Предложенная модель может послужить основой для создания и цифрового прототипа службы технической эксплуатации парка машин лесопромышленного предприятия.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, парк лесозаготовительных машин, процессы ТО и Р; моделирование в среде SimEvents, интенсивность отказов.

Введение

В настоящее время проблема управления технической готовностью парка машин предприятий не только не теряет свою актуальность, но и все больше возрастает, в первую очередь, по причине стремительного роста механизации всех производственных операций и связанных с этим эксплуатационных затрат. Внимание многих исследователей было уделено этой проблеме, но она в полной мере остается неразрешенной. Одной из важнейших причин тому является чрезвычайная сложность объекта исследований – системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) парка техники. По этой причине система рассматривается с точки зрения отдельных аспектов, акцентируя внимание на отдельно взятых факторах, выделяя конкретные параметр и т.д. В результате и соответствующие модели предлагаются также ограниченные исходными условиями. В настоящее время уже созданы системы компьютерной математики, моделирования, позволяющие создавать имитационные модели максимально реалистичные, соответствующие физическому объекту без существенных упрощений. Однако в области технической эксплуатации этот подход еще недостаточно проработан.

В теоретическом плане техническая эксплуатация парка техники рассматривается как отдельный вид деятельности предприятия, однако многие исследователи уже поднимали вопрос о целесообразности рассмотрения ее во взаимосвязи с производственной эксплуатацией и не только в технико-экономическом плане, а, например, моделируя эти процессы одновременно, что приведет к более

корректному решению проблемы оптимального управления технической готовностью. Но и этот аспект пока остается без внимания в научных изысканиях.

Особенно важной можно оценить практически неисследованную проблему установления зависимости эксплуатационных затрат от величины нормативного пробега (наработки), решение которой позволило бы наиболее эффективно управлять технической готовностью парка.

Учитывая недостаточное изученные стороны проблемы технической эксплуатации, применительно к парку техники лесопромышленного предприятия, определилась цель настоящих исследований, которая заключалась в разработке имитационной модели процесса технической эксплуатации парка лесозаготовительных машин с учетом производственной эксплуатации лесопромышленного предприятия.

Задачи исследований были следующие.

1. Постановка задачи моделирования парка техники в содержательном виде.
2. Разработка алгоритма модели и математического аппарата моделирования процесса ТО и Р.
3. Программная реализация имитационной модели.
4. Численные эксперименты с имитационной моделью на тестовых примерах.

Методы и средства исследований

В настоящих исследованиях использованы методы теории технической эксплуатации транспортных и технологических машин, технологии лесозаготовок, концепция событийного визуально-блочного имитационного моделирования. Для реализации алгоритма в имитационной модели использована система событийного моделирования SimEvents приложения Matlab.

Краткий обзор исследований проблемы

Проблема повышения эффективности управления технической готовностью парка техники в силу своей актуальности в разное время и с разными целями привлекала внимание многих исследователей.

Так в работе [1] для оценки значимости факторов, определяющих трудоемкость ТО лесозаготовительных машин (ЛЗМ) была предложена методика, которая апробирована в производственных условиях. Определены факторы, делающие вклад в себестоимость продукции не менее 30 %.

Технология выполнения технического обслуживания на местах их эксплуатации рассмотрена в работе [2], где приведена обобщенная информация о мобильных средствах ТО и Р машин на лесозаготовках.

Исследования [3] посвящены определению статистическими методами периодичности ТО и ремонта однотипных лесосечных машин. Особую ценность представляет установленная связь между простоями машин и производственными запасами запасных частей, что необходимо в теоретических исследованиях для адекватного моделирования работы парка.

Работа [4] посвящена установлению зависимости эффективности эксплуатации ЛЗМ от ее эксплуатационной надежности. Подробно рассмотрен процесс лесозаготовок и влияние простоев из-за внезапных отказов каждой машины на всю технологическую линию. В качестве эффективных мероприятий совершенствования использования парка предложена и исследована технология мобильного диагностирования ЛЗМ в условиях эксплуатации.

Правильная организация технической эксплуатации лесозаготовительных машин, рассмотрена в [5], как один из важнейших факторов, который определяет экономическую эффективность лесозаготовительного производства в целом. В ходе исследования были выявлены недостатки в системе технического обслуживания и ремонта лесной техники. Авторам представляется перспективным направление развития технического сервиса – это вовлечение заводов-изготовителей машин и оборудования в систему реализации, ремонта и технического обслуживания своей продукции в гарантийный и послегарантийный периоды эксплуатации.

Обеспечение уровня эксплуатационной технологичности ЛЗМ является инструментом увеличения эффективности работы лесопромышленного комплекса в целом. Но, как показано в работе [6], отсутствие во многих случаях нормативно-технических документов по продолжительности и трудоемкости ТО и Р затрудняет организацию рациональной технической эксплуатации парка машин. Для восполнения данного пробела в ходе экспериментальных исследований для форвардеров «Komatsu» определены

величины продолжительности и трудоемкости работ по ТО и рассчитаны значения единичных и комплексного показателей эксплуатационной технологичности.

В статье [7] предложены методические подходы к оценке плановой и фактической периодичности ТО, а также эффективности технических обслуживаний и фактически выполняемых ремонтов лесозаготовительных машин.

Для решения проблемы организацией технического сервиса на местах их эксплуатации, то есть непосредственно на лесосеках, автором [8] была предложена системы мониторинга машин, которая состоит из двух частей: бортовой и стационарной. Оперативная информация об отказах машин поступает от системы мониторинга технологии ГЛОНАСС и сотовой связи GSM.

В статье [9] рассмотрена надежность машин, используемых на лесозаготовительных и лесохозяйственных работах, показаны направления ее повышения в гарантийный период эксплуатации.

Как следует из краткого анализа обзора исследований, решение проблемы еще далеко от завершения и немаловажной причиной тому, можно полагать, является их базирование на старых подходах и методах научного поиска. Современные достижения информационных технологий позволяют более эффективно решать любые задачи, создавая более сложные и реалистичные модели, поэтому в дальнейших исследованиях проблемы опираться нужно на них. Особо следует отметить проблему обоснования нормативных данных для проектирования ремонтно-обслуживающих баз (РОБ), которые принимаются по документу 1990 г издания [10]. Если учесть, что они обоснованы по результатам статистических исследований 70-х годов, то они относятся к парку техники 50-летней давности.

Результаты

Постановка задачи моделирования ТО и Р парка техники в содержательном виде

Постановка задачи в содержательном виде предусматривает словесное описание работы объекта для выявления его особенностей, специфики поведения и последовательности действий при работе, входные и выходные параметры и другие свойства. В данном случае следовало определить основные требования к модели и решаемые задачи. По типу модель основана на теории массового обслуживания. Основной ее задачей является установление связи между нормативной наработкой между ТО, интенсивностью внезапных отказов и затратами на ТО и Р. Другой задачей модели является определение производственных и финансовых затрат от простоев по причине внезапных отказов.

Определим следующие качественные зависимости. При увеличении нормативной наработки интенсивность отказов парка увеличивается. Как следствие, увеличиваются простои технологических машин. При этом следует учитывать место машины в технологическом потоке. Если это головная машина в технологическом процессе лесозаготовок, то ее останов вызовет простои машин, зависящих от ее работы. Но следует учитывать и производственные межоперационные запасы. Одновременно с увеличением нормативной наработки снижаются затраты на плановые ТО и происходит некоторое увеличение технологической наработки машин, в данном случае объема лесозаготовок. Описанные процессы организованы в подсистему и формируют поток машин на сервис (очередное ТО или ремонт, в зависимости от интенсивности отказов).

После отработки описанной подсистемы, поступающий поток проходит ТО или ремонт, где моделируются все производственные и финансовые затраты на сервис. В этой подсистеме вероятностным образом моделируются виды операций, которые выполняются при конкретном виде ТО. После моделирования продолжительности каждой операции становится возможным рассчитать трудоемкость ТО. Для подсчета затрат ресурсов моделируются потребности в запасных частях и эксплуатационным материалам и рассчитывается их суммарная стоимость. В алгоритме учитываются простои в ожидании запасных частей. Они разделены укрупненно на группы по конструктивным системам машин (ходовой части, двигателю, электро- и гидрооборудованию, кузовным частям). Поскольку данные по простоям в ожидании запасных частей являются индивидуальными для каждого предприятия, то они задаются в модели в виде параметров распределений также заданного типа. Часть других данных, которые являются индивидуальными, также задается для каждого конкретного случая. При отладке модели эти данные задавались ориентировочно и по статистическому распределению большей части нормального типа. Схема описанного процесса работы приведена на рисунке 1.

Разработка алгоритма модели

Разработка укрупненного алгоритма модели в виде схемы процесса приведена на рис. 2. В алгоритме описаны элементы системы, их взаимодействие и основные процессы.

Поскольку модель разрабатывается как система массового обслуживания, то все основные параметры являются вероятностными и задаются статистическими распределениями, вероятностными данными или корреляционными зависимостями. Ряд зависимостей, которые не представляется возможным установить, представлены в виде нечетких моделей. Все параметры, нормативные данные [10] и особые условия формируются в файле базы данных Access.

Программная реализация алгоритма в имитационной модели

Реализация алгоритма модели выполнена в среде SimEvents приложения Matlab [12]. На рис. 2 приведены восемь главных подсистем: «Лесозаготовки механизированной валкой и вывозка в хлыстах», «Лесозаготовки харвестером и форвардером», «Ремонт автомобилей», «ТО автомобилей», «Ремонт технологических машин», «ТО технологических машин», «Ремонт харвестеров и форвардеров», «ТО харвестеров и форвардеров». В заключительных блоках «Трудозатраты на ремонт и обслуживание» рассчитываются суммарные затраты на ТО и Р парка. В первых подсистемах моделируется наработка всего парка машин и объемы лесозаготовок. Одной из выходных величин является поток техники на ТО или ремонт.

Для харвестеров и форвардеров предусмотрен сервис специализированной фирмой в виде агрегатного ремонта, что упрощает процесс моделирования. Каждая из подсистем имеет несколько уровней вложения. Так содержание вложенных подсистем «Зона ремонта» и «Зона ТО2» показано на рис. 3.

Схема моделирования работ по ТО и Р лесопромышленного предприятия



Рис. 1. Схема моделирования работ по ТО и Р с учетом производственной эксплуатации

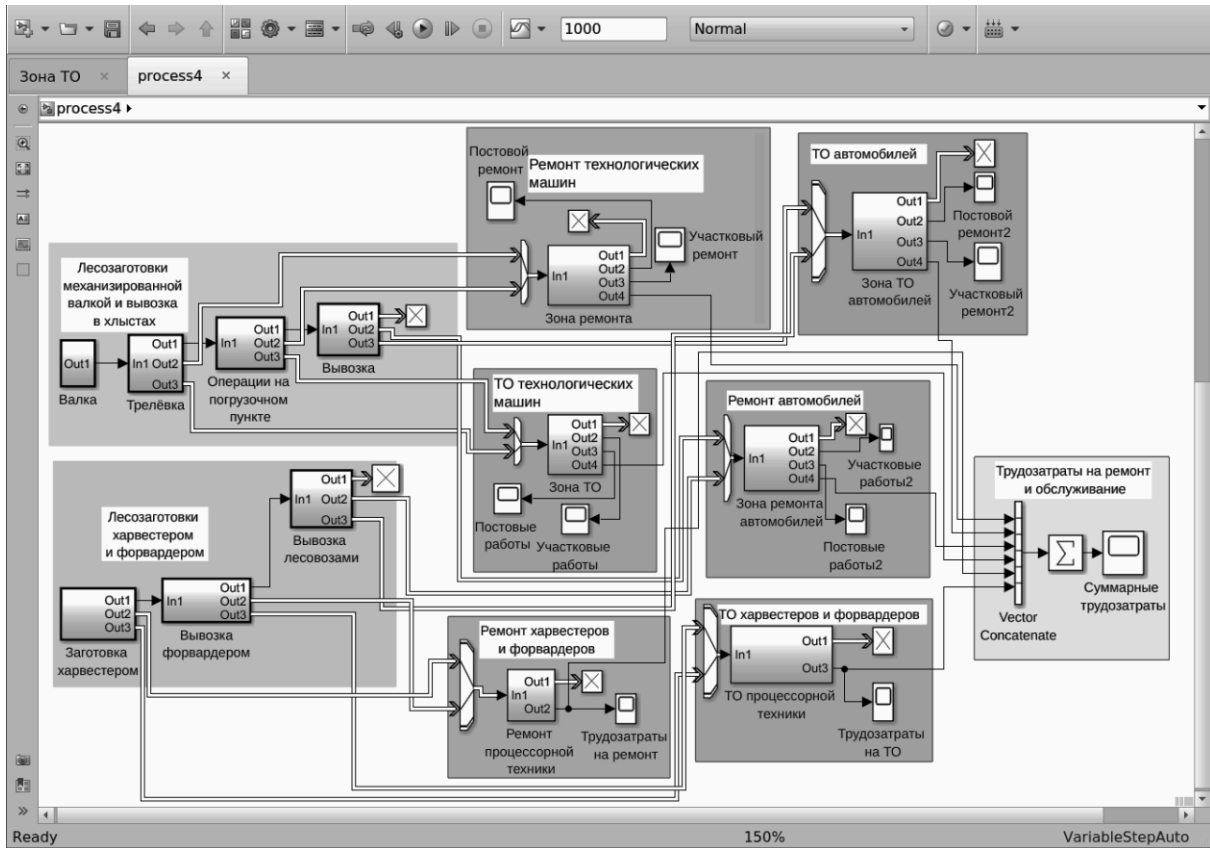
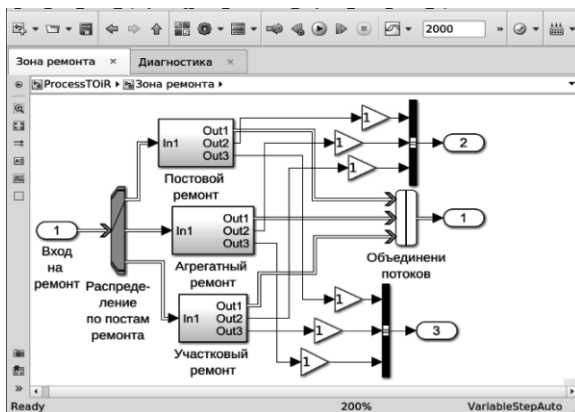
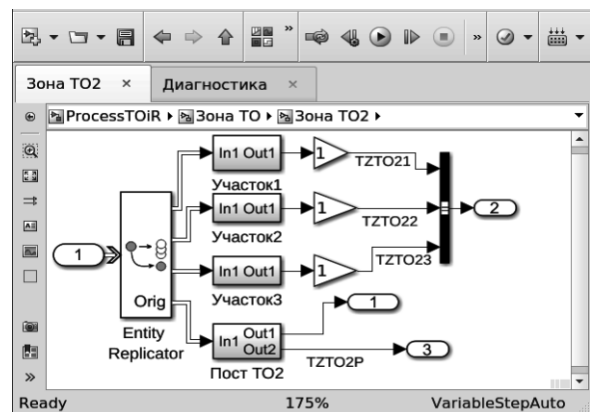


Рис. 2. Общая модель процесса ТО и Р с учетом лесозаготовок в SimEvents-формате



а)



б)

Рис. 3. Содержание подсистем «Зона ремонта» (а) и «Зона ТО2» (б)

Численные эксперименты с имитационной моделью на тестовых примерах

Для оценки адекватности модель тестировалась по реальным данным службы технической эксплуатации и процессов лесозаготовок лесопромышленного предприятия ООО «Леса Урала» (г. Серов). Задавалась технология лесозаготовок из одного харвестера и одного форвардера. Погрузка выполняется гидроманипулятором на лесовозном автомобиле. Результаты моделирования выводятся на электронные осциллографы (блоки Scope). Судя по предварительным графикам моделирования (рис. 4) при заданных параметрах – среднего объема хлыста $0,6 \text{ м}^3$, густоты древостоя 300 деревьев/га и расстояния вывозки 120 км будут наблюдаться накопления пачек сортиментов, т.е. межоперационных запасов древесины, что вполне согласуется с известными экспериментальными данными и

теоретическими обоснованиями. Аналогичные расчетные результаты получаются и при других сочетаниях параметров, что говорит о достаточной адекватности работы модели в первом приближении.

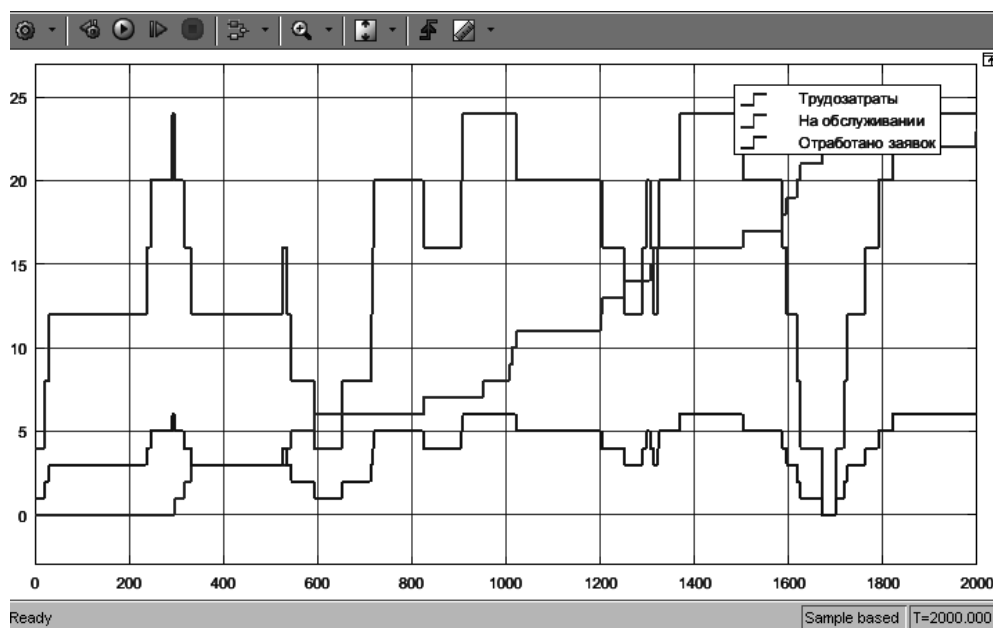


Рис. 4. Результаты тестовой проверки модели

Анализ результатов (обсуждение)

Для анализа результатов целесообразно обсудить их относительно следующих вопросов:

- какой научной новизной обладают полученные результаты;
- отличие результатов от предыдущих исследований;
- какое практическое применение предусмотрено для результатов.

В этом плане следует отметить, что впервые получена развитая имитационная модель в среде визуально-блочного моделирования, учитывающая практически все основные параметры процессов работы парка техники лесопромышленного предприятия.

В модели установлена связь величины нормативного пробега (наработки) машин между ТО с эксплуатационными затратами и удельными затратами на ТО и Р.

Впервые в имитационной модели рассмотрена техническая эксплуатация во взаимосвязи с эксплуатацией производственной, т.е. с процессами лесозаготовок.

В целом, вышеперечисленные особенности и дают отличие результатов от предыдущих исследований.

Практическое применение имитационная модель может найти в аналогичных исследованиях применительно к любым другим специфическим условиям, а также в практике проектирования как лесопромышленных процессов, так и процессов технической эксплуатации парка техники.

Заключение

Полученные результаты позволяют заключить следующее:

- в области управления технической готовностью пока не находят в полной мере решение проблемы обоснования системы ТО и Р с учетом производственной эксплуатации, т.е. в настоящем случае с учетом лесозаготовительных работ; также не решена проблема определения оптимальной нормативной наработки между ТО для ЛЗМ и лесовозным автомобилям; практически не используются в исследованиях процессов технической эксплуатации машин современные методы имитационного моделирования;

- предложенные алгоритм и его программная реализация в имитационной модели работ ТО и ремонта ЛЗМ с учетом производственной эксплуатации парка позволяет решать перечисленные выше проблемы, а проверка модели на численном эксперименте по тестовым примерам показывает

достаточную ее адекватность, что позволяет рекомендовать результаты для использования в исследованиях и проектирования ремонтно-обслуживающих баз лесопромышленных предприятий.

Библиографический список

1. Шиловский В.Н., Питухин А.В., Питухин Е.А. О значимости факторов, определяющих трудоемкость обслуживания лесных машин // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 2. – С. 1-12.
2. Тесовский, А. Ю. Пути повышения качества технического обслуживания и ремонта оборудования и машин лесозаготовок и лесного хозяйства на местах эксплуатации // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 5. – С. 40-41.
3. Запруднов В.И., Карпачев С.П., Быковский М.А. Потребность парка лесосечных машин в техническом обслуживании // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. – Т. 21 – № 2 – С. 76–79.
4. Сиротов А.В. Управление техническим состоянием машин лесопромышленного комплекса в условиях эксплуатации// Сиротов А.В., Тарлаков Я.В., Селиванов К.В. – Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник – 2016 – Т. 20 – № 3 – С. 112-115.
5. Сыромаха С.М., Керина Э.Н., Керина А.Р. О некоторых аспектах технической эксплуатации машинно-тракторного парка лесозаготовительных предприятий // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки – 2015. – Т. 1 – С. 268-271.
6. Обеспечение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. Шиловский В.Н., Питухин А.В., Кяльвийнен В.А., Костюкевич В.М. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2014 – № 6 (143) – С. 84-87.
7. Шиловский В. Н. Экспериментальная оценка организации технического обслуживания и ремонта лесозаготовительных машин / В. Н. Шиловский, Г. Ю. Гольштейн, В. А. Кяльвийн ен // Ученые записки Петрозаводского государственного университета: Серия «Естественные и технические науки». – 2012. – № 4 (125). – С. 93-95.
8. Тесовский, А.Ю. Дистанционная система мониторинга технического состояния технологических и транспортных машин ЛПК / А.Ю. Тесовский, А.С. Лапин // Вестник Московского государственного университета леса. – Лесной вестник – 2013. – № 1. – С. 170-174.
9. Тесовский, А. Ю. Надежность машин лесозаготовок и лесного хозяйства в гарантийный период эксплуатации/А. Ю. Тесовский//Техника и оборудование для села. – 2014 – № 1 (199) – С. 44 -46.
10. Положение о техническом обслуживании и ремонте машин и оборудования лесозаготовительной промышленности. – Химки, ЦНИИМЭ – 1990. – 273 с.
11. MATLAB & Simulink Release Notes for R2008a. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.mathworks.com>.
12. Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах: монография / Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург, УГЛТУ, 2003. –120 с.

© **Побединский В.В.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: pobed@el.ru; **Ляхов С.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры интеллектуальных систем, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: k@yandex.ru; **Салихова М.В.** – старший преподаватель кафедры технологических и транспортных машин, ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «УГАУ»), e-mail: salmar1981@mail.ru; **Иовлев Г.А.** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой сервиса транспортных и технологических машин и оборудования АПК ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «УГАУ»), e-mail: gri-iovlev@yandex.ru.

UDC 656*071.8(630)

MODELING MAINTENANCE AND REPAIR PROCESSES OF A FLEET OF FORESTRY MACHINES WITH REGARD TO INDUSTRIAL USE

V.V. Pobedinsky, S.V. Lyakhov, M.N. Salikhova, G.A. Iovlev

The problem of improving the technical operation of a fleet of forestry machines is considered. The main idea is to organize maintenance and repair processes with regard to industrial use. The solution of this problem

makes it possible to establish the functional dependence of the loss of production and economic resources on machine downtime due to sudden failures, as well as to obtain the dependence of the failure rate of a fleet of forestry machines on the standard operating time. In the future, such results can serve as the basis for solving the fundamental problem of managing the technical readiness of the fleet according to the criterion of operating costs, depending on the standard operating time between maintenance. Thus, the goal of this research was determined, which was to develop a simulation model of the process of technical operation of a fleet of forestry machines, taking into account the production operation of a timber industry enterprise. Research tasks included: 1) setting the problem of modeling the fleet of forestry machines in a meaningful form; 2) development of the model algorithm; 3) implementation of the simulation model in the SimEvents environment of the Matlab application; 4) numerical experiments with a simulation model on test examples. The results of the work are the proposed formulation of the problem of modeling the processes of maintenance and repair taking into account the production operation in general; model algorithm; simulation model in the SimEvents format. Analysis of the results. The results are analyzed from the standpoint of scientific novelty, differences from known similar studies and practical applicability. The considered idea was expressed earlier, but was not implemented. Therefore, the proposed results were obtained for the first time; their implementation in the form of an algorithm and a program in the SimEvents visual block simulation system distinguishes them from previous studies. The proposed model can serve as a basis for creating a digital prototype of the technical maintenance service for the forestry machine park.

Key words: maintenance and repair, forestry machine fleet, maintenance and repair processes; simulation in the SimEvents environment, failure rate.

References

1. Shilovsky V.N., Pitukhin A.V., Pitukhin E.A. [On the importance of factors that determine the labor intensity of servicing forest machines] // Resources and Technology – 2019. – Vol. 16. – No. 2. – pp. 1-12. (In Russ.).
2. Tesovskiy, A. Yu. Ways to improve the quality of maintenance and repair of equipment and machines for logging and forestry in the field of operation. Building and road machines. – 2017. – No. 5. – pp. 40-41. (In Russ.).
3. Zaprudnov V.I., Karpachev S.P., Bykovsky M.A. [The need of the fleet of cutting machines for maintenance] // Forestry Bulletin – 2017. – V. 21 –No. 2. – pp. 76-79. (In Russ.).
4. Sirotoy A.V. [Management of the technical condition of machines of the timber industry complex in operating conditions]// A.V. Sirotoy, Ya.V. Tarlakov, K.V. Selivanov – Bulletin of the Moscow State Forest University – Lesnoy Bulletin. – 2016. – Vol. 20.– No. 3 –pp. 112-115. (In Russ.).
5. Syromakha S.M., Kerina E.N., Kerina A.R.[On some aspects of the technical operation of the machine and tractor fleet of logging enterprises] // Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences. 2015. Vol. 1. P. 268-271. (In Russ.).
6. Shilovskiy V.N. [Ensuring operational manufacturability of logging machines] // Shilovskiy V.N., Pitukhin A.V., Kyalviyainen V.A., Kostyukevich V.M. – Scientific notes of Petrozavodsk State University. – 2014. – No. 6 (143). – pp. 84-87. (In Russ.).
7. Shilovskiy V.N. [Experimental evaluation of the organization of maintenance and repair of logging machines] / V.N. Shilovskiy, G. Yu. Golshtein, V.A. Kalviyainen // Scientific notes of Petrozavodsk State University: Series "Natural and technical sciences". – 2012. – No. 4 (125). – pp. 93–95. (In Russ.).
8. Tesovskiy, A. Yu. [Remote monitoring system of the technical condition of technological and transport machines of the timber industry complex] / A.Yu. Tesovskiy, A.S. Lapin // Bulletin of the Moscow State Forest University. – Forest Bulletin. – 2013. – No. 1. – pp. 170-174. (In Russ.).
9. Tesovskiy, A. Yu. Reliability of logging and forestry machines during the warranty period of operation / A. Y. Tesovskiy // Rural machinery and equipment. – 2014. – No. 1 (199) – pp. 44-46. (In Russ.).
10. Regulations on the maintenance and repair of machinery and equipment of the logging industry. - Khimki, TsNIIME, 1990. – 274 p.
11. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2008a. [Electronic resource] – URL: <http://www.mathworks.com>.
12. Hertz E.F. Assessment of forest management technology in logging operations: monograph / Ural State Forest Engineering University. – Yekaterinburg, USFEU, 2003. – 120 p.

© **Pobedinsky V.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Intelligent Systems, «Ural State Forest Engineering University» (USFU), e-mail: pobed@el.ru; **Lyakhov S.V.** – PhD of Technical Sciences, Associate

Professor of the Department of Intelligent Systems, USFU, e-mail: lyahovsv@m.usfeu.ru; **Salikhova M.V.** – Senior Lecturer of the Department of Technological and Transport Machines, USAU, e-mail: salmar1981@mail.ru; **Iovlev G.A.** – PhD of Economic Sciences, Professor of the Department of Service for Transport and Technological Machines and Equipment of Agroindustrial Complex, USAU, e-mail: gri-iovlev@yandex.ru.

УДК 004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АНТИБЛОКИРОВОЧНОЙ СИСТЕМОЙ АВТОМОБИЛЯ

В.В. Побединский, И.Н. Обабков, Г.А. Иовлев, С.В. Ляхов, М.Н. Салихова

Рассмотрена проблема совершенствования ходовых качеств автомобилей, которые в значительной степени зависят от тормозной системы. Особое значение имеет антиблокировочная система, функционально связанная с другими системами управления движением автомобиля. В этой связи внимание многих исследователей уделяется проблеме совершенствования ABS. Анализ работ по этой теме показывает, что несмотря на значительно количество работ, проблема, тем не менее, в полной мере остается не решенной. В частности, прерывистый характер торможения при движении юзом не является оптимальным. В настоящее время такие практические приложения теории нечетких множеств, как нечеткое моделирование, нечеткая логика, являющиеся основным аппаратом интеллектуальных систем, позволяют решать подобные проблемы автоматического регулирования. Таким образом была определена цель настоящих исследований, которая заключалась в разработке интеллектуального управления на нечеткой логике ABS автомобиля. В задачи исследований входили: 1) Постановка задачи в содержательном виде; 2) Введение нечеткости в задачу управления; 3) Разработка базы правил; 4) Программная реализация модели нечеткого управления. Результатами исследований явилась предложенная модель интеллектуального управления на нечеткой логике, реализованная в среде системы Scilab. Практическое применение результатов может быть рекомендовано для использования при проектировании и совершенствовании систем автоматического управления ABS автомобилей.

Ключевые слова: ABS автомобиля, интеллектуальная система, нечеткая логика, нечеткое моделирование.

Введение

Тормозная система является важнейшей для обеспечения безопасности любого транспортного средства, поэтому поиски путей ее совершенствования проводились как с момента создания первого автомобиля, так и не прекращаются и на сегодня. За это время были созданы различные конструкции тормозной системы, в эволюции которой явно просматривается тенденция к усложнению этого механизма. Одной из причин является взаимосвязь процесса торможения с другими процессами движения и управления автомобилем.

На сегодня наибольшее значение имеет антиблокировочная система тормозов ABS (Antiblock Brake System). Основным назначением этой системы является исключение блокировки колес при внезапном торможении. Но на сегодня, в процессе совершенствования ходовых качеств автомобиля, эту систему необходимо связывать с системами другого функционального назначения, т.к. операция торможения в той или иной степени выполняется и в этих системах.

В числе таких систем можно перечислить следующие:

– ASC (Automatische Stabilitäts Control) - антипробуксовочная система совместно с регулятором тяги ASC+T. При возникновении пробуксовки ведущих колес система снижает крутящий момент привода, но если этого недостаточно, то выполняет подтормаживание. Аналогичной системой является ASR (Antriebs-Schlupf-Regelung) предназначенная для автоматического регулирования ведущими колесами по их буксованию. Более интеллектуальной версией последней является A-TRC (Active Traction Control) – это активная антипробуксовочная система. Для обеспечения аварийного торможения при недостаточном усилии со стороны водителя служит система BA (Brake Assist) – усилитель тормозов. Для учета специфики торможения на поворотах предназначена CBC или система контроля торможения.

– Известна система DAC (Downhill Assist Control) помощи при спуске по склону. На крутых спусках, когда система DAC обнаруживает, что скорость автомобиля больше скорости вращения колес, она автоматически изменяет тормозное усилие на отдельных колесах.

– DBC (Dynamic Brake Control) система, которая регулирует тормозные усилия в зависимости от нагрузки на оси. Она распознает экстренное торможение и самостоятельно включает тормоза на полную мощность.

– DSC (Dynamic Stability Control), аббревиатура, используемая фирмой BMW для обозначения электронной системы стабилизации автомобиля. По сути - это то же, что и ESP.

– DTC (Dynamic Traction Control) – противобуксовочная система.

– EBD (Electronic Brake Distribution) – система электронного распределения тормозного усилия. Работает в комплексе с системой ABS, обеспечивая с помощью электроники равномерное распределение тормозного усилия между всеми четырьмя колесами, чтобы обеспечить каждому из них оптимальное сцепление с дорогой.

– EDC – система электронной регулировки жесткости амортизаторов подстраивает жесткость амортизаторов BMW в зависимости от состояний дорожного полотна, загрузки автомобиля и условий движения. Электронный управляющий блок, исходя из колебаний автомобиля, определяет оптимальный уровень амортизации. При трогании с места, торможении и изменении направления движения он выше, а при плавном движении ниже.

Коэффициент трения скольжения значительно ниже коэффициента трения покоя. Поэтому длина тормозного пути с заблокированными колесами будет больше, чем длина тормозного пути с ещё вращающимися колесами. При этом тормоза обеспечивают усилие чуть меньше того, что требуется для полной блокировки колеса. При достаточном опыте водитель способен чувствовать это усилие сам, и, если колеса заблокировались, он немного ослабляет нажатие на педаль тормоза, однако при этом он не способен уменьшить давление и тормозное усилие на одном, заблокированном колесе. Система ABS следит за вращением колес и в случае их блокировки слегка уменьшает давление в тормозной системе, чтобы дать колесу провернуться, а затем вновь увеличивает силу сжатия. Таким образом достигается возможность корректировки курса автомобиля в условиях экстремального торможения. Однако при этом осуществляется процесс прерывистого торможения, которое является далеко не оптимальным. Взаимосвязь ABS с вышеперечисленными функциональными системами делает актуальной проблему ее совершенствования, поэтому большая часть исследований посвящено отдельным элементам конструкции [1-4] или улучшению некоторых параметров [5-7]. Но следует отметить, что если в конструктивном плане ABS достаточно качественно отработана, то с появлением новых методов интеллектуального автоматического управления выявляются резервы ее совершенствования. В настоящее время используется интеллектуальное управление такими процессами на основе нечеткой логики [8,9], которое во многих случаях бывает более эффективным. В этой связи некоторые работы по ABS базировались на новых методах интеллектуального управления [10-11], но проблема остается не решенной.

Таким образом определилась цель настоящих исследований, которая заключалась в разработке системы интеллектуального управления ABS на нечеткой логике.

Чтобы разработать подобную систему, в данном случае были выполнены следующие процедуры.

1. Постановка задачи управления на нечеткой логике в содержательном виде.
2. Введение нечеткости в задачу (разработка функций принадлежности для входных и выходных переменных).
3. Создание базы правил нечеткой продукции.
4. Программная реализация модели интеллектуального управления (нечеткий вывод, приведение результатов к четкости (дефаззификация) и получение результирующих функций управления).

Методы и средства исследований

В настоящих исследованиях использованы методы теории нечетких множеств, интеллектуальных систем, нечеткой логики, нечеткого моделирования [11]. Для программной реализации использована система визуально-блочного имитационного моделирования Scilab и ее приложение для разработки нечетких систем flsEditor [12].

Результаты

Постановка задачи в содержательном виде. Постановка задачи в содержательном виде предназначена для определения основных зависимостей поведения объекта исследований от различных факторов и их сочетаний. Система ABS должна работать по входным сигналам от датчиков. Датчика линейной скорости перемещения автомобиля V_a и датчика вращения колеса W_k . При этом расчетная от угловой скорости линейная скорость колеса должна быть равна линейной скорости перемещения автомобиля. Если линейная скорость обода колеса выше скорости перемещения автомобиля, то происходит пробуксовка колеса. При линейной скорости обода колеса (крайней точки радиуса, т.е. поверхности шины) меньше скорости движения автомобиля, будет наблюдаться скольжение или движение юзом.

Задача контроллера на нечеткой логике будет заключаться в обеспечение равенства указанных скоростей. Либо растормаживая колесом (при юзе), либо притормаживая (при пробуксовке). Последнее действие будет даже логичнее обеспечить путем снижения подачи горючей смеси, что может решиться технически, а для управления это одно и то же.

Определим основные качественные характеристики процесса интеллектуального управления. Если разница в выше указанных скоростях большая, то команда контроллера тоже должна вызывать большее управляющее воздействие, т.е. зависимость прямо пропорциональная. Второй параметр управления – скорость изменения скорости или ускорение имеет более выраженное качественное значение и также зависимость является прямо пропорциональной. Строго говоря, она будет не линейная, а ближе к экспоненциальной.

Эти основные качественные зависимости следует учитывать при разработке базы правил.

Введение нечеткости в задачу. Определение входных и выходных переменных задачи управления. Для формализации неопределенностей в задаче используются лингвистические переменные для описания входных и выходных параметров [11].

Выходные переменные. В данном случае одним выходным параметром может быть величина электрического сигнала в миллиамперах, который затем преобразуется в силу прижима P тормозных колодок к колесному диску. Примем величину изменения выходного сигнала в диапазоне от 0 до 300 мА.

Усовершенствуем контроллер для управления ABS, предусмотрев для него еще один выходной параметр, который будет управлять процессом пробуксовки колеса. Эта возможность объясняется тем, что входные параметры будут использоваться одни и те же для обоих процессов. Но при пробуксовке линейная скорость обода колеса будет больше линейной скорости перемещения автомобиля и в данном случае следует не притормаживать, а снижать число оборотов двигателя N . Снижать обороты нужно не до нуля, а до оборотов холостого хода, например, 1000 об/мин, чтобы двигатель не заглох. Это будет нижний предел числа оборотов, а верхним пределом можно взять максимальное значение от номинальных оборотов, в большинстве двигателей это примерно 5000 об/мин. Технически этот выходной параметр управляет процессом впрыска топлива, поэтому он тоже может быть задан электрическим сигналом, но для решения задачи в общем виде оставим размерность выходного сигнала в оборотах двигателя от 1000 до 5000 мин⁻¹.

Входные переменные. Первой входной переменной будет разность или дельта линейных скоростей ΔV колеса V_k и движения автомобиля V_a . Линейная скорость колеса есть расчетное значение от его частоты вращения, а значение скорости движения автомобиля поступает в контроллер от спидометра.

Записать эти условия можно следующим образом.

$$V_k - V_a = \Delta V,$$

при $\Delta V > 0$ – пробуксовка колеса;

при $\Delta V < 0$ – движение юзом.

Изменение переменной ΔV можно принять в диапазоне от -75 до 75 м/с.

Вторым важнейшим значением будет скорость изменения разности указанных скоростей или ускорение U . Назначением его в системе регулирования будет прямо пропорционально влиять на выходной параметр. Т.е. чем больше будет изменение разности или дельты линейных скоростей ΔV , тем большее значение должна иметь выходная переменная т.е. параметр на выходе нечеткого контроллера.

Для формализации всех переменных задачи воспользуемся ключевыми объектами теории нечетких множеств – лингвистическими переменными с соответствующими термножествами [11]. Примем в качестве термножеств в середине интервалов треугольные нечеткие множества, а по краям интервалов

трапецеидальные. Для первой входной переменной ΔV приняты следующие значения лингвистических переменных: «Большое отрицательное» – BN; «Малое отрицательное» – MN; «Ноль» – Z; «Малое положительное» – MP; «Большое положительное» – BP.

В терминах теории нечетких множеств лингвистические переменные определены терм-множествами со следующие значениями:

- «Разность скоростей, ΔV » {BN, MN, Z, MP, BP};
- «Ускорение, U » {Min, M, Max};
- «Прижим колодок, P » {Min, M, Max};
- «Обороты, N » {Min, M, Max}.

Разработанные лингвистические переменные задачи приведены на рис. 1.

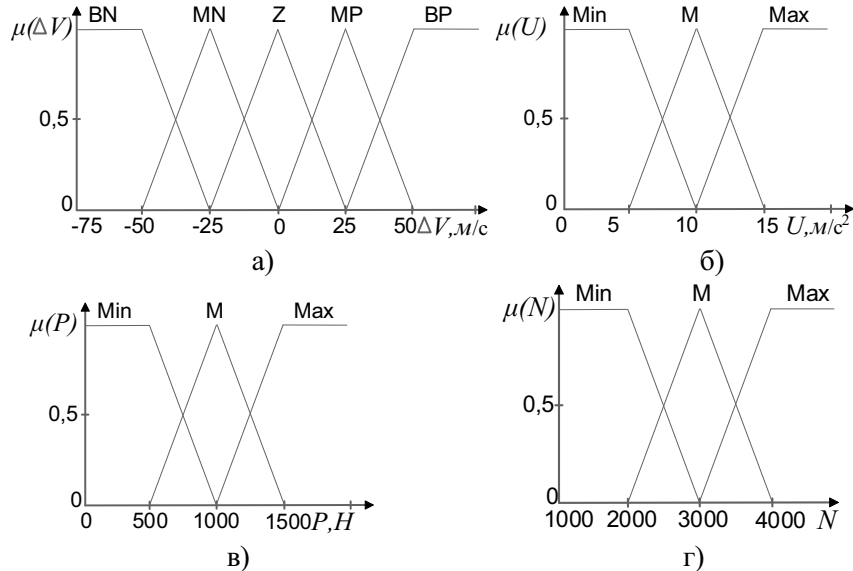


Рис. 1. Лингвистические переменные задачи: а – «Разность скоростей, ΔV »; б – «Ускорение, U »; в – «Прижим колодок, P »; г – «Обороты, N »;

Программная реализация модели интеллектуального управления

Для реализации модели использовано приложение для разработки нечетких систем flsEditor системы Scilab [12]. Определение лингвистических переменных «Разность скоростей, ΔV », «Ускорение, U », «Прижим колодок, P », «Обороты, N » (процедура фаззификации) показано на рисунке 2.

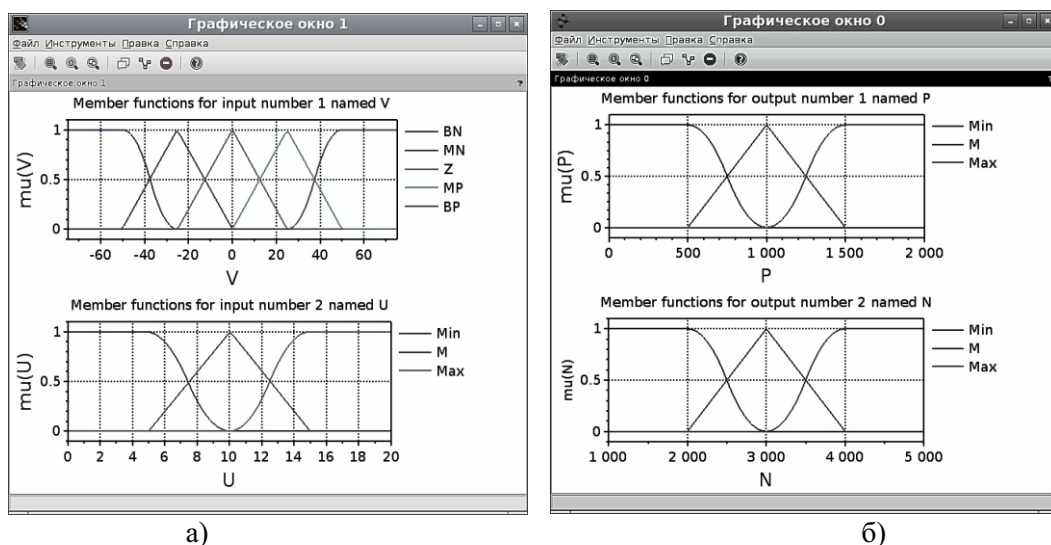


Рис. 2. Определение лингвистических переменных в приложении flsEditor системы Scilab: а – «Разность скоростей, ΔV » и «Ускорение, U »; б – «Прижим колодок, P » и «Обороты, N »

Поскольку в настоящей работе используется метод нечеткого вывода по Мамдани, т.е. интеллектуальная система, основанная на правилах, то создается база правил нечеткой продукции для вывода обеих выходных переменных (табл.1,2).

Таблица 1 – База правил нечеткой продукции для переменной «Прижим колодок, P »

Значения функции принадлежности «Разность скоростей, ΔV »	Функции принадлежности «Прижим колодок, P » при значении функции «Ускорение, U »		
	Min	M	Max
BN	Min	Min	Min
MN	Min	Min	Min
Z	Min	Min	Min
MP	Min	M	Max
BP	M	Max	Max

Таблица 2 - База правил нечеткой продукции для переменной Обороты, N »

Значения функции принадлежности «Разность скоростей, ΔV »	Функции принадлежности «Обороты, N » при значении функции «Ускорение, U »		
	Min	M	Max
BN	M	Max	Max
MN	Min	M	Max
Z	Min	Min	Min
MP	Min	Min	Min
BP	Min	Min	Min

Формирование базы правил в системе Scicab показано на рисунке 3.

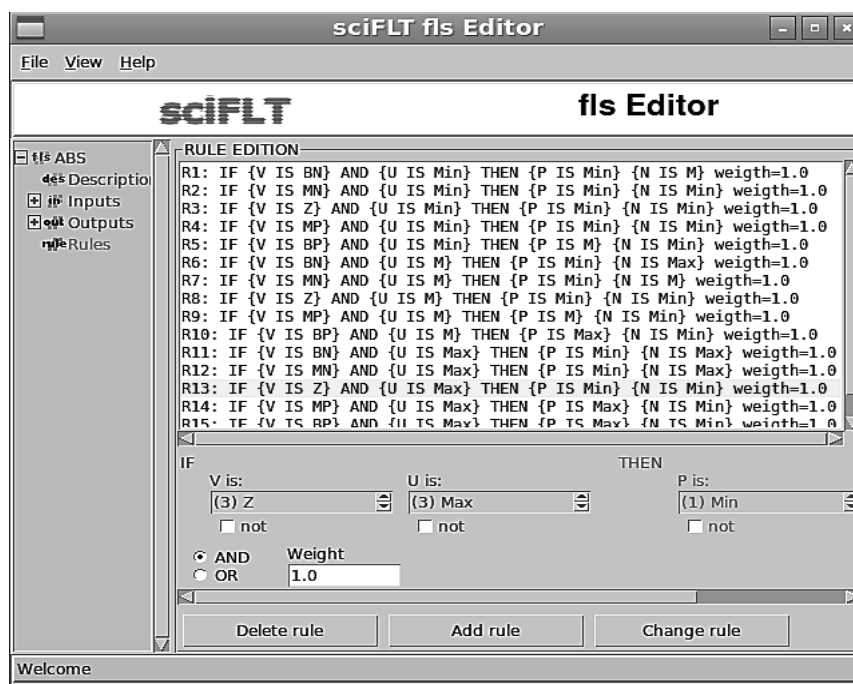


Рис. 3. Разработка базы правил в среде Scilab

После процедуры нечеткого вывод и приведения результатов к четкости (дефаззификации) результаты в виде графиков функций $N=f(U, \Delta V)$ и $P=f(U, \Delta V)$ на рисунках 4 и 5.

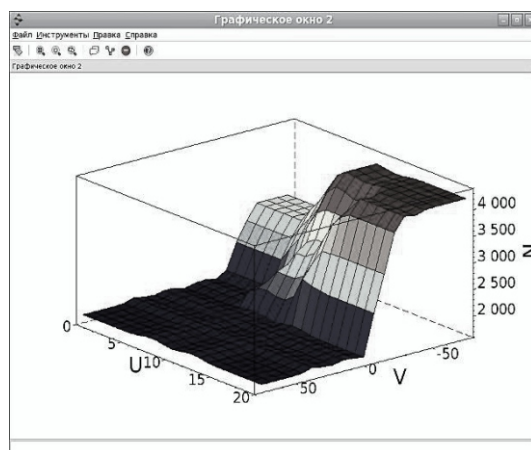


Рис. 4. График функции $N=f(U, \Delta V)$

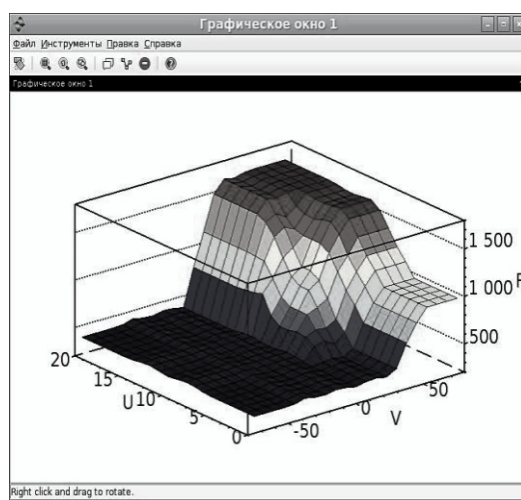


Рис. 5. График функции $P=f(U, \Delta V)$

Заключение

Проведенные исследования позволяют заключить следующее.

1. Система ABS в современном автомобиле интегрирована с другими системами управления движением и его безопасностью. Имея исключительно важное значение для ходовых качеств автомобиля, она привлекает внимание многих исследователей с целью совершенствования, но проблема в полной мере остается не решенной.
2. Предложенные алгоритм интеллектуального управления ABS и его программная реализация среде Scilab обеспечивают качественное управление процессами движения за счет плавности управляющих воздействий, поэтому могут быть рекомендованы для использования в практике проектирования автотранспортных средств для разработки контроллера соответствующей САУ.
3. Система нечеткого вывода построена для управления двумя параметрами процесса – исключения юза и пробуксовки, что может упростить традиционные системы автоматического управления тормозной системы.

Библиографический список

1. Peter R.N. [Clutches and brakes// Mechanical Design Engineering Handbook (Second Edition)]. – 2019. – pp. 599-655. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081023679000135>.
2. Taehyun Shim, Sehyun Chang, Seok Lee. [Comparison of sliding surface design on the performance of antilock braking systems]// IFAC Proceedings Volumes. – 2007. – Vol. 40. – No 10. – pp. 25-32. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015319042>.

3. Andrew Day, Chapter B. – [Brake System Layout Design]// Braking of Road Vehicles. – 2014. – pp. 149-213. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123973146000061>.
4. Hui Lü, Dejie Yu. [Optimization design of a disc brake system with hybrid uncertainties]//Advances in Engineering Software. –Vol. 98. – August 2016. – pp. 112-122. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997816300850>.
5. Ryzhikov V.A., Batyshchev D.Y. [Differential Braking Device]// Procedia Engineering. –Vol. 206.– 2017. – pp. 1570-1576. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581735364X>.
6. Hui Lü, Wen-Bin Shangguan, Dejie Yu. [A unified method and its application to brake instability analysis involving different types of epistemic uncertainties]// Applied Mathematical Modelling. –Vol. 56. –2018. – pp. 158-171. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0307904X17307436#>
7. Wei-Yen Wang, Ming-Chang Chen, Shun-Feng Su. [Hierarchical T-S fuzzy-neural control of anti-lock braking system and active suspension in a vehicle]// Automatica. –Vol. 48. – №. 8. – August 2012. – pp. 1698-1706. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109812002063?via%3Dihub>.
8. Баженов Е.Е., Побединский В.В., Берстенов А.В. Нечеткое управление силовыми потоками в трансмиссии автомобиля / Тракторы и сельхозмашины. – № 10. – 2014. – С.25-29. ID: 23775824.
9. Гороховский А.Г., Побединский В.В., Шишкина Е.Е., Побединский Е.В. Моделирование процесса сушки пиломатериалов / Лесной журнал. 2020. №1. С.154-166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166.
10. Roozbeh Keshmiri, Alireza Mohamad Shahri. [Intelligent ABS Fuzzy Controller for Diverse Road Surfaces /World Academy of Science, Engineer-ing and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering] – Vol:1, No:5, 2007. pp. 257-263. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intelligent-ABS-Fuzzy-Controller>.
11. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables/ Andrzej Piegat. –Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. – 760 с.
12. Scilab Enterprises SAS. - URL: <https://www.scilab.org/about/scilab-open-source-software>.

© **Побединский В.В.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: pobed@el.ru; **Обабков И.Н.** – канд. техн. наук, доцент, директор института радиоэлектроники и информационных технологий РгФ ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет» (ФГАОУ ВО «УрФУ») имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», e-mail: I.N.Obabkov@urfu.ru; **Иовлев Г.А.** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой сервиса транспортных и технологических машин и оборудования АПК ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «УГАУ»), e-mail: gri-iovlev@yandex.ru; **Ляхов С.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры интеллектуальных систем, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: lyahovsv@m.usfeu.ru; **Салихова М.В.** – старший преподаватель кафедры технологических и транспортных машин, ФГБОУ ВО «УГАУ», e-mail: salmar1981@mail.ru.

UDC 004.896

INTELLIGENT CONTROL OF CAR ANTI-LOCK SYSTEM

V.V. Pobedinsky, I.N. Obabkov, G.A. Iovlev, S.V. Lyakhov, M.N. Salikhova

The problem of improving the driving performance of cars, which largely depend on the braking system, is considered. Of particular importance is the anti-lock braking system, which is functionally linked to other vehicle motion control systems. In this regard, the attention of many researchers is paid to the problem of improving ABS. The analysis of works on this topic shows that despite the significant number of works, the problem, nevertheless, remains fully unsolved. In particular, intermittent braking when skidding is not optimal. At present, such practical applications of the theory of fuzzy sets as fuzzy modeling, fuzzy logic, which are the main apparatus of intelligent systems, make it possible to solve such problems of automatic control. Thus, the goal of the present research was determined, which was to develop intelligent control on the fuzzy logic ABS of the car. The research tasks included: 1) Statement of the problem in a meaningful form; 2) Introduction of fuzziness into the control problem; 3) Development of a rule base; 4) Software implementation of the fuzzy control model. The research results were the proposed model of intelligent control on fuzzy logic, implemented in the environment of the Scilab system. Practical application of the results can be recommended for use in the design and improvement of ABS automatic control systems for cars.

Key words: Car ABS, intelligent system, fuzzy logic, fuzzy modeling.

References

1. Peter R.N. Childs. 13 [Clutches and brakes]// Mechanical Design Engineering Handbook (Second Edition). – 2019. – pp. 599-655. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081023679000135>.
2. Taehyun Shim, Sehyun Chang, Seok Lee. [Comparison of sliding surface design on the performance of antilock braking systems]// IFAC Proceedings Volumes. – 2007. – Vol. 40. – No 10. – pp. 25-32. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015319042>.
3. Andrew Day. Chapter 6 - Brake System Layout Design// Braking of Road Vehicles. – 2014. – pp. 149-213. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123973146000061>.
4. Hui Lü, Dejie Yu. [Optimization design of a disc brake system with hybrid uncertainties]//Advances in Engineering Software. – Vol. 98. – August 2016. – pp. 112-122. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997816300850>.
5. Ryzhikov V.A., Batyshchev D.Y. [Differential Braking Device]// Procedia Engineering. – Vol. 206. – 2017. – pp. 1570-1576. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581735364X>. (In Russ.).
6. Hui Lü, Wen-Bin Shangguan, Dejie Yu. [A unified method and its application to brake instability analysis involving different types of epistemic uncertainties]// Applied Mathematical Modelling. –Vol. 56. –2018. – pp. 158-171. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0307904X17307436#>
7. Wei-Yen Wang, Ming-Chang Chen, Shun-Feng Su. [Hierarchical T-S fuzzy-neural control of anti-lock braking system and active suspension in a vehicle]// Automatica. – Vol. 48. – №. 8. – August 2012. – pp. 1698-1706. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109812002063?via%3Dihub>.
8. Bazhenov E.E., Pobedinsky V.V., Berstenev A.V. [Fuzzy control of power flows in the transmission of a car / Tractors and agricultural machines] – No. 10. – 2014. – 25-29. ID: 23775824. (In Russ.).
9. Gorokhovskiy A.G., Pobedinsky V.V., Shishkina E.E., Pobedinsky E.V. [Simulation of the process of drying lumber] / Lesnoy Zhurnal. – 2020 – No. 1.– pp.154-166. DOI: 10.37482 / 0536-1036-2020-1-154-166. (In Russ.).
10. Roozbeh Keshmiri, Alireza Mohamad Shahri. [Intelligent ABS Fuzzy Controller for Diverse Road Surfaces] /World Academy of Science, Engineer-ing and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering – Vol:1 – No:5 – 2007. – pp. 257-263. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intelligent-ABS-Fuzzy-Controller>.
11. Piegat A. [Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables]/ Andrzej Piegat. – Heidelberg; New York: Physic-Verl – 2001. – 760 c.
12. Scilab Enterprises SAS. – URL: <https://www.scilab.org/about/scilab-open-source-software>.

© **Pobedinsky V.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Intelligent Systems, «Ural State Forest Engineering University» (USFU), e-mail: pobed@el.ru; **Obabkov I.N.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies («UrFU named after the first President of Russia B.N. Yeltsin»), e-mail: I.N.Obabkov@urfu.ru; **Lyakhov S.V.** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Intelligent Systems, USFU, e-mail: lyahovsv@m.usfeu.ru; **Salikhova M.V.** – Senior Lecturer of the Department of Technological and Transport Machines, USAU, e-mail: salmar1981@mail.ru; **Iovlev G.A.** – PhD of Economic Sciences, Professor of the Department of Service for Transport and Technological Machines and Equipment of Agroindustrial Complex, USAU, e-mail: gri-iovlev@yandex.ru.

Физико-механические процессы в деревообработке

УДК 624.011.1

ПРОЧНОСТНОЙ РЕСУРС ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ БЕЛОМОРСКОГО СЕВЕРА ПРИ СЖАТИИ В ГЛАВНЫХ И ДИАГОНАЛЬНЫХ ОСЯХ АНИЗОТРОПИИ

Т.А. Никитина, Ю.Д. Шестаков, Б.В. Лабудин, О.А. Куницкая, Е.А. Тихонов, А.Ю. Калита

В последние годы в мировой строительной практике возникает необходимость определения инженерно-технической целесообразности реконструкции зданий исторической застройки с учетом местных условий и конструктивно-планировочных особенностей старого фонда. Это требует проведения детального анализа технического состояния конструкций этих зданий, в том числе объектов культурного наследия (ОКН), а также приведения в единый согласованный вид имеющейся для организации и выполнения этой деятельности нормативной литературы. Также при проведении ремонтно-восстановительных работ в городах России и других стран Европы ежегодно выводится из эксплуатации большое количество древесины разнообразных конструкций. Решение проблемы о возможности их дальнейшего использования представляется актуальным в современных условиях.

В статье исследован вопрос об изменении расчетных сопротивлений при сжатии древесины лиственницы европейской (Беломорского Севера) с учетом анизотропных свойств. Представлена физическая модель древесины. Для малых прямоугольных образцов «чистой» древесины, не имеющих пороков и ориентированных так, что продольная (x), тангенциальная (z) и радиальная (y) грани его совпадают с осями упругой симметрии a , t , r соответственно, используемых для испытаний, справедлива ортотропная модель. Проведен эксперимент по определению прочности новой и ретродревесины лиственницы и выполнено сравнение экспериментальных данных с нормируемыми значениями СП. Дается пояснение термина «ретродревесина». Для расчета были введены ограничения и допущения: цельная древесина рассматривается как однородный гомогенный материал, а начальные напряжения, возникающие при изменении эксплуатационных воздействий (температура, влажность и др.) учитываются на стадии конструктивного расчета. Сравнение расчетных сопротивлений показало снижение степени анизотропии ретродревесины по сравнению с новой (свежесрубленной) древесиной.

Ключевые слова: анизотропия, ретродревесина, расчетное сопротивление при сжатии, прочностной ресурс.

Введение

Проблема прочности анизотропных тел включает две задачи: 1) исследование зависимости характеристик прочности от ориентации усилия по отношению к осям структурной симметрии материала (анизотропия характеристик прочности); 2) оценка прочности анизотропных тел при сложных (двух- и трехосных) напряженных состояниях. Обе задачи прочно связаны между собой и должны рассматриваться совместно.

Уточнение упруго-прочностных характеристик ретродревесины с учетом анизотропии дает широкие возможности для оптимизации ее использования в различных конструкциях при любом направлении усилия. Имея эти данные, можно с уверенностью утверждать, что проектировать новые с использованием ретродревесины или восстанавливать старые конструктивные элементы рационально и целесообразно.

Некоторые существующие памятники деревянной архитектуры до сих пор находятся в удовлетворительном состоянии несмотря на многократно превышающие нормативные сроки их эксплуатации (50 лет). Возраст многих деревянных зданий и сооружений составляет 300-800 и более лет [1]. Несмотря на это информации об изменении физико-механических свойств элементов конструкций за время эксплуатации крайне мало. Достаточная несущая способность деревянных конструкций (ДК) в течение всего периода эксплуатации предусмотрена действующими нормативно-техническими документами, в которых учитываются специфика работы древесины как конструкционного материала,

изменение прочности в зависимости от температурно-влажностных условий эксплуатации и времени действия нагрузки и другие факторы [2]. Поэтому исследования старой конструкционной древесины и ее физико-механических свойств, эксплуатируемой в реальных условиях (ресурс конструкционного материала) являются востребованными.

При проведении ремонтно-восстановительных работ в городах России и других стран Европы ежегодно выводится из эксплуатации большое количество древесины разнообразных конструкций. Решение проблемы о возможности их дальнейшего использования представляется актуальным в современных условиях. Поэтому возникает необходимость в решении вопросов, связанных с инженерным обследованием элементов деревянных конструкций, диагностикой, получением информации о прочностном сохранившемся ресурсе элементов этих конструкций, выполнением необходимых поверочных расчетов ДК, способами усиления конструкций для обеспечения долговечности и эксплуатационной надежности, а также оценки возможности повторного использования старой древесины, отработавшей сверхнормативный срок. Нами предлагается понимать под старой древесиной те или иные конструктивные элементы ДК с сохранившимся прочностным ресурсом. Некоторыми авторами используется понятие «выдержанная древесина» [3]. Нами предлагается использование термина «ретродревесина» [4].

Проблеме прочности древесины с учетом анизотропных свойств посвящены ряд работ. Среди них работы Ашкенази Е.А. [5], Григоровича В.К. [6], Лехницкого С.Г. [7], Митинского А.Н. [8], Позднякова А.А. [9], Рабиновича А.Л. [10], Серова Е.Н. [11], Соболева Ю.С. [12], и др. Среди иностранных исследований можно отметить работы Espinosa L. [13], Grénman H. [14], A. Cavalli [15], K. Kra'nitz [16], R. Keylwerth [17], Norris Ch.B. [18], Raczkowski J. [19], Wacha A. [20] и др.

Для исследования механических свойств ретродревесины воспользуемся аппаратом теории упругости анизотропного тела из работ Ашкенази Е.К. и Лехницкого С.Г.

Цель работы определение прочностного ресурса и расчетных сопротивлений древесины лиственницы Беломорского Севера, находящейся за пределами нормативных сроков эксплуатации с учетом анизотропии.

Физическая модель ретродревесины

Исследованиями физико-механических свойств древесины стали заниматься еще в XIX веке. В первых работах Савара (1830) и Сен-Венана (1856) древесина уже рассматривалась как ортотропный материал. Исходя из рассмотрения физической модели цельной древесины как анизотропного материала с трубчато-волокнутой, слоистой структурой, необходимо для дальнейших расчетов ввести некоторые гипотезы и допущения: цельная древесина рассматривается как однородный гомогенный материал; различия упругих характеристик в ранней и поздней древесине находится в пределах статистического разброса, т.е. производим осреднение физических и механических свойств в пределах сечения; влияние локальных дефектов (сучки, косослой и др.), находящихся в пределах норм, не учитываем, а компоненты напряжений и деформаций считаем связанными линейно, т.е. материал следует обобщенному закону Гука; начальные напряжения, возникающие при изменении эксплуатационных воздействий (температура, влажность и др.) учитываются на стадии конструктивного расчета [4, 21].

Для малых прямоугольных образцов «чистой» древесины, не имеющих пороков и ориентированных так, что продольная (x), тангенциальная (z) и радиальная (y) грани его совпадают с осями упругой симметрии a , t , r соответственно, справедлива ортотропная модель (рис.1).

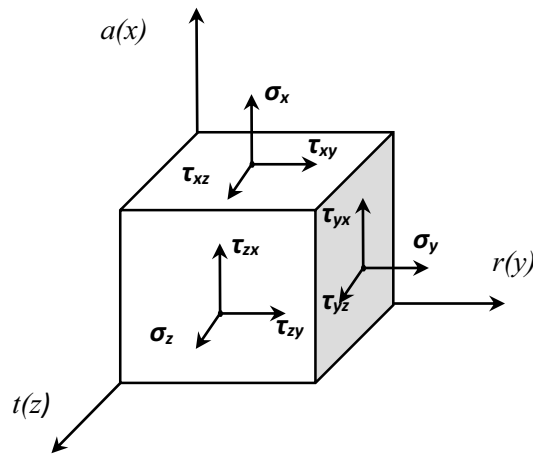


Рис. 1. Ориентация элементарного объема «чистой» древесины в декартовых осях x, y, z , совпадающих с осями упругой симметрии a, t, r и обозначение напряжений

Методика исследования

Анизотропия характеристик прочности описывается при помощи тензора четвертого ранга, имеющего такую же физическую размерность компонент, что и тензор упругих постоянных. При одноосном напряженном состоянии тензор прочности имеет вид:

$$\sigma_{iiii} = \frac{1}{\sigma_{ei}}, \quad (1)$$

где σ_{ei} – предел прочности в направлении i -й оси при одноосном растяжении или сжатии.

В главных осях анизотропии x, y, z компоненты тензора имеют следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} a_{1111} &= \frac{1}{\sigma_{ex}}; & a_{2222} &= \frac{1}{\sigma_{ey}}; & a_{3333} &= \frac{1}{\sigma_{ez}}; \\ 4a_{1212} &= \frac{1}{\tau_{exy}}; & 4a_{2323} &= \frac{1}{\tau_{eyz}}; & 4a_{3131} &= \frac{1}{\tau_{ezx}}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} 2a_{1122} &= \frac{4}{\sigma_{ex}^{45}} - \frac{1}{\sigma_{ex}} - \frac{1}{\sigma_{ey}} - \frac{1}{\tau_{exy}}; \\ 2a_{2233} &= \frac{4}{\sigma_{ey}^{45}} - \frac{1}{\sigma_{ey}} - \frac{1}{\sigma_{ez}} - \frac{1}{\tau_{eyz}}; \\ 2a_{3311} &= \frac{4}{\sigma_{ez}^{45}} - \frac{1}{\sigma_{ez}} - \frac{1}{\sigma_{ex}} - \frac{1}{\tau_{ezx}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\sigma_{ex}, \sigma_{ey}, \sigma_{ez}$ – пределы прочности при растяжении (сжатии) в направлении осей симметрии x, y и z ортотропного материала; $\sigma_{vxy}^{45}, \sigma_{vyz}^{45}, \sigma_{vzx}^{45}$ – то же в диагональных направлениях, лежащих в плоскости симметрии и составляющих углы 45° к осям симметрии; $\tau_{exy}, \tau_{eyz}, \tau_{ezx}$ – пределы прочности при чистом сдвиге по площадкам, параллельным плоскостям симметрии материала.

Экспериментальные данные по анизотропии прочности при сжатии хорошо аппроксимируются формулами преобразования компонент тензора четвертого ранга, которые вытекают из инвариантного условия прочности.

Тензоральные формулы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\sigma_{\alpha x'}} &= \frac{n_1^4}{\sigma_{\alpha x}} + \frac{l_1^4}{\sigma_{\alpha y}} + \frac{m_1^4}{\sigma_{\alpha z}} + \\
&+ \left(\frac{4}{\sigma_{\alpha xy}^{45}} - \frac{1}{\sigma_{\alpha x}} - \frac{1}{\sigma_{\alpha y}} \right) n_1^2 l_1^2 + \\
&+ \left(\frac{4}{\sigma_{\alpha yz}^{45}} - \frac{1}{\sigma_{\alpha y}} - \frac{1}{\sigma_{\alpha z}} \right) l_1^2 m_1^2 + \\
&+ \left(\frac{4}{\sigma_{\alpha zx}^{45}} - \frac{1}{\sigma_{\alpha z}} - \frac{1}{\sigma_{\alpha x}} \right) m_1^2 n_1^2;
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\tau_{\alpha x' y'}} &= \frac{(n_1 l_2 + l_1 n_2)^2}{\tau_{\alpha xy}} + \frac{(l_1 m_2 + m_1 l_2)^2}{\tau_{\alpha yz}} + \\
&+ \frac{(m_1 n_2 + n_1 m_2)^2}{\tau_{\alpha zx}} - \frac{4 n_1 l_1 n_2 l_2}{\tau_{\alpha xy}^{45}} - \\
&- \frac{4 l_1 m_1 l_2 m_2}{\tau_{\alpha yz}^{45}} - \frac{4 m_1 n_1 m_2 n_2}{\tau_{\alpha zx}^{45}},
\end{aligned} \tag{5}$$

где x, y, z – главные оси симметрии ортотропного материала; $\sigma_{\alpha x'}$ – предел прочности при одноосном растяжении или сжатии в направлении ось x' , произвольно ориентированной в материале; $\tau_{\alpha x' y'}$ – предел прочности при чистом сдвиге, при котором изменяется прямой угол между осями x' и y' . Направление произвольных осей x', y', z' по отношению к главным осям симметрии материала определяется по таблице 1.

Если поворот осей происходит вокруг оси z по схеме направляющих косинусов, приведенной в таблице 2, то формулы (4) и (5) приобретут более простой вид. Введя упрощенное обозначение $\sigma_{\alpha x} = \sigma_\alpha$, получим формулу (6) для предела прочности при одноосном растяжении или сжатии в направлении x' , лежащем в плоскости симметрии материала xy и составляющем угол α с осью x :

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_0}{\cos^4 \alpha + b \sin^2 2\alpha + c \sin^4 \alpha}, \tag{6}$$

$$\text{где } c = \frac{\sigma_0}{\sigma_{90}}; b = a - \frac{1+c}{4}; a = \frac{\sigma_0}{\sigma_{45}}.$$

Для предела прочности $\tau_{\alpha x' y'} = \tau_\alpha$ при чистом сдвиге в плоскости xy получим:

$$\tau_\alpha = \frac{\tau_0}{\cos^2 2\alpha + \frac{\tau_0}{\tau_{45}} \sin^2 2\alpha}. \tag{7}$$

Таблица 1 – Упрощенное обозначение направляющих косинусов

Оси сравнения	Главные оси		
	x	y	z
x'	n_1	l_1	m_1
y'	n_2	l_2	m_2
z'	n_3	l_3	m_3

Таблица 2 – Направляющие косинусы при повороте осей на угол α вокруг оси $z = z'$

Оси сравнения	Главные оси		
	x	y	z
x'	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$	0
y'	$-\sin\alpha$	$\cos\alpha$	0
z'	0	0	1

Для главных характеристик прочности древесины как ортотропного материала необходимо экспериментально определить девять исходных величин. Нами была использована вышепринятая методика для оценки и определения расчетного сопротивления древесины лиственницы, что не противоречит гипотезам и допущениям [21, 11]. Эти характеристики перечислены и условно пронумерованы в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики расчетных сопротивлений древесины лиственницы как ортотропного материала

Номер характеристики	Обозначение	Ориентация оси образца (направление усилия)
1	R_a	Вдоль оси a (параллельно волокнам древесины)
2	R_r	Вдоль оси r (по радиусам годовичных колец)
3	R_t	Вдоль оси t (по касательной к годовичным кольцам)
4	R_{at}^{45}	В тангенциальной плоскости at под углом 45° к волокнам
5	R_{ar}^{45}	В радиальной плоскости ar под углом 45° к волокнам
6	R_{rt}^{45}	В плоскости rt (перпендикулярной волокнам) под углом 45° к радиусам годовичных колец
7	R_{ta}	Скалывание вдоль волокон по радиальной плоскости
8	R_{ra}	Скалывание вдоль волокон по тангенциальной плоскости
9	$R_{tr} (R_{rt})$	Скалывание поперек волокон по радиальной (тангенциальной) плоскости

В таблице 4 показано, что допущение о транстропности (поперечной изотропии) позволяет уменьшить число экспериментально определяемых характеристик прочности до пяти.

Таблица 4 – Характеристики расчетных сопротивлений древесины как транстропного материала

Номер характеристики	Обозначение	Ориентация оси образца (направление усилия)
1	R_a	Вдоль волокон
2	R_s	Поперек волокон
3	R_{as}^{45}	Под углом 45° к волокнам
4	R_{sa}	Скалывание вдоль волокон
5	R_{ss}	Скалывание поперек волокон

Экспериментальная часть

Полные данные обо всех величинах расчетных сопротивлений древесины при сжатии в направлениях осей симметрии a , r и t и в диагональных по отношению к этим осям направлениях опубликованы далеко не для всех пород. Нами был проведен эксперимент по определению прочности новой и ретродревесины лиственницы европейской (Беломорского Севера) [22] и выполнено сравнение экспериментальных данных с нормируемыми значениями СП [2].

Ниже приведены сравнительные результаты расчетных сопротивлений новой и ретродревесины, полученные на основе статистической обработки результатов по методике ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко [4, 22]. В эксперименте испытывали древесину лиственницы из конструкций жилых домов со сроком эксплуатации от 60 до 100 лет и новую (свежесрубленную) древесину лиственницы (табл.5). Общее количество испытанных «чистых» образцов – 230 шт., среди них – 188 – образцы ретродревесины, 62 – образцы новой древесины лиственницы. Испытания проводились согласно ГОСТ [23, 24] (табл. 5).

Таблица 5 – Испытание образцов древесины лиственницы на сжатие

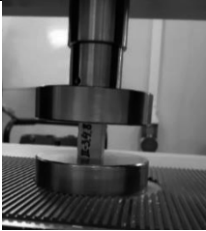
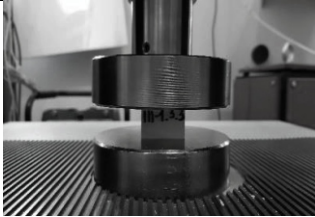
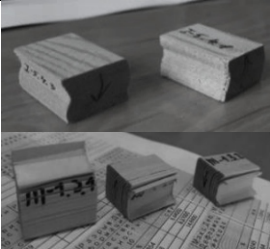
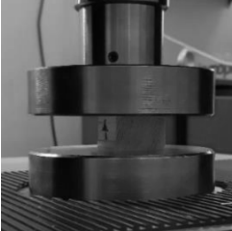
Образцы	Испытания	Характер разрушения образцов
Испытание на сжатие вдоль волокон		
		
Испытание на сжатие поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлении		
		
Испытание на сжатие под углом к волокнам 45°		
		

Таблица 6 – Расчетные сопротивления при сжатии древесины лиственницы, МПа

	Вдоль волокон R_a	Поперек волокон		Под углом 45° к волоконам R_{as}^{45}
		В радиальном направлении R_r	В тангенциальном направлении R_t	
СП [2]*	15,84	1,78	1,78	4,18
Новая древесина	16,03	1,29	2,36	1,155
Ретродревесина	20,25	1,86	3,07	2,01
Сравнение с СП (новая/ретро) %	101 / 128	72 / 104	133 / 173	28 / 48
* с учетом коэффициента длительной прочности $m_{dl} = 0,66$				

Как видно из таблицы 6, древесина, находящаяся за пределами нормативных сроков эксплуатации, имеет прочностной ресурс, зависящий, главным образом, от условий и сроков эксплуатации, а также наличия конструктивной защиты от атмосферных воздействий. Следовательно, здания с превышением нормативного срока службы (более 50 лет) [25] пригодны для эксплуатации, т.к. имеют достаточные запасы прочности за исключением сжатия под углом к волокнам 45°.

В таблице 7 приведены отношения расчетных сопротивлений при сжатии, характеризующих анизотропию новой и ретродревесины. Для ретродревесины характерно снижение степени анизотропии (от 2,97 до 12,4%).

Таблица 7 – Сравнение расчетных сопротивлений при сжатии

Вид древесины	R_a/R_r	R_a/R_t	R_t/R_r
Новая древесина, МПа	12,43	6,79	1,83
Ретродревесина, МПа	10,89	6,6	1,65
Расхождение, %	-12,4	-2,97	-9,84

Применение формул и методов расчета анизотропии позволяет в настоящее время более точно и с меньшим числом экспериментальных данных получить полную картину изменения расчетных сопротивлений в зависимости от ориентации усилий по отношению к трем осям симметрии ортотропного материала.

По исходным данным, приведенным в таблице 6 и по результатам расчетов (формула (4)) в декартовых координатах построена пространственная диаграмма анизотропии расчетных сопротивлений при сжатии древесины лиственницы R_s (рис. 2 и 3). Ориентация усилия по отношению к осям симметрии древесины a , r и t определяется углами θ и φ . Угол φ отсчитывается от направления волокон a в радиальной плоскости ar , а угол θ показывает, под каким углом наклонена к радиальной плоскости ось x образца, т.е. сжимающие усилие. Величина R_s при $\theta = 0$ и $\varphi = 0$ соответствует расчетному сопротивлению в направлении волокон σ_a , при $\theta = 0$ и $\varphi = 90^\circ - \sigma_r$, а при $\theta = 90^\circ$ и $\varphi = 0 - \sigma_t$. Результаты расчета – таблица 8 и таблица 9.

Таблица 8 – Изменение расчетных сопротивлений при сжатии образцов новой древесины лиственницы

Θ , град.	$R_{вх'}$, МПа при значениях Φ , град.						
	0	15	30	45	60	75	90
0	16,03	10,78	5,32	2,88	1,84	1,41	1,29
15	13,87	9,13	4,46	2,47	1,62	1,27	1,16
30	9,17	6,25	3,28	1,92	1,32	1,06	0,99
45	5,46	4,24	2,62	1,70	1,24	1,03	0,97
60	3,51	3,12	2,39	1,80	1,44	1,26	1,20
75	2,65	2,57	2,38	2,16	1,98	1,86	1,82
90	2,36	2,36	2,36	2,14	2,36	2,36	2,36

Таблица 9 – Изменение расчетных сопротивлений при сжатии для ретродревесины лиственницы

Θ , град.	$R_{вх'}$, МПа при значениях Φ , град.						
	0	15	30	45	60	75	90
0	20,25	13,62	6,72	3,63	2,32	1,78	1,63
15	17,53	11,53	5,63	3,12	2,05	1,60	1,47
30	11,58	7,90	4,15	2,42	1,67	1,34	1,25
45	6,90	5,36	3,31	2,14	1,57	1,30	1,22
60	4,43	3,94	3,01	2,28	1,83	1,59	1,52
75	3,34	3,25	3,01	2,73	2,50	2,35	2,30
90	3,07	3,07	3,07	2,78	3,07	3,07	3,07

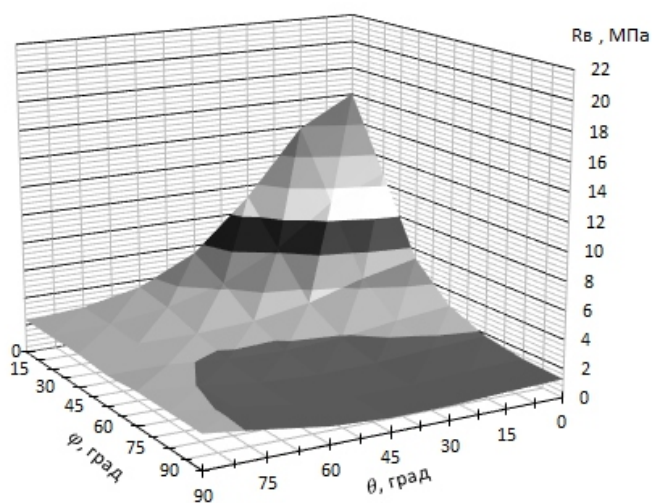


Рис.2. Диаграмма анизотропии расчетных сопротивлений при сжатии образцов новой древесины лиственницы

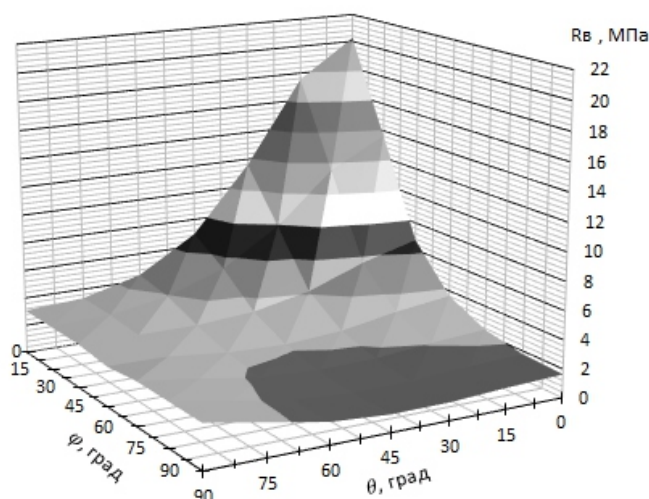


Рис.3. Диаграмма анизотропии расчетных сопротивлений при сжатии образцов ретродревеси́ны лиственницы

На основании этих диаграмм можно судить о степени анизотропии прочности и ее изменении при сжатии древесины лиственницы при различных направлениях действия усилия по отношению к волокнам или главным осям анизотропии.

Выводы и рекомендации

1. Построена приближенная математическая модель ретродревеси́ны как анизотропного тела, адекватно отражающая механические свойства древесины лиственницы, эксплуатируемой за пределами нормативных сроков (более 50 лет).
2. Получены расчетные сопротивления при сжатии для ретродревеси́ны лиственницы и новой древесины лиственницы на основании испытания малых «чистых» образцов.
3. Прочностной ресурс ретродревеси́ны имеет более высокие показатели при сжатии вдоль и поперек волокон. Значение под углом 45° имеют более низкие показатели (табл. 6)
4. Сравнение расчетных сопротивлений показало, что степень анизотропии ретродревеси́ны снижается по сравнению с новой (свежесрубленной) древеси́ной на 2,97-12,4% (табл. 7).
5. Результаты исследований могут быть использованы при расчете строительных элементов и конструкций из древесины лиственницы, эксплуатируемой за пределами нормативных сроков, в том числе для объектов культурного наследия.

Литература

1. Олег Матвейчев Двадцать пять старинных деревянных зданий мира [Электронный ресурс] // livejournal.com – Режим доступа: <https://matveychev-oleg.livejournal.com/1837268.html>. – (дата обращения: 21.05.2020)
2. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции [Текст]: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 27.02.17: Взамен СНиП II-25-80: дата введ. 01.01.82 г. – Москва, 2017. – 88 с.
3. Федюков В.И., Чернова М.С., Чернов В.Ю. Колориметрические особенности выдержанной в старых сооружениях древесины. // Строение, Свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древеси́новедения. 2018. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2018. – С.208-211.
4. Тюрикова Т.В., Пономарева Н.Г., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Сазанова Е.В. Прочностные характеристики «ретродревеси́ны» из конструкций Сретенской деревянной церкви из села Заостровье Архангельской области. // Строительная наука – XXI: Теория, образование, практика, инновации Северо-арктическому региону: Сборник трудов VIII международной научно-технической конференции. 2017. – Архангельск, Свое издательство, 2017 – С.303-313.

5. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов – М.: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
6. Григорович В.К. О наивыгоднейшем направлении волокон в изделиях из анизотропных материалов. – ДАН СССР. Т86, №4, 1952, С.152-160.
7. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела – М.: Наука, 1977. – 416с.
8. Митинский А.Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала. – Труды ЛТА, №63. Л., 1948, С. 23-54.
9. Поздняков А.А. К вопросу об усталостной прочности анизотропных материалов. – Труды ЛТА, №96, Л., 1961, С.83-91.
10. Рабинович А.Л. Об упругих постоянных и прочности анизотропных материалов. – М., 1946. – 56с.
11. Серов Е.Н. Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клееных деревянных конструкциях массового изготовления: дис. ... д-ра техн. наук; ЛИСИ. – Л., 1989. – 521с.
12. Соколов Ю.С. Древесина как конструкционный материал – М.: Лесная пром-сть, 1979. – 246с.
13. Espinosa L., Prieto F., Brancheriau L., Cortes Y., Lasaygues P. Ultrasound computed tomography on standing trees: Accounting for Wood anisotropy permits a more accurate detection of defects // *Annals of Forest Science*. 2020. т. 77. № 3. с. 68.
14. Grénman H., Wärnå J., Mikkola J.-P., Sifontes V., Fardim P., Murzin D.V., Salmi T. Modeling the influence of wood anisotropy and internal diffusion on delignification kinetics // *Industrial and Engineering Chemistry research*. 2010. т. 49. № 20. с. 9703-9711.
15. Alberto Cavalli, Daniele Cibecchini, Marco Togni, Hélder S. Sousa // *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 681-687.
16. Katalin Kra'nitz, Walter Sonderegger, Claus-Thomas Bues, Peter Niemz Effects of aging on wood: a literature review // *Wood Sci Technol* (2016) 50:7–22
17. Keylwerth R. Die anisotrope Elastizität des Holzes u. der Lagenhölzer. VDI-Forschungsheft No.430. Hamburg. 1951- 40s.
18. Norris Ch.B. Gtrength of ortotropic Materials, subjected to combined Stresses. *Forest Prod.Lab.U.S.A.*, 1962, N1816
19. Raczkowski J. Varga Z., Bóta A., Vainio U., Hoell A. Anisotropia cisnienia pecznienia drewna. *Folia Forestalia Polonica s.2. B.1960*, s.115-134.
20. Wacha A. Small-angle x-ray scattering experiments and computer simulations to characterise anisotropy of activated carbons prepared from wood // *Carbon*. 2011. т. 49. № 12. с. 3958-3971.
21. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой. – Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2007. – 267с.
22. Сопилов В., Никитина Т.А., Лабудин Б.В. Прочностной ресурс элементов конструкций деревянных зданий за пределами нормативных сроков эксплуатации // *Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы IV Всероссийской студенческой конференции (Йошкар-Ола, 20-23 ноября 2018 г.): в 8 ч. Часть 5: Инновации в строительстве, природообустройстве и техносферной безопасности.* – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2018. – 206 с. – С. 100-107.
23. ГОСТ 16483.10-73 ГОСТ 16483.10-73 Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон [Электронный ресурс]. – Введ. 1974–07–01. – Электрон. дан. // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200014949>, свободный. – Загл. с экрана.
24. ГОСТ 16483.11-72 Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон [Электронный ресурс]. – Введ. 1973–01–01. – Электрон. дан. // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200014950>, свободный. – Загл. с экрана.
25. ВСН 58-88(р) / Госкомархитектуры Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения – Введ. 1989–07–01. – Электрон. дан. // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001224>, свободный. – Загл. с экрана.

Шестаков Ю.Д. – студент кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ», e-mail: y.shestakov99@gmail.com; **Лабудин Б.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ», e-mail: sevned@mail.ru; **Куницкая О.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ», e-mail: olaola07@mail.ru; **Тихонов Е.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ПГУ»), e-mail: tihonov@psu.karelia.ru; **Калита А.Ю.** – старший преподаватель кафедры технологий лесопользования и ландшафтного строительства ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ТГУ»), e-mail: Alexgrushina@mail.ru.

UDC 624.011.1

STRENGTH RESOURCE OF LARCH WOOD OF THE WHITE SEA NORTH UNDER COMPRESSION IN THE MAIN AND DIAGONAL AXES OF ANISOTROPY

T.A. Nikitina, Yu.D. Shestakov, B.V. Labudin, O.A. Kunitskaya, E.A. Tikhonov, A.Yu. Kalita

In recent years, in the world construction practice, there has been a need to determine the engineering and technical feasibility of the reconstruction of buildings of historical development, taking into account local conditions and the design and planning features of the old fund. This requires a detailed analysis of the technical state of the structures of these buildings, including cultural heritage sites, as well as bringing the regulatory literature available for organizing and performing this activity into a single agreed form. Also, when carrying out repair and restoration work in cities of Russia and other European countries, a large amount of wood of various structures is annually taken out of service. The solution to the problem of the possibility of their further use seems relevant in modern conditions.

The article investigates the issue of changing the design resistance during compression of European larch wood (the White Sea North), taking into account anisotropic properties. A physical model of wood is presented. For small rectangular samples of "pure" wood, which do not have defects and are oriented so that the longitudinal (x), tangential (z) and radial (y) faces coincide with the axes of elastic symmetry a, t, r, respectively, used for testing, the orthotropic model is valid. An experiment was carried out to determine the strength of new and retrowood larch and a comparison of the experimental data with the normalized values of SP was performed. An explanation of the term "retro wood" is given. For the calculation, restrictions and assumptions were introduced: solid wood is considered as a homogeneous homogeneous material, and the initial stresses arising from changes in operational influences (temperature, humidity, etc.) are taken into account at the stage of design calculation. Comparison of the calculated resistances showed a decrease in the degree of anisotropy of retrowood compared to new (freshly cut) wood.

Key words: retrowood, anisotropy, design compression resistance, strength resource.

References

1. Oleg Matveychev [Twenty-five ancient wooden buildings in the world] Electronic resource livejournal.com: <https://matveychev-oleg.livejournal.com/1837268.html>. – (date of request: 21.05.2020) (InRuss.).
2. СП 64.13330.2017 Wooden structures: approved. By Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation 27.02.17: Instead of snip II-25-80: 01.01.82 г. – Москва, 2017. – 88 p. (InRuss.).
3. Fedukov V.I., Chernova M.S., Chernov V.YU. [Colorimetric features of wood aged in old buildings] Stroenie, Svoystva i kachestvo drevesiny – 2018: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni B.N. Ugoleva, posvyashchennogo 50-letiyu Regional'nogo Koordinatsionnogo soveta po sovremennym problemam drevesinovedeniya. 2018. – Novosibirsk: Izd-vo Sibirskogo otdeleniya RAN [Structure, Properties and quality of wood-2018: proceedings of the VI International Symposium named after B. N. Ugolev, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordination Council on Modern Problems of Wood Science. 2018. - Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences] 2018. pp. 208-211. (InRuss.).

4. Tyurikova T.V., Ponomareva N.G., Melekhov V.I., Labudin B.V., Sazanova E.V. [Strength characteristics of "retro-wood" from the structures of the Sretenskaya wooden Church from the village of Zaostrovye, Arkhangelsk region] // *Stroitel'naya nauka – XXI: Teoriya, obrazovanie, praktika, innovacii Severo-arkticheskomu regionu: Sbornik trudov VIII mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. 2017. – Arhangel'sk, Svoe izdatel'stvo [Construction Science-XXI: Theory, Education, Practice, Innovation in the North-Arctic Region: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference. 2017. - Arkhangelsk, Its publishing house], 2017 – pp.303-313. (InRuss.).
5. Ashkenazi E. K. [Anisotropy of wood and wood materials] – M.: Lesnaya promyshlennost' [Moscow: Forest Industry], 1978. – 224 p. (InRuss.).
6. Grigorovich V.K. [On the most advantageous direction of fibers in products made of anisotropic materials]. – DAN SSSR. T86, №4, 1952, pp.152-160. (InRuss.).
7. Lekhnitskij S.G. [Theory of elasticity of an anisotropic body] M.: Nauka [Moscow: nauka], 1977. -416 p. (InRuss.).
8. Mitinskij A.N. [Elastic constants of wood as an orthotropic material] Trudy LTA [Proceedings of the FTA], №63. L., 1948, pp. 23-54. (InRuss.).
9. Pozdnyakov A.A. [On the question of fatigue strength of anisotropic materials] –] Trudy LTA [Proceedings of the FTA], №96, L., 1961, pp.83-91. (InRuss.).
10. Rabinovich A.L. [On elastic constants and strength of anisotropic materials]. – M., 1946. – 56 p. (InRuss.).
11. Serov E.N. [Rational use of anisotropy of strength of materials in glued wooden structures of mass production: dis. ... doctor of Technical Sciences]; LSI. – L., 1989. – 521 p. (InRuss.).
12. Sobolev YU.S. [Wood as a construction material] M.: Lesnaya promyshlennost' [Moscow: Forest Industry], 1979. – 246 p. (InRuss.).
13. Espinosa L. Prieto F., Brancheriau L., Cortes Y., Lasaygues P. Ultrasound computed tomography on standing trees: Accounting for Wood anisotropy permits a more accurate detection of defects // *Annals of Forest Science*. 2020. T. 77. № 3. c. 68.
14. Grénman H., Wärnå J., Mikkola J.-P., Sifontes V., Fardim P., Mu rzin D.V., Salmi T. Modeling the influence of wood anisotropy and internal diffusion on delignification kinetics // *Industrial and Engineering Chemistry research*. 2010. T. 49. № 20. c. 9703-9711.
15. Alberto Cavalli, Daniele Cibecchini, Marco Togni, Hélder S. Sousa // *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 681-687.
16. Katalin Kra'nitz. Walter Sonderegger, Claus-Thomas Bues, Peter Niemz Effects of aging on wood: a literature review // *Wood Sci Technol* (2016) 50:7–22
17. Keylwerth R. Die anisotrope Elastizität des Holzes u. der Lagenhölzer. VDI-Forschungsheft No.430. Hamburg. 1951- 40s.
18. Norris Ch.B. Gtrength of ortotropic Materials, subjected to combined Stresses. Forest Prod.Lab.U.S.A., 1962, N1816
19. Raczkowski J. Varga Z., Bóta A., Vainio U., Hoell A. Anisotropia cisnienia pecznienia drewna. *Folia Forestalia Polonica* s.2. B.1960, s.115-134.
20. Wacha A. Small-angle x-ray scattering experiments and computer simulations to characterise anisotropy of activated carbons prepared from wood // *Carbon*. 2011. T. 49. № 12. pp. 3958-3971.
21. Labudin B.V. [Improvement of glued wooden structures with a spatially regular structure] – Arhangel'sk: Arhang. gos. tekhn. un-t [Arkhangelsk: Archang. state Technical University. Un-t], 2007. – 267c. (InRuss.).
22. Sopilov V., Nikitina T.A., Labudin B.V. [Strength resource of structural elements of wooden buildings beyond the standard service life] // *Inzhenernye kadry – budushchee innovacionnoj ekonomiki Rossii: materialy IV Vserossijskoj studencheskoj konferencii* (Yoshkar-Ola, 20-23 noyabrya 2018 g.): v 8 ch. CHast' 5: Innovacii v stroitel'stve, prirodoobustrojstve i tekhnosfernoj bezopasnosti. – Yoshkar-Ola: Povolzhskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet [Engineering personnel – the future of Russia's innovative Economy: Proceedings of the IV All-Russian Student Conference (Yoshkar-Ola, November 20-23, 2018): at 8 p.m. Part 5: Innovations in Construction, Environmental management and Technosphere Safety. - Yoshkar-Ola: Volga State Technological University], 2018. – 206 c. – pp. 100-107. (InRuss.).

23. GOST 16483.10-73 GOST 16483.10-73 Wood. Methods for determining the compressive strength along fibers [Электронный ресурс]. – Введ. 1974–07–01. – Электрон. дан. // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200014949>, свободный. – Загл. с экрана. (InRuss.).

24. ГОСТ 16483.11-72 Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон [Electronic resource]. – Введ. 1973–01–01. – Электрон. дан. // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200014950>, свободный. – Загл. с экрана. (InRuss.).

25. VSN 58-88 (r) / Goskomarkhitektury Regulations on the organization and carrying out reconstruction, repair and maintenance of buildings, objects of municipal and socio-cultural purpose – Vved. 1989–07–01. – Elektron. dan. // Tekhekspert: elektronnyj fond pravovoj i normativno-tehnicheskoy dokumentacii. – Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/871001224>, свободный. – Загл. с экрана. (InRuss.).

© **Никитина Т.А.** – старший преподаватель кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет» (ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ»), e-mail: t.a.nikitina@inbox.ru; **Шестаков Ю.Д.** – студент кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ», e-mail: y.shestakov99@gmail.com; **Лабудин Б.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ», e-mail: sevned@mail.ru; **Куницкая О.А.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса, ФГАОУ ВПО «С(А)ФУ», e-mail: olaola07@mail.ru; **Тихонов Е.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ПГУ»), e-mail: tihonov@psu.karelia.ru; **Калита А.Ю.** – старший преподаватель кафедры технологий лесопользования и ландшафтного строительства ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ТГУ»), e-mail: Alexgrushina@mail.ru.

УДК 678.031:54-112

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНО - ЭТАНОЛЬНОГО РАСТВОРА НА ВЫХОД БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ

А.В. Сафина, Д.Ф. Зиатдинова, Р.Г. Сафин, К.В. Валеев, Г.Р. Арсланова

Исследован способ извлечения биологически активных веществ из древесины лиственницы методом водно-спиртовой экстракции, позволяющий совместить стадии извлечения водорастворимого арабиногалактана и спирторастворимого дигидрокверцетина. Проведены экспериментальные исследования по изучению влияния концентрации этанола на выход указанных компонентов, а так же побочных продуктов, таких как лиственничная смола и эфирное масло. В результате обработки экспериментальных данных получены графические и математические зависимости выхода флавоноидов от изменения концентрации этанола в растворе. Установлено, что максимальный выход водорастворимого компонента арабиногалактана получен при нулевой концентрации этанола. Выход дигидрокверцетина с ростом концентрации этанола в растворителе увеличивается. Максимальный выход лиственничной смолы и эфирного масла наблюдается при концентрации этанола 25-30 %. Поскольку в данном исследовании указанные компоненты рассматривались как побочные продукты, то для определения оптимального значения концентрации спирта ориентировались на выход основных флавоноидов - арабиногалактана и дигидрокверцетина.

Ключевые слова: лиственница, биологически активные вещества, флавоноиды, этанол, экстракция.

Введение

Древесина лиственницы, произрастающая на территории Российской Федерации, вызывает большой интерес у косметических и фармацевтических компаний из-за своего огромного запаса биологически активных веществ (БАВ). Наиболее важной группой БАВ являются флавоноиды, содержание которых доходит до 2,5 % от общей массы древесины. Флавоноиды лиственницы представлены в основном в виде

дигидрокверцетина (ДКВ), кверцетина и дигидрокемфорол. Содержание ДКВ в флавоноидах может достигать до 91 %. Так же, помимо них, в древесине лиственницы содержатся арабиногалактан (АГ) и побочные продукты в виде эфирного масла (ЭМ) и лиственничной смолы (ЛС), количество которых может достигать 33,3 % от общей массы флавоноидов [1, 2, 3].

БАВ из древесины лиственницы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в основном косметической и фармацевтической. Они являются мощным антиоксидантами, обладают капилляропротекторными, противовоспалительными и антигистаминными свойствами [4, 5, 6].

Спрос на вышеперечисленные вещества, несомненно, растет, что обуславливает необходимость разработки новых и оптимизацию существующих способов и технологий извлечения биологически активных веществ из древесины лиственницы [7, 8]. Большинство известных способов основаны на экстракции различными растворителями. В зависимости от используемого растворителя способы можно разделить на три группы [9, 10, 11]:

1) с использованием спирто-бензольной смеси. С помощью спирто-бензольной смеси из древесины лиственницы можно извлечь 15 % водорастворимых веществ, которые включают в себя 95 % арабиногалактана, а также остальные фенольные соединения, такие как дигидрокверцетин и дигидрокемпферол (ДКМ).

2) с использованием органических растворителей. При данном способе используются экстрагенты, которые можно разделить на две основные группы: а) неполярные растворители: используются в основном н-гексан или экстракционные бензины. Такие вещества, как смоляные и жирные кислоты, терпены экстрагируются гексаном; б) полярные растворители: спирты, простые сложные эфиры, кетоны и хлорорганические соединения. Чаще всего на практике используется метанол. Такие растворители, как диэтиловый эфир, этилацетат, ацетон и хлороформ позволяют экстрагировать из древесины лиственницы практически все имеющиеся экстрактивные вещества, кроме полисахаров.

3) с использованием смеси растворителей с водой, такие как метанол: вода, ацетон – вода, этанол – вода [12].

Недостатком первых двух способов является использование токсичных растворителей, что приводит к дальнейшим проблемам очистки готовых продуктов и повышает их стоимость.

В работах [13, 14] показано, что наиболее эффективным способом процесса извлечения БАВ из древесины лиственницы является водно-спиртовая экстракция (3 группа), которая позволяет одновременно извлекать максимальное количество водо- и спирторастворимых веществ с использованием водного раствора этанола. На кафедре переработки древесных материалов в ФГБОУ ВО КНИТУ исследован способ водно-спиртовой экстракции, позволяющий извлечь водорастворимый арабиногалактан и спирторастворимый дигидрокверцетин. В данной работе были поставлены следующие задачи:

- провести экспериментальные исследования по извлечению водорастворимых и спирторастворимых компонентов древесины лиственницы методом водно-спиртовой экстракции;
- исследовать влияние концентрации этанола в растворе на выход основных компонентов арабиногалактана и дигидрокверцетина, а так же и побочных продуктов (лиственничной смолы, эфирного масла);
- рекомендовать режимы извлечения сепарированных компонентов древесины лиственницы водно-спиртовым экстрагентом.

Метод и материалы

Процесс извлечения биологически активных веществ из древесины лиственницы заключался в экстракции древесины в аппарате Сокслета 0-30 %-ым водным раствором этанола. В качестве исходного сырья использовали ствольную часть древесины лиственницы, предварительно измельченную до размеров частиц от 0,5-1,5 мм в роторно-ножевом измельчителе.

Экстракцию проводили следующим образом (см. рис.1): экстрактор Сокслета устанавливали на круглодонную колбу 1 и присоединяли к его верхней части обратный холодильник 2. Собранный аппарат помещали в термостат 3. В колбу заливали водный раствор этанола разной концентрации: 0, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 %. В резервуар 4, находящийся в центральной цилиндрической части экстрактора вставлялась «гильза» с экстрагируемым веществом – измельченной древесиной лиственницы, помещенной в фильтровальный мешок, выполненный из пористого материала. При помощи вакуумного насоса 5 из

аппарата отгоняли воздух и начинали нагрев колбы до тех пор, пока раствор не начинал испаряться. Пары, проходя через стеклянную трубку в обход «гильзы», попадали в холодильник 2, где конденсировались и стекали через рафинируемое вещество в резервуар 4. Резервуар наполнялся каплями экстрагента до тех пор, пока «гильза» не переполнялась и уровень жидкости не достигал нижнего края трубки сифона. После этого растворитель с некоторым содержанием извлеченного вещества сливался обратно в колбу 1, где снова испарялся. Таким образом, в аппарате Сокслета проводилась непрерывная экстракция с использованием небольшого объема экстрагента. Процесс экстрагирования проводился до тех пор, пока жидкость в резервуаре 4 не становилась прозрачной.

Количество биологически активных веществ в растворе определяли путем отбора части экстракта в жидкостной хроматограф 6. После завершения процесса извлечения экстракт переливали в колбу 7 для выделения АГ, туда же добавляли 95% этиловый спирт в соотношении 1:8 и оставляли отстаиваться на 60 минут, для того, что бы арабиногалактан выпал в осадок. После этого производили отгонку жидкости под вакуумом, а оставшийся осадок высушивали при температуре 105 °С в колбе 7. После полного удаления растворителя образовывался АГ в виде порошка белого цвета. Конденсат из емкости 12 сливали в колбу 9, нагревали с помощью колбонагревателя 10 и упаривали до сиропообразного состояния (≈ 80 °С). Образующиеся в колбе 9 пары спирта конденсируются с помощью холодильника 11 и поступают в колбу 12. Образовавшийся дистиллят может быть использован при приготовлении экстрагента для процесса экстракции. Оставшийся в колбе 9 экстракционный раствор переливали в разделительную воронку 13, добавляя n-гексан и диэтиловый эфир в соотношении 1:1:2 и оставляли на 2 часа.

После отстаивания смесь разделялась на три фазы. Две верхние фазы представляли собой эфирное масло и лиственничную смолу. В нижней части разделительной воронки находился раствор дигидрокверцетина. С помощью вентиля 14 каждая фаза сливалась в отдельные емкости 15, 16, 17 и выпаривались в колбонагревателях 18, 19, 20. В колбах 19 и 20 образовались лиственничная смола и эфирное масло, которые представляли собой продукт в чистом виде. Выпаренный ДКВ представлял собой порошок кофейно-молочного цвета. Для полной очистки ДКВ от примесей проводили рекристаллизацию с помощью этилового спирта.

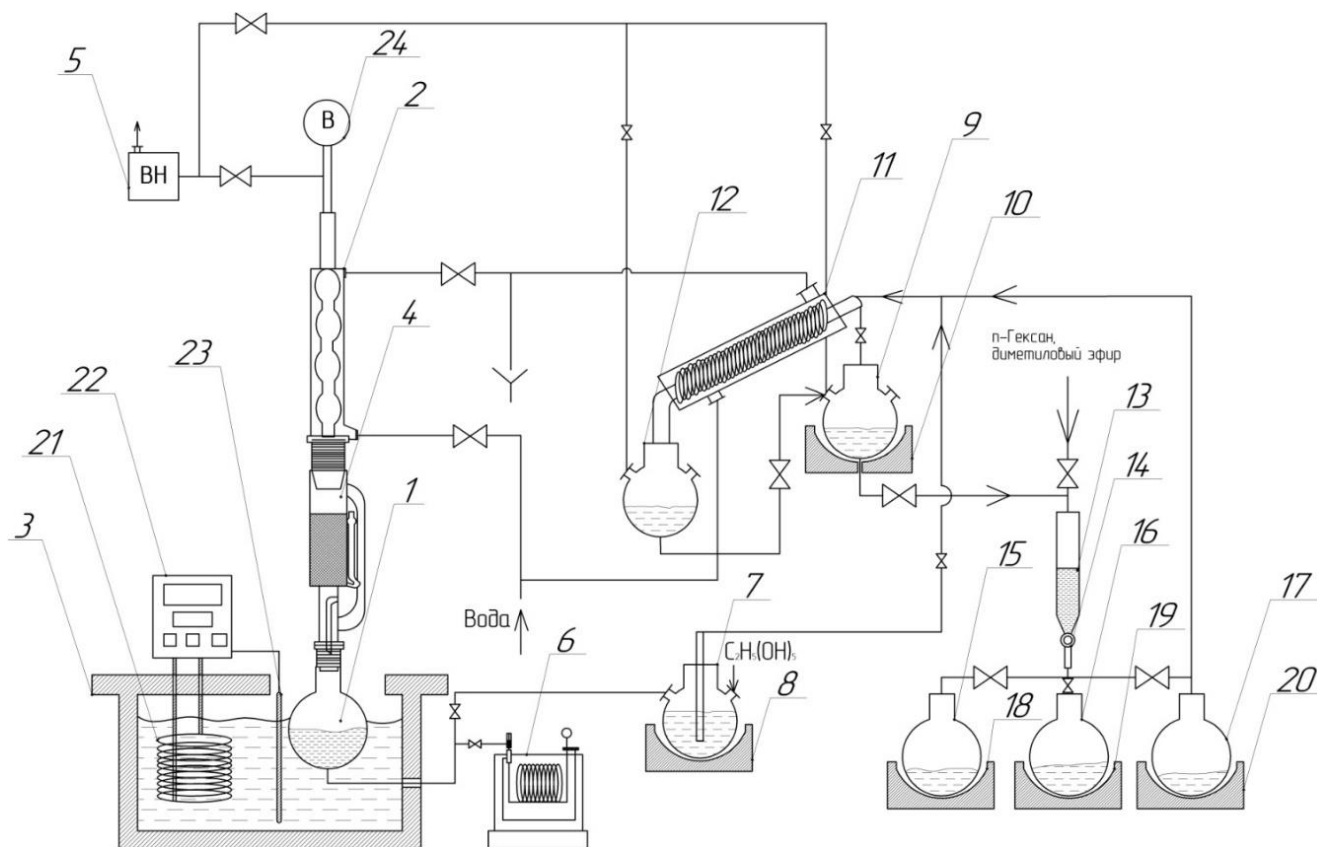


Рис. 1 Технологическая схема установки по переработке древесины лиственницы

Результаты испытаний

В результате проведенных исследований процесса водно-спиртовой экстракции древесины лиственницы были получены экспериментальные данные, обработка которых позволила построить графики и получить математические зависимости выхода БАВ (арабиногалактана, лиственничной смолы, эфирного масла и дигидрокверцетина) от концентрации этанола в растворе.

На рисунке 2 представлена зависимость выхода арабиногалактана от концентрации спирта в растворителе. На графике точками представлены значения, полученные экспериментальным путем, линией - значения, рассчитанные по уравнению, полученному в результате обработки экспериментальных данных:

$$m = 0,7457 - 0,0029c - 0,0011c^2 \quad (1)$$

Максимальная погрешность отклонения расчетных данных от экспериментальных не превышает 4,5 %.

Анализ графика показывает, что при нулевой концентрации этанола в растворе наблюдается максимальный выход арабиногалактана. Это связано с тем, что АГ является водорастворимым компонентом в древесине лиственницы. С увеличением концентрации этанола в растворе наблюдается снижение его выхода.

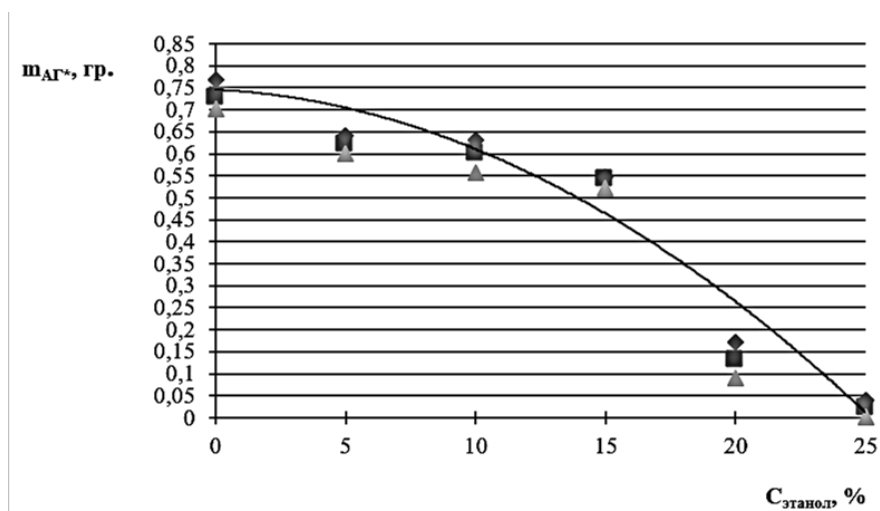


Рис. 2. Зависимость выхода арабиногалактана от концентрации этанола в растворителе

На рисунке 3 показано влияние концентрации этанола в растворе на выход лиственничной смолы (а) и эфирного масла (б).

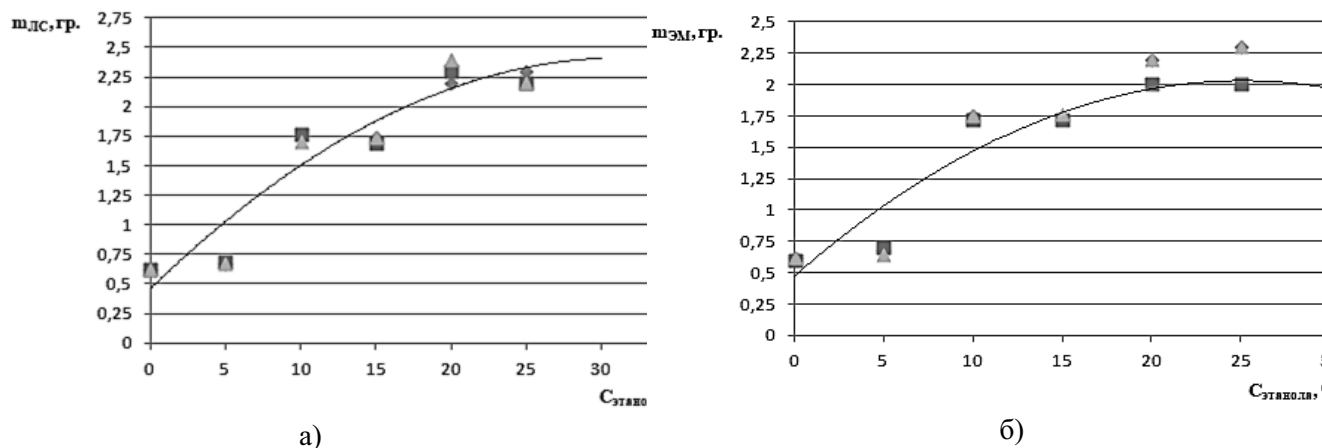


Рис. 3. Зависимость выхода лиственничной смолы (а) и эфирного масла (б) от концентрации этанола в растворителе

Математическая зависимость выхода лиственничной смолы и эфирного масла от концентрации этанола в растворе выражается уравнениями функции 2 и 3, соответственно:

$$m = 0,4571 + 0,1242c - 0,002c^2 \quad (2)$$

$$m = 0,4721 + 0,1241c - 0,0025c^2 \quad (3)$$

Как видно из представленных на рисунке 3 данных, кривые изменения выхода лиственничной смолы и эфирного масла кривых имеют идентичный характер. При этом существенный выход указанных компонентов древесины наблюдается при концентрации этанола в интервале от 20 до 30 %. Дальнейшее повышение концентрации этанола в экстрагенте практически не влияет на выход ЛС И ЭМ.

Влияние концентрации этанола в растворе на выход дигидрокверцетина отражено на рисунке 4, а математическая зависимость представлена уравнением:

$$m = 0,0089 + 0,01c - 0,0002c^2 \quad (4)$$

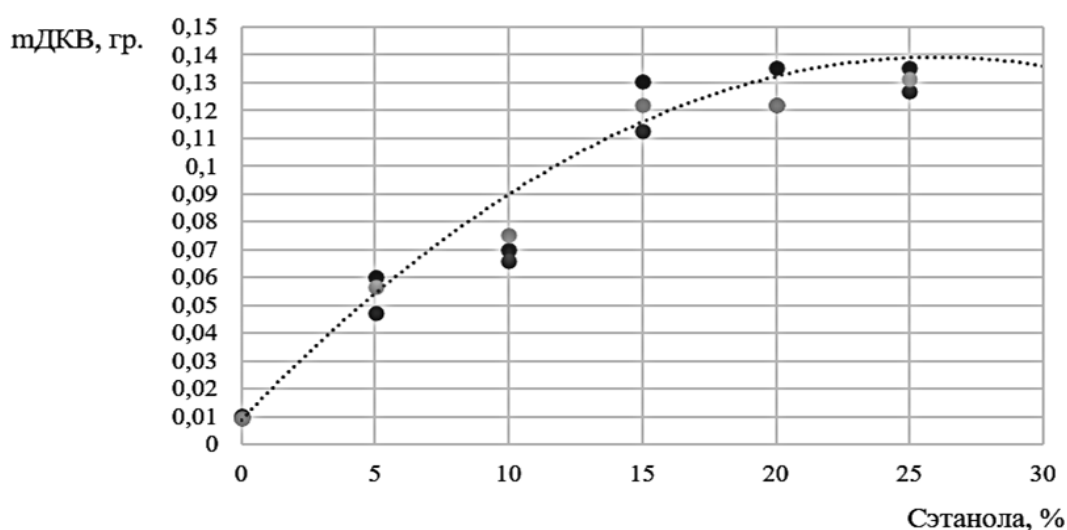


Рис. 4. Зависимость выхода дигидрокверцетина от концентрации этанола в растворителе

Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что с ростом концентрации этанола в растворителе выход ДКВ значительно увеличивается. Максимальный выход дигидрокверцетина наблюдается при концентрации этанола более 20 %. После указанного значения увеличение выхода ДКВ незначительное.

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования по одновременному извлечению арабиногалактана, дигидрокверцетина и побочных компонентов (лиственничной смолы и эфирного масла) водным раствором этанола различной концентрации. При этом основной целью работы являлось выработка рекомендаций по извлечению сепарированных биологически активных веществ из древесины лиственницы.

Установлено, что максимальный выход водорастворимого компонента арабиногалактана получен при нулевой концентрации этанола. С увеличением концентрации спирта в растворе наблюдается резкое снижение выхода арабиногалактана. Экспериментальные исследования показали, что с увеличением концентрации этанола выход дигидрокверцетина увеличивается. При этом резкое возрастание выхода наблюдается при 20-ти процентной концентрации этанола в растворе, а дальнейшее повышение концентрации спирта приводит к незначительному увеличению выхода ДКВ. Анализ изменения выхода лиственничной смолы и эфирного масла показал, что существенный выход указанных компонентов древесины наблюдается так же при концентрации этанола в интервале от 20 до 30 %. Поскольку в данном исследовании ЭМ и ЛС рассматривались как побочные продукты, то для определения оптимального

значения концентрации спирта ориентировались на выход основных компонентов - арабиногалактана и дигидрокверцетина.

Установлено, что для извлечения спирторастворимого дигидрокверцетина, лиственничной смолы и эфирного масла и их эффективного выхода целесообразно проводить процесс водно-спиртовой экстракции древесины лиственницы при концентрации этанола 20 %.

Полученные математические зависимости выхода сепарированных компонентов от концентрации этанола в растворе могут быть использованы при дальнейшем моделировании процесса водно-спиртовой экстракции древесины лиственницы.

Для сепарированного извлечения ценных биологически активных компонентов лиственницы целесообразно ступенчатое извлечение компонентов: на 1 ступени можно извлекать дигидрокверцетин, лиственничную смолу и эфирное масло, растворимые в органических растворителях, а затем на 2 ступени провести водную экстракцию арабиногалактана. При этом рафинированная древесная масса так же может быть использована в зависимости от объемов переработки в производстве древесно-композиционных материалов или мелкокристаллической целлюлозы.

Список литературы

1. Сафина А.В., Сафин Р. Г., Хайрутдинова А.Р., Валеев К.В, Асаева Л.Ш. Актуальное состояние отрасли комплексной переработки лиственницы // Деревообрабатывающая промышленность. 2018. № 1. С. 83-91.
2. Бабкин В.А., Остроухова Л.А., Малков Ю.А., Иванова С.З., Онучина Н.А., Бабкин Д.В Биологически активные экстрактивные вещества из древесины лиственницы // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. Т. 9. № 3. С. 363-367.
3. Транчук, Н.В., Рошин, В.И. Групповой состав экстрактов из кроны лиственницы сибирской летнего и осеннего сборов // Химия растительного сырья. 2015. №4. С. 63-70.
4. Сафин Р.Г., Арсланова Г.Р., Валеев К.В., Ахметова Д.А., Тимербаева А.Л., Халитов Р.В. Обзор исследований в области извлечения биологически активных и дубильных веществ из древесины лиственницы // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. №1. С. 15-25.
5. Ковалевская Е.Г. Оптимизация условий производства субстанции дигидрокверцетина, разработка лекарственного препарата на ее основе // автореф. дис.канд.фарм.наук. Пятигорск: ВГМУ. 2014 . С. 5 -7.
6. Медведева Е.Н., Бабкин В.А., Остроухова Л.А. Арабиногалактан лиственницы – свойства и перспективы использования // Химия растительного сырья. 2003. № 1. С. 27-37.
7. Остроухова Л. А., Ралдугин В.А., Бабкин В.А., Онучина Н.А., Левчук А.А. Исследование химического состава смолы древесины лиственницы // Химия растительного сырья. 2011. № 4. С. 83-87.
8. Пат. . 2279284 Российская Федерация: МПК А61К 36/15. Способ комплексной переработки древесины лиственницы // заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научный Центр Прикладных Исследований "БИОТЕХПРОМ" (ООО "Научный Центр Прикладных Исследований "БИОТЕХПРОМ"). - № 2005106082/15; заявл. 04.03.2005; опубл. 10.07.2006, Бюл №19 – 6 с.
9. Пат. № 2249026 Российская Федерация, C09F 1/00, C08B 37/00, C07D 311/40. Способ комплексной переработки отходов лиственницы с выделением природных веществ в нативном виде // Уминский А.А., Абрамов Я.К., Кудряшов В.К., Лунин Н.П., Уминская К.А., Мадыкин В.Ф., Смолин Б.И.; заявитель и патентообладатель Уминский А.А., Абрамов Я.К., Кудряшов В.К. – № 2004102595/04; заявл. 30.01.2004, опубл. 27.03.2005, Бюл. № 9 – 11 с.
10. Саттарова З.Г., Валеев К.В., Хайрутдинова А.Р., Сайфутдинов Д.М. Комплексная переработка отходов древесины лиственницы // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. №3. С.36-40.
11. 26. Jia Jia, Yang Lei, Zu YuanGang. Homogenated extraction of oligomeric proanthocyanidins from larch bark and its optimization by response surface methodology // Chemistry and Industry of Forest Products. 2009. №3. С. 78-84.
12. Сафина А.В., Сафин Р.Г., Хайрутдинова А.Р., Сайфутдинов Д.М., Валеев К.В., Асаева Л.Ш. Актуальное состояние отрасли комплексной переработки лиственницы // Деревообрабатывающая промышленность. 2018. №1. С.83-91.
13. Пат. № 2629770 Российская Федерация, МПК C07 D311/32 Способ получения дигидрокверцетина из древесины лиственницы сибирской // Левданский В.А., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный

исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН). - № 2016147281; заявл. 01.12.2016, опубл. 04.09.2017, Бюл. № 25 – 4с.

14. Кузнецов Б.Н., Головин Ю.Г., Головина В.В., Еремина А.О., Левданский В.А. Получение углеродных адсорбентов из продуктов экстракционной переработки коры лиственницы // Химия растительного сырья. 2002. №.2. С.57-61.

© 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; 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; Валеев К.В. – аспирант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kirval116@mail.ru; Арсланова Г.Р. – аспирант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: 94arslanovagulshat@mail.ru.

UDC 678.031:54-112

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE CONCENTRATION OF WATER -ETHANOL SOLUTION ON THE YIELD OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM LARCH WOOD

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

A method for extracting biologically active substances from larch wood by water-alcohol extraction is studied, which allows combining the stages of extraction of water-soluble arabinogalactan and alcohol-soluble dihydroquercetin. Experimental studies were conducted to study the effect of ethanol concentration on the yield of these components, as well as by-products such as larch resin and essential oil. As a result of processing the experimental data, graphical and mathematical dependences of flavonoid yield on changes in the ethanol concentration in the solution were obtained. It was found that the maximum yield of the water-soluble component of arabinogalactan was obtained at zero ethanol concentration. The yield of dihydroquercetin increases with an increase in the concentration of ethanol in the solvent. The maximum yield of larch resin and essential oil is observed at an ethanol concentration of 25-30 %. Since in this study, these components were considered as by-products, in order to determine the optimal value of the alcohol concentration, we focused on the yield of the main flavonoids - arabinogalactan and dihydroquercetin.

Keywords: larch, biologically active substances, flavonoids, ethanol, extraction

References

1. Safina A.V., Safin R.G., Khairutdinova A.R., Valeev K.V., Asayeva L.Sh. [Current state of the industry of complex processing of larch] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2018. №. 1. pp. 83-91. (InRuss.).
2. Babkin V.A., Ostroukhova L.A., Malkov Yu.A., Ivanova S.Z., Onuchina N.A., Babkin D.In [Biologically active extractive substances from larch wood] // Chemistry for sustainable development. 2001. Vol. 9. №. 3. pp. 363-367. (InRuss.).
3. Trancy N.V. Roshchin V.I. [Group composition of the extracts from the crown of a larch Siberian summer and autumn dues] // Chemistry of vegetable raw materials. 2015. №. 4. pp. 63-70. (InRuss.).
4. Safin R.G., Arslanova G.R., Valeev K.V., Akhmetova D.A., Timerbayeva A.L., Khalitov R.V. [Review of research in the field of extraction of biologically active and tannins from larch wood] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2020. №. 1. pp.15-25. (InRuss.).
5. Kovalevskaya E.G. [Optimization of production conditions for the substance dihydroquercetin, development of a medicinal product based on it] // avtoref. dis. kand. farm. nauk [autoref. Candidate of Pharmaceutical Sciences] / Pyatigorsk: Voronezh State Medical University. 2014. pp. 5-7. (InRuss.).

6. Medvedeva E.N., Babkin V.A., Ostroukhova L.A. [Larch Arabinogalactan-properties and prospects of use] // Chemistry of plant raw materials. 2003. №. 1. pp. 27-37. (InRuss.).
7. Ostroukhova L.A., Raldugin V.A., Babkin V.A., Onuchina N.A. Levchuk A.A. [Investigation of the chemical composition of resin, larch wood] // Chemistry of vegetable raw materials. 2011 – Vol. 4. – pp. 83-87. (InRuss.).
8. Pat. 2279284 Russian Federation: IPC A61K 36/15. [Method of complex processing of larch wood] // applicant and patent holder limited liability Company "Scientific Center for Applied Research" BIOTECHPROM "(LLC "Scientific Center for Applied Research "BIOTECHPROM"). – №. 2005106082/15; declared 04.03.2005; published 10.07.2006, Byul №. 19 – p. 6. (InRuss.).
9. Pat. 2249026 Russian Federation, C09F 1/00, C08B 37/00, C07D 311/40. [A method for complex processing of larch waste with the release of natural substances in native form] // Uminsky A.A., Abramov Ya.K., Kudryashov V.K., Lunin N.P., Uminskaya K.A., Madyakin V.F., Smolin B.I.; Applicant and patent holder Uminsky A.A., Abramov Ya.K., Kudryashov V.K.-№. 2004102595/04; Application 30.01.2004, publ. 27.03.2005, bul. №. 9 – p. 11. (InRuss.).
10. Sattarova Z.G., Valeev K.V., Khairutdinova A.R., Sayfutdinov D.M. [Complex processing of larch wood waste] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2017. – №. 3. – pp. 36-40. (InRuss.).
11. Jia Jia, Yang Lei, Zu Yuangang. [Homogenized extraction of oligomeric proanthocyanidins from larch bark and its optimization by the method of response surface] // Chemistry and industry of forest products. – 2009. – №. 3. – pp. 78-84.
12. Safina A.V., Safin R.G., Khairutdinova A.R., Sayfutdinov D.M., Valeev K.V., Asayeva L.Sh. [Current state of the industry of complex processing of larch] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2018. – №. 1. – pp. 83-91. (InRuss.).
13. Pat. 2629770 Russian Federation, IPC C07D311 / 32 Method for obtaining dihydroquercetin from Siberian larch wood // Levdansky V.A., Levdansky A.V., Kuznetsov B.N.; Applicant and patent holder Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center" Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (FITC KSC SB RAS, KSC SB RAS). – № 2016147281; Declared on 01.12.2016, published on 04.09.2017, byul. № 25 – p.4. (InRuss.).
14. Kuznetsov B.N., Golovin Yu.G., Golovin V.V., Eremina A.O., Levdansky V.A. [Obtaining carbon adsorbents from products of extraction processing of larch bark]// Himiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials]. 2002. – №. 2. – pp. 57-61. (InRuss.).

© **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; **Ziatdinova D.F.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Department of Wood Materials Processing, KNRTU, email: ziatdinova2804@gmail.com; **Safin R.G.** - Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Department of Wood Materials Processing, KNRTU, email: safin@kstu.ru; Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Department of Wood Materials Processing, KNRTU, email: safin@kstu.ru; **Valeev K.V.** – Post-graduate student of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: kirval116@mail.ru; **Arslanova G.R.** – Post-graduate student of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: 94arslanovagulshat@mail.ru.

УДК 678

ПРИМЕНЕНИЕ БИОМАССЫ ОПАВШИХ ЛИСТЬЕВ В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

П.С. Захаров, А.Д. Кудрявцев, А.Е. Шкуро, В.В. Глухих, О.Ф. Шишлов

Работа посвящена изучению физико-механических свойств композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности и биомассы опавших листьев. Биомасса опавших листьев, использованная в качестве наполнителя, была получена путем измельчения и сушки отходов лесопарка Уральского государственного технологического университета. Образцы композитов с биомассой опавших листьев были получены методом экструзии и горячего прессования. Для них были определены основные показатели физико-механических свойств. Так же установлены зависимости между содержанием биомассы опавших листьев в композитах и их физико-механическими свойствами. Данные зависимости представлены в работе в виде полиномов первой и второй степени. По большинству физико-механических свойств композиты с биомассой опавших листьев не уступают, либо превосходят образцы древесно-полимерных композитов с древесной мукой с аналогичной степенью наполнения.

Ключевые слова: композиты, ДПК, опавшие листья, экструзия, физико-механические свойства.

Введение

Сокращение доступных ресурсов древесины обуславливает необходимость поиска новых видов растительного сырья для химической переработки. Одним из альтернативных источников сырья может стать биомасса опавших листьев. Опавшие листья содержат в углеводы, флавоноиды, микроэлементы, белки и некоторые другие ценные органические веществ [1]. В однолетней хвое во время вегетационного периода присутствуют моносахариды (глюкоза, фруктоза), дисахариды и трисахариды, а так же высокомолекулярные углеводы (крахмал, гемицеллюлоза и целлюлоза). Известно, что в состав листьев тополя входят сахароза, трисахариды и пектин [2]. Опавшие листья различных пород деревьев так же могут содержать значительное количество лигнина. Сообщается [3], что содержание лигнина в абсолютно сухой биомассе опавших березовых листьев может достигать 35 мас. %. Известно, что в состав биомассы листьев бальзамического тополя может входить 11,4 % минеральных веществ [1].

Помимо основных компонентов в состав биомассы листьев входят так называемые экстрактивные вещества, которые могут быть извлечены из нее действием различных растворителей. Значительная часть экстрактивных веществ является спирторастворимой. Так, например, на долю спирторастворимых соединений в составе биомассы листьев бальзамического тополя приходится более двух третей от всей массы экстрактивных веществ. На протяжении календарного года состав и содержание экстрактивных веществ в листьях деревьев меняются в широком интервале. Установлено, что в период с октября по декабрь количество экстрактивных веществ снижается с 39 до 35 %, а с декабря по февраль повышается до 45 %. Ко времени распускания почек содержание экстрактивных веществ уменьшается до 40 % [4]. Содержание минеральных веществ в биомассе листьев так же варьируется в широких пределах и зависит от возраста растения и времени года.

В Великобритании общий вес всех опавших за один осенний период листьев оценивается в миллион тонн. В городе Бирмингем (население 1,142 миллиона человек, площадь - 267 км²) и его окрестностях собирают 16 тысяч тонн листьев в год. Большая часть собранных листьев вывозится на свалки. По оценке Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета в год на территории Новосибирска (население 1,625 миллиона человек, площадь - 466 км²) было собрано более 17 тысяч тонн опавших листьев. В том числе в парках 3230 тонн опавших листьев (19 %); на бульварах в скверах и в подобных зеленых насаждениях – 4760 тонн (28 %), в зеленых зонах ограниченного пользования – 9010 тонн (53 %) и всего [5]. Очевидно, что годовой объем собираемой в городах биомассы опавших листьев превышает десятки тысяч тонн и доступен практически повсеместно.

Листья деревьев собирают на поверхности частицы, распыленные в воздухе. Опавшие листья впитывают вредные выбросы, которыми насыщена атмосфера городов. Накопление отравленной листвы, наносит значительный вред деревьям и губит травяной покров. Пролежав зиму на газонах, листья образуют под снегом корку. Неубранная вовремя листва наносит значительный вред земельным

участкам. Однако опавшие листья могут являться и ценным удобрением - перегноем, который можно использовать в сельском хозяйстве. Уборка опавших листьев во дворах и парках ведет к истощению почв и гибели зеленых насаждений. Убирая листву в парках, человек лишает землю перегноя, а насекомых и их личинки возможности перезимовать, спрятавшись в «подстилке из листьев». Исходя из этого, рекомендуется, оставлять листья под деревьями в лесопарках и лесах, частично убирать в исторических парках, в то время как нужно обязательно вывозить их с городских улиц и бульваров, из скверов, садов и внутриквартальных систем озеленения [6].

Опавшие в городской черте листья считаются коммунальными отходами и подлежат утилизации. После сбора они подлежат захоронению на полигонах либо сжиганию. Сжигание на сегодняшний день это самый популярный и быстрый способ очистить лесопарковые зоны от опавших листьев. При этом все скопившиеся в листьях вещества выбрасываются в атмосферу, зачастую приводя к нежелательным последствиям. Токсичность продуктов сгорания опавших листьев обусловлена высоким содержанием в них загрязняющих веществ. В тлеющей листве образуется бензапирен (канцероген), газообразные продукты ее неполного сгорания разрушают озоновый слой. Так же при сжигании биомассы опавших листьев могут выделяться оксиды свинца, ртути и других тяжелых металлов. Концентрация токсикантов в дыме достаточно велика, а его действие способно вызвать острую интоксикацию организма и поразить дыхательные пути, центральную нервную систему и слизистую оболочку глаз. Трудности, возникающие при сжигании биомассы опавших листьев и связанные с этим процессом негативные экологические факторы, обуславливают необходимость и перспективы использования опавших листьев в качестве сырья для химической промышленности.

Существуют технологии утилизации данного вида отходов в органические удобрения и почвенные мелиораты, топливные брикеты, теплоизоляционные материалы [6]. Известно, что листья, трава и другие стеблевые растения – не являются подходящими материалами для сжигания в котлах (пеллетирования): высокое содержание калия и хлора вызывает зашлаковывание теплообменных поверхностей котельного оборудования и быструю коррозию. Зольность пеллет на основе биомассы травы и листьев превышает допустимые показатели (доходя до 30 мас. %). Причиной высокой зольности листьев является в первую очередь большое количество песка, земли и разной мелкой пыли, попадающих в пеллеты с листвой [5]. Существуют способы снижения зольности биомассы опавших листьев. Все эти способы предполагают тщательное измельчение и промывку биомассы листьев. Сушка измельченной биомассы опавших листьев позволяет минимизировать опрелость и скомканность материала [5].

Английскими учеными было установлено, что наилучшие результаты при горении дает композиция, состоящая из 70% листьев и 30% воска. В этой композиции воск выступает не только как связующий материал (в качестве связующих возможно применение различных материалов), но и служит для повышения теплоты сгорания брикета, которая сопоставима с теплотой сгорания высококачественного угля: до 27,8 МДж/кг. Подобные брикеты горят лучше и дольше, чем древесные (продолжительность горения одного брикета оставляет 2–3 часа), хорошо поджигаются без использования жидкостей и лучин для растопки. Для сбора листьев в Великобритании организованы специальные передвижные и стационарные пункты [5].

В 2013 ученые из Днепровского университета экологии и транспорта по результатам исследований, проведенных в университетской экологической лаборатории, рекомендовали использовать брикеты из листьев в качестве дешевого топлива для отопления частных домохозяйств, особенно в сельской местности. Отмечается, что использование пеллеты из биомассы опавших листьев целесообразно в случае наличия топки с постоянным притоком кислорода, обеспечивающим высокую температуру горения. В этом случае продукты сгорания биомассы опавших листьев в целом соответствуют продуктам сгорания древесины [5].

Так же биомасса опавших листьев может служить источником для получения этилового спирта. По расчетам [6] стоимость биоэтанола, произведенного из опавшей листвы, не будет превышать 50 рублей за литр.

Еще одним перспективным способом утилизации биомассы опавших листьев является их использование в качестве сырья для производства полимерных композиционных материалов. В работе [3] рассматривается возможность получения пластика без связующего (ПБС) на основе древесного опила и биомассы опавших листьев лесопарковых зон методом плоского горячего прессования в закрытых пресс-формах. Авторами отмечается, что возможность применения биомассы опавших листьев в качестве наполнителя для ПБС связана в первую очередь с высоким содержанием в них лигнина (более 30 %).

Полученные в результате исследования материалы не уступают образцам ПБС полученным на основе традиционных отходов лесной промышленности (древесные опилки).

В работе [8] рассмотрены вопросы использования волокна из листьев ананаса в качестве наполнителя для термопластичных (в частности полипропилена) и реактопластичных полимеров. Отмечается что волокно из листьев ананаса богато целлюлозой, доступно в больших количествах и, как следствие, характеризуется приемлемой стоимостью. Важнейшими достоинствами волокна из листьев ананаса так же являются низкая плотность и низкая абразивность. Благодаря низкой абразивности, существует возможность получения композиционных материалов с термопластичной матрицей методом экструзии с высокими степенями наполнения. Содержание лигнина в листьях ананаса составляет примерно 11,4 мас.%. Кроме того, листья ананаса являются возобновляемым ресурсом и обладают высоким потенциалом к биодеструкции. Согласно полученным результатам, биомасса листьев ананаса является перспективным источником сырья для промышленного применения, в основном для производства композиционных материалов, специальной бумаги, химического сырья (ферменты) и тканей.

Целью настоящей работы была оценка возможности замены древесной муки в составе древесно-полимерных композитов с термопластичной матрицей (полиэтилен) на измельченную биомассу опавших листьев.

Методы и материалы

В качестве полимерной матрицы для получения композиционных материалов в работе был использован полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 273-83 производства ОАО «Казаньоргсинтез». В качестве наполнителя в работе была использована биомасса опавших листьев. Опавшие листья были собраны на территории студенческого городка Уральского государственного лесотехнического университета (г. Екатеринбург). Большая часть собранной массы относится к листьям различных пород тополя и березы. Биомасса опавших листьев была предварительно высушена до постоянной массы при температуре 105 °С. После сушки биомасса опавших листьев была измельчена до состояния порошок (средний диаметр частиц не более 0,7 мм) и в таком виде смешивалась с остальными компонентами композиционного материала. Было определены содержания в биомассе опавших листьев лигнина, целлюлозы и золы, которые соответственно составляют 35, 11 и 19 мас. %.

Для улучшения совместимости между полимерной матрицей и наполнителем в композицию вводился функционализированный малеиновым ангидридом полиэтилен высокой плотности (метален F-1018). В качестве смазывающего агента в композицию добавлялся полиэтиленовый воск марки ПВ-200. Рецептуры композитов с биомассой опавших листьев представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рецептуры полученных композитов

№	Содержание компонента, %				Итого
	ПЭНД-273	Листья	Воск	Метален-1108	
1	97	0	1,5	1,5	100
2	77	20	1,5	1,5	100
3	67	30	1,5	1,5	100
4	57	40	1,5	1,5	100
5	47	50	1,5	1,5	100

Смешение компонентов композиционного материала производилось с помощью лабораторного одношнекового экструдера при температуре 180 °С. Из полученных стренгов методом горячего прессования изготавливались образцы в виде плит толщиной 4 мм. Для полученных образцов композитов были определены показатели следующих физико-механических свойств: плотность, твердость по Бринеллю, модуль упругости при сжатии, пластичность, число упругости, ударная вязкость, предел прочности при изгибе, водопоглощение за 24 часа и водопоглощение за 30 суток.

Результаты

Средние арифметические значения физико-механических свойств образцов полученных древеснонаполненных композитов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства образцов композитов с биомассой опавших листьев

Показатель	№ опыта в плане				
	1	2	3	4	5
Твердость, МПа	35,1	27,1	35,3	33,2	39,1
Число упругости, %	73,1	71,2	65,3	71,2	66,4
Пластичность, %	27,3	29,2	35,1	29,1	34,1
Предел прочности при растяжении, МПа	24	19	24	22	27
Модуль упругости при сжатии, МПа	393	290	402	367	457
Прочность при изгибе, МПа	-	54,0	37,1	39,0	29,9
Ударная вязкость, кДж/м ²	-	26,1	16,4	10,7	9,8
Плотность, кг/м ³	942	975	1005	1026	1103
Водопоглощение за 24 часа, %	0,1	0,3	1,7	1,8	2,0
Водопоглощение за 30 суток, %	0,1	0,7	4,0	5,0	8,1

Результаты графического анализа полученных экспериментальных данных представлены на рисунках 1-5.

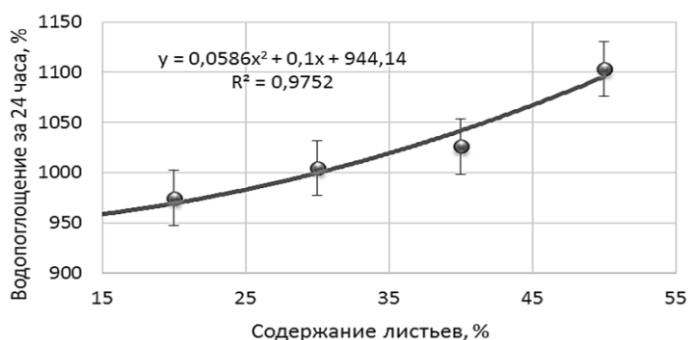


Рис. 1. График зависимости плотности образцов композитов от содержания биомассы опавших листьев

Плотность материала возрастает с ростом содержания наполнителя в полимерной матрице. Что объясняется более высокой плотностью сухой биомассы опавших листьев. Например, плотности целлюлозы и лигнина, на которые суммарно приходится более половины массы сухого листа, составляют соответственно 1500 и 1250-1400 кг/м³. По показателю плотности композиты с биомассой опавших листьев в целом соответствуют образцам ДПК с древесной мукой с аналогичными степенями наполнения. Зависимость плотности материала от содержания в нем биомассы опавших листьев с высокой степенью достоверности ($R^2=0,9752$) описывается уравнением $y=0,0586x^2+0,1x+944,14$. Следует отметить, что при экструзии рассматриваемых в исследовании композиций биомасса опавших листьев (особенно при содержании в композиции < 30 мас.%) действовала как активный вспенивающий агент, позволяя получать стренги композита значительно меньшей плотности по сравнению с эталонами на основе древесной муки.

Зависимость показателей твердости по Бринеллю и контактного модуля упругости от содержания биомассы опавших листьев в полимерной матрице композиционных материалов носит экстремальный характер. При введении относительно небольших количеств наполнителя (до 30 мас. %) происходит снижение твердости и жесткости материала по сравнению с ненаполненным полиэтиленом высокой плотности. Падение этих показателей вызвано снижением однородности композиционных материалов по сравнению с исходным ПЭНД. Формирование неоднородной структуры происходит, даже не смотря на присутствие аппретирующей добавки (металена) в составе композиций. При увеличении содержания наполнителя выше 30 мас. % начинается рост показателей твердости и модуля упругости при сжатии (жесткости), объясняемый частичным перераспределением механических нагрузок между матрицей и наполнителем. По показателям твердости по Бринеллю и контактного модуля упругости при сжатии композиты с опавшими листьями незначительно уступают ДПК с древесной мукой (твердость по Бринеллю – 40-50 МПа для степени наполнения 50 мас. %)

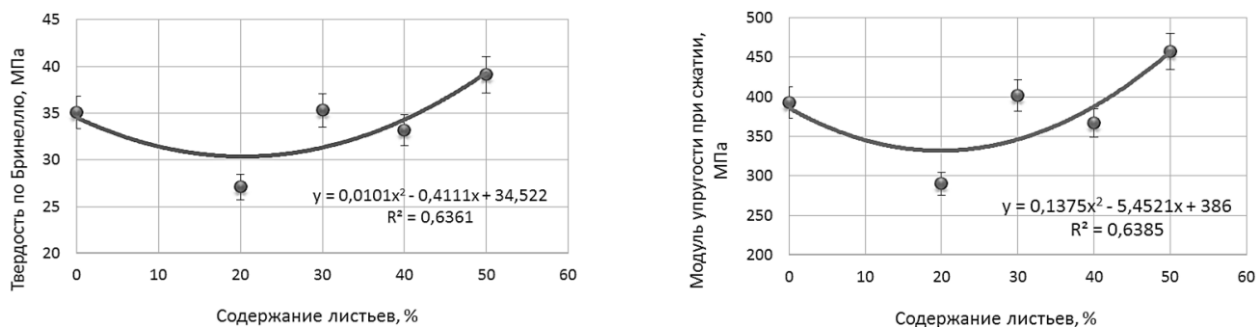


Рис. 2. Графики контактного модуля упругости при сжатии и твердости образцов композитов от содержания биомассы опавших листьев

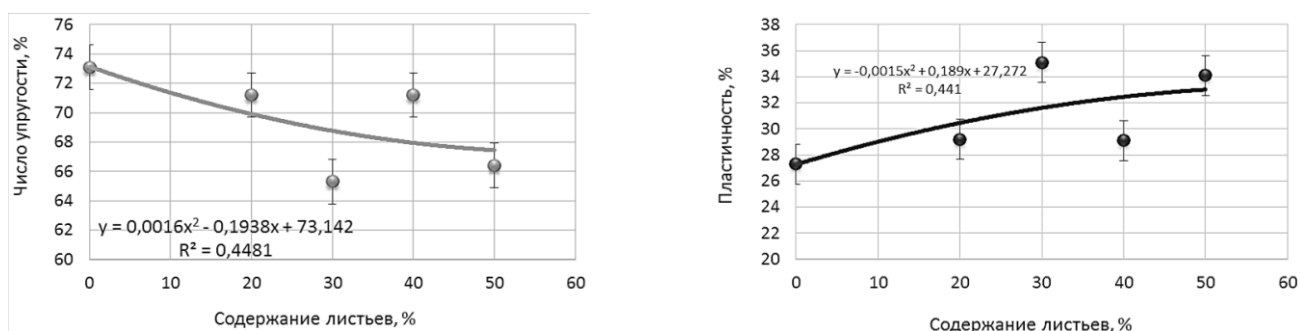


Рис. 3. Графики зависимости числа упругости и пластичности образцов композитов от содержания биомассы опавших листьев

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что с увеличением содержания биомассы опавших листьев в композиционном материале число упругости возрастает, а пластичность падает. Подобные тенденции хорошо коррелируют с результатами по определению показателей твердости и жесткости (рисунок 2). Наиболее пластичным (пластичность – 34,1 %), и в тоже время твердым (твердость – 39,1 МПа) и жестким (модуль упругости – 457 МПа), является композит, содержащий 50 мас. % опавших листьев. Очевидно, что эластичность композита пропорциональна содержанию в нем полимерной фазы (полиэтилена), а пластичность – содержанию наполнителя. Однако попытка описания данных зависимостей линейными уравнениями не привела к успеху ($R^2 < 0,5$). Для более точного математического описания зависимостей числа упругости и пластичности от содержания в композиционном материале биомассы опавших листьев необходимо воспроизведение эксперимента с большим количеством повторных опытов.

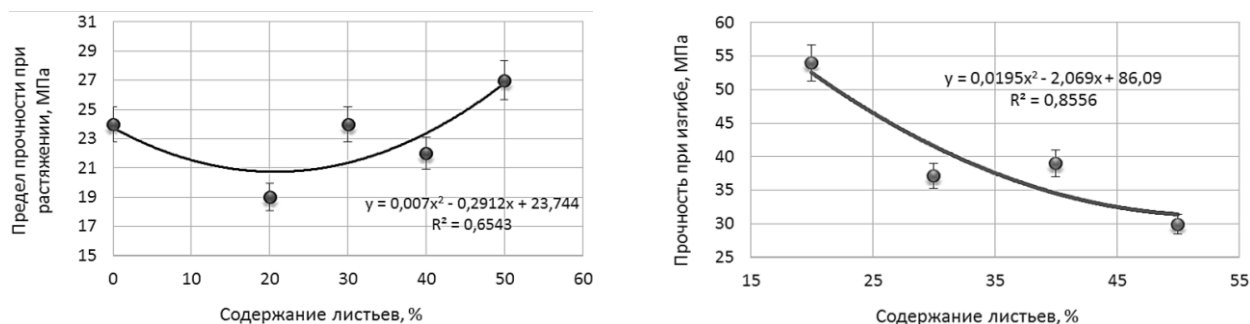


Рис. 4. Графики зависимости прочности при изгибе и прочности при растяжении образцов композитов от содержания биомассы опавших листьев

Данные рисунка 4 свидетельствуют, что с увеличением содержания измельченных опавших листьев в составе композиционного материала показатель прочности при изгибе снижается. Зависимость показателя прочности при изгибе от содержания биомассы опавших листьев описывается уравнением у

$= -0,0195x^2 - 2,069x + 86,09$ ($R^2 = 0,86$). Следует отметить, что значения предела прочности при изгибе образцов с биомассой опавших листьев значительно превышают аналогичные значения для композитов с древесной мукой. Так при степени наполнения 50 мас. % прочность при изгибе ДПК с древесной мукой колеблется в интервале 22-27 МПа, а прочность композита с опавшими листьями составляет 29,9 МПа.

Зависимость показателя предела прочности от содержания в композите наполнителя аналогична зависимостям характерным для показателей твердости по Бринеллю и контактного модуля упругости при сжатии. Прочность при растяжении композита с 50 мас. % биомассы опавших листьев на 12,5 % превосходит аналогичный показатель ненаполненного ПЭНД, и более чем в два раза превосходит прочность при растяжении образцов ДПК с 50 мас. % древесной муки.

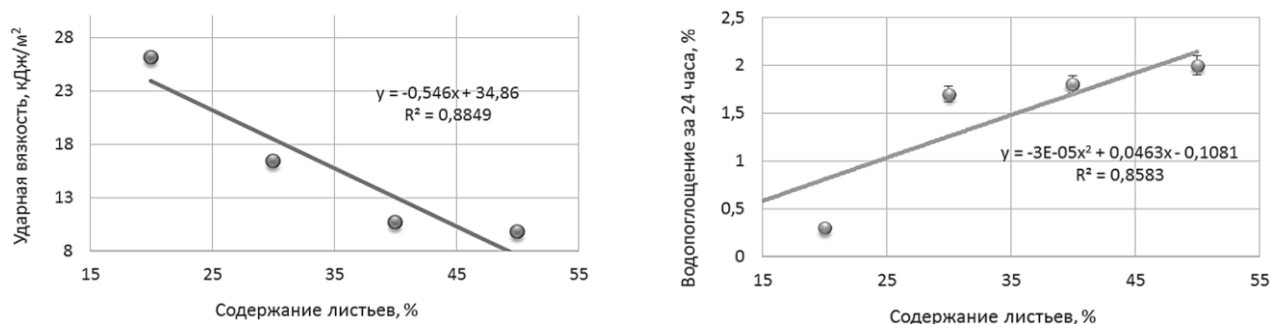


Рис. 5. Графики зависимости показателей ударной вязкости и водопоглощения за 24 часа образцов композитов от содержания биомассы опавших листьев

Увеличение содержания биомассы опавших листьев в составе композиционного материала негативно сказывается на ударной вязкости (прочности) образцов ДПК. Тенденция падения показателя ударной вязкости хорошо описывается линейным уравнением регрессии вида $y = -0,546x + 34,86$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,89$. Несмотря на это композиты с биомассой опавших листьев значительно превосходят образцы ДПК с древесной мукой с аналогичными степенями наполнения.

Частицы измельченной биомассы опавших листьев являются значительно более гидрофильными по сравнению с макромолекулами полиэтилена, из которых состоит полимерная матрица композита. Недостаточно однородное смешение компонентов древесно-полимерной смеси в процессе экструзии может приводить к образованию микротрещин, лакун и капилляров на поверхности образца, что в свою очередь способствует снижению водостойкости образца. В целом для ДПК с биомассой опавших листьев характерен рост показателя водопоглощения с увеличением содержания наполнителя

Заключение

Были проведены испытания физико-механических свойств образцов древесно-полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности (ПЭНД-273) и биомассы опавших листьев. Установлено, что наполнение ПЭНД измельченными опавшими листьями приводит к снижению показателей числа упругости, предела прочности при изгибе и ударной вязкости. Так же отмечается снижение водостойкости материала, связанное с введением гидрофильного наполнителя. В тоже время с увеличением содержания наполнителя в составе композита наблюдается рост показателей твердости по Бринеллю, контактного, модуля упругости при сжатии, пластичности материала, а также предела прочности при растяжении. В результате проведения исследования были установлены зависимости влияния содержания биомассы опавших листьев в составе ДПК на показатели их основных физико-механических свойств. Данные зависимости приведены в работе в виде полиномов первой и второй степени. По большинству физико-механических свойств композиты с биомассой опавших листьев не уступают, либо превосходят образцы древесно-полимерных композитов с древесной мукой с аналогичной степенью наполнения.

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

Литература

1. Исаева Е.В., Рязанова Т.В., Гаврилова Л.В. Групповой химический состав листьев тополя // Sciences of europe. – 2016. – № 8. – С. 116-121.

2. Беленовская Л.М., Корхов В.В., Мац М.Н. Растительные ресурсы СССР // Наука. Ленинградское отделение. – 1986. – С. 336.
3. Ершова А.С., Савиновских А.В., Артемов А.В., Буриндин В.Г. Использование отходов лесопарковых зон для получения пластиков без добавления связующих веществ. // Леса России и хозяйство в них. – 2019. – № 2. – Т.69. – С. 62-70.
4. Исаева Е.В., Ложкина Г.А., Рязанова Т.В. Влияние различных факторов на процесс экстракции почек тополя бальзамического // Химия растительного сырья. – 2007. – № 2. – С. 51-54.
5. Передий С. Пеллеты и брикеты из опавших листьев // ЛесПромИнформ. – 2018. – № 8. – С. 138;
6. Безруких А.Д., Веденский А.С. Исследование влияния на городскую среду опавших листьев. // Юный ученый. – 2017. – Т.13. – №4. С. 84-85.
7. Чачина С.Б., Двойн А.В. Получение биоэтанола из органического сырья. // Омский научный вестник. – 2014. – Т.134. – №. 2. – С. 224-228.
8. Leao A.L., Souza S.F., Cherian B.M. Pineapple leaf fibers for composites and cellulose // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2010. – V. 522. – pp. 36-41.

© **Захаров П.С.** – магистрант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: zazaver@mail.ru; **Кудрявцев А.Д.** – магистрант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: edge2008@yandex.ru; **Шкуро А.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Глухих В.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Шишлов О.Ф.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: o.shishlov@ucp.ru.

UDC 678

APPLICATION OF DROWN LEAVES BIOMASS AS A FILLER FOR WOOD-POLYMER COMPOSITES

P.S. Zakharov, A.D. Kudryavtsev, A.E. Shkuro, V.V. Glukhikh, O.F. Shishlov

This work is devoted to the study of the physical and mechanical properties of composite materials based on high-density polyethylene and the biomass of fallen trees. The biomass of fallen leaves used as a filler was obtained by grinding and drying the forest-park waste of the Ural State University of Technology and Technology University. Samples of composites were obtained by extrusion and hot pressing methods. For the obtained samples of composites with the biomass of fallen leaves, the following physical and mechanical properties were determined: density, Brinell hardness, contact modulus of elasticity in compression, plasticity, elasticity number, impact strength, ultimate strength in bending, ultimate strength in tension, as well as water absorption in 24 hours. Relationships were established between the content of fallen leaves in biomass samples and their physical and mechanical properties. These dependencies are shown as polynomials of the first and second degrees. It was found that, in terms of most of the operational properties, the considered composites with the biomass of fallen leaves are not inferior or superior to the reference WPC samples with wood flour with similar degrees of filling.

Key words: composites, WPC, fallen leaves, extrusion, physical and mechanical properties

References

1. Isaeva E.V., Ryazanova T.V., Gavrilova L.V. Group chemical composition of poplar leaves // Sciences of europe. - 2016. - No. 8. - P. 116-121.
2. Belenovskaya L.M., Korkhov V.V., Mats M.N. Plant resources of the USSR // Science. Leningrad branch. - 1986. -- S. 336.
3. Ershova A.S., Savinovskikh A.V., Artemov A.V., Buryndin V.G. Use of waste from forest -park zones to obtain plastics without the addition of binders. // Forests of Russia and the economy in them. - 2019. - No. 2. - T.69. - S. 62-70.
4. Isaeva E.V., Lozhkina G.A., Ryazanova T.V. Influence of various factors on the extraction of balsam poplar buds // Chemistry of vegetable raw materials. - 2007. - No. 2. - S. - 51-54.
5. Front S. Pellets and briquettes from fallen leaves? // LesPromInform. - 2018. - No. 8. - P. 138;
6. Bezrukikh A.D., Vedensky A.S. Study of the impact of fallen leaves on the urban environment. // Young

scientist. - 2017. - T.13. - No. 4. S.84-85.

7. Chachina S.B., Dvayan A.V. Bioethanol production from organic raw materials. // Omsk Scientific Bulletin. - 2014. - T.134. - No. 2. - S. 224-228.

8. Leao A.L., Souza S.F., Cherian B.M. Pineapple leaf fibers for composites and cellulose // Mol. Cryst. Liq. Cryst. - 2010. - V. 522. - P. 36-41.

© **Zakharov P.S.** – master's student of the Department of PPI Technology and Polymer Processing, Ural State Forestry Engineering University (USFEU), e-mail:zazaver@mail.ru; **Kudryavtsev A.D.** – master's student of the Department of PPI Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: edge2008@yandex.ru; **Shkuro A.E.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of the Department of PPI Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Glukhikh V.V.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of PPI Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Shishlov O.F.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of PPI Technology and Polymer Processing, USFEU, e-mail:o.shishlov@ucp.ru.

УДК 674.812.2

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

З.Г. Саттарова, Р.Г. Сафин, Р.Р. Фахрутдинов, Е.И. Байгильдеева

Рассмотрена возможность эффективного применения отходов лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий путем их использования при производстве теплоизоляционного материала, что отвечает стратегиям ресурсосбережения и охраны окружающей среды. Предложен новый композиционный материал на основе древесных отходов и пенополиуретана с оптимальными теплоизоляционными характеристиками. Применение древесных частиц в материале позволит снизить себестоимость производства, обеспечить низкую удельную массу изделия и его малую теплопроводность. Проведены исследования по определению водопоглощения и теплопроводности образцов полученного композиционного материала, имеющих различный состав компонентов. Рассмотрена возможность использования полученного материала в качестве конструкционного, исследованы его механические свойства. Предложен оптимальный компонентный состав разработанного композита.

Ключевые слова: древесный наполнитель, полимер, теплоизоляция, композиционный материал.

Введение

В настоящее время одним из направлений развития лесопромышленного комплекса России является рациональное использование древесного сырья на всех стадиях его переработки, включая заготовку леса и использование отходов деревообрабатывающей промышленности в различных отраслях. На сегодняшний день большая часть образующихся древесных отходов не перерабатывается, она просто уничтожается путем сжигания либо накапливается вокруг деревоперерабатывающих предприятий и никак не используется. Расширение областей использования древесных отходов, в том числе, в качестве наполнителей в композиционных материалах различного назначения, позволит улучшить экологическую ситуацию в стране, а также получить экономический эффект от использования древесного сырья [14].

Одним из путей решения проблемы является применение древесных отходов в производстве композиционных строительных материалов, в частности теплоизоляционных, которые обладают высокими эксплуатационными показателями [2, 4, 5, 8].

Ежегодно увеличивается объем строительных работ по возведению зданий и сооружений, промышленных объектов. В связи с этим стремительно растет спрос на новые строительные материалы, в том числе теплоизоляционные, с улучшенными эксплуатационными показателями и привлекательной себестоимостью. Существующие на сегодняшний день композиционные теплоизоляционные материалы имеют высокие качественные показатели в сочетании с рядом недостатков. Полимерные материалы имеют высокую стоимость, органические материалы высокую степень водопоглощения.

Получение более широкого спектра эксплуатационных свойств продукта возможно при комплексном подходе в создании и усовершенствовании существующих технологий получения композиционных материалов, в частности древесно-наполненных теплоизоляционных композитов, что на сегодняшний день является актуальным направлением развития производства теплоизоляционных материалов [1, 7, 9, 13, 15, 16].

Наиболее распространенным, универсальным и эффективным теплоизоляционным материалом на сегодняшний день является пенополиуретан. Он относится к группе газонаполненных пластмасс на основе полиуретанов, обладает высокими теплозащитными показателями и является одним из лучших теплоизоляционных материалов благодаря закрытой ячеистой структуре. Его теплопроводность сохраняется длительный период времени, так как стенки ячеек имеют низкий коэффициент диффузии [3, 6, 10]. Конструкции и изделия из него широко используются в различных отраслях промышленности. На основе пенополиуретана изготавливается широкий спектр продукции, которая представлена жесткими, полужесткими и эластичными материалами. Вместе с тем изделия из пенополиуретана являются дорогостоящими, так как при их изготовлении используется компонент – полиизоцианат, отличающийся высокой стоимостью. В связи с этим, одной из основных целей модифицирования пенополиуретановых материалов является их удешевление, что возможно путем добавления в полимерную матрицу таких наполнителей, которые обеспечат снижение себестоимости при улучшении прочностных, теплоизоляционных и прочих показателей.

В качестве такого наполнителя эффективно использовать отходы лесопромышленного комплекса. В связи с этим решение проблемы переработки древесных отходов и создание на их основе новых эффективных древесно-наполненных теплоизоляционных материалов с низкой рыночной стоимостью является актуальной задачей.

Исследованиями в области создания наполненных полимерных материалов занимались ученые С.И. Вольвсон, С.А. Угрюмов, В.В. Степанов, Т.Н. Стородубцева, В.А Салдаев, И.М. Галиев и другие. В работах данных авторов рассматривались возможные пути введения различных наполнителей в полимерную, в том числе пенополиуретановую матрицу с целью получения материалов с улучшенными эксплуатационными и технологическими свойствами, со снижением их себестоимости [11, 12].

Методы и материалы

Разработана технология получения древесно-полимерного теплоизоляционного материала, основными компонентами которого являются древесные частицы и пенополиуретан. Внешний вид полученного композита представлен на рисунке 1.

В качестве наполнителя разработанного композиционного материала использовались частицы в виде древесных опилок, образующихся при поперечной и продольной распиловке лесоматериалов на лесопильных рамах. В работе использовались древесные опилки с максимальными размерами: длина – 5 мм, ширина – 2 мм, толщина 1 – 2 мм. В древесном сырье не допускалось присутствие гнили и обугленности. Подготовка древесного наполнителя включала в себя стадии измельчения древесных отходов до заданных размеров, фракционный отбор после измельчения и сушку. В качестве связующего использовалась двухкомпонентная смесь полиола (компонент «А») и изоцианата (компонент «Б») в соотношении 1:1,5.

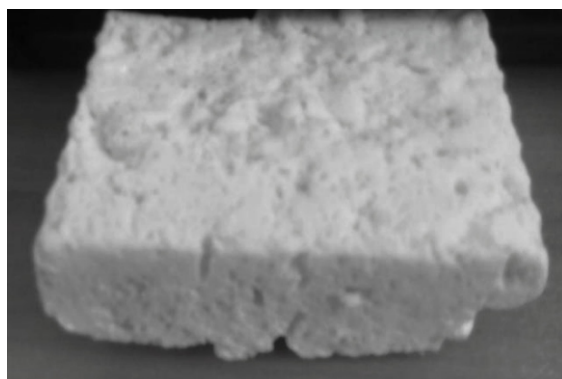


Рис. 1. Внешний вид разработанного теплоизоляционного материала

Способ получения теплоизоляционного материала включает смешивание компонента «А» вспенивающегося полиуретана с наполнителем и последующее введение в полученную смесь компонента «Б». Древесные опилки с заданными размерами предварительно подвергались паровой обработке при температуре 250 °С. Затем опилки подавали в диффузор диффузорно-конфузорного устройства. В зону перехода диффузора в конфузор к опилкам подавались необходимые компоненты вспенивающегося полиуретана, включающие простой полиэфир на основе окиси пропилена, оксипропилэтилендиамин, диметилэтаноламин, оксиалкиленметилсилоксановый блоксополимер, трихлорэтилфосфат. Полученная смесь выгружалась в реактор, в котором смесь перемешивалась и вакуумировалась до остаточного давления 15 – 20 КПа. После вакуумирования в смесь вводился полиизоцианат при следующем соотношении всех компонентов смеси, мас. %:

- полимер-полиол 40-30;
- полиизоцианат 60-45;
- опилки 0-25.

После перемешивания компонентов композиционную массу направляли в форму, обогреваемую до температуры 50-60 °С и выдерживали 15-20 мин. В результате получен пористый теплоизоляционный материал. Процентное содержание компонентов древесно-полимерного композита в образцах представлено в таблице 1.

Таблица 1 - Содержание компонентов древесно-полимерного композита

Компоненты теплоизоляционного материала	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5	Образец 6
полимер-полиол	40	38	36	34	32	30
древесные частицы, %	0	5	10	15	20	25
полиизоцианат, %	60	57	54	51	48	45

Результаты исследований

В связи с зависимостью свойств и характеристик теплоизоляционных материалов от их водостойкости, было проведено исследование процесса водопоглощения изготовленных образцов древесно-полимерного композита. Размеры образцов по длине и ширине не превышали 50 мм. Перед проведением испытания образцы сушили в течение 24 часов при температуре 50 °С, затем охлаждали до комнатной температуры и взвешивали. Подготовленные образцы устанавливали на сетчатую подставку, фиксировали сверху сеткой и полностью погружали в дистиллированную воду комнатной температуры. По истечении заданного времени образцы протирали сухой впитывающей тканью и взвешивали (рис.2).



Рис. 2. Испытание образцов на водопоглощение

Так как процесс образования пенополиуретана является экзотермической реакцией, созданию прочной адгезионной связи между компонентами древесно-полимерной системы препятствует испарение влаги, присутствующей в наружном слое опилок. Как следствие, это может привести к разрушению граничного слоя и ухудшению прочностных характеристик древесно-полимерного композита. В связи с этим было исследовано влияние воды на процесс структурообразования древесно-полимерной матрицы. На рисунке 3 изображена кинетическая зависимость водопоглощения теплоизоляционного материала от концентрации древесного наполнителя. Полученные результаты исследования водопоглощения образцов древесно-полимерного материала показывают, что оптимальным содержанием опилок в композите является объем в 10-15 %. При указанном содержании древесных частиц наблюдается наименьшее поглощение влаги.

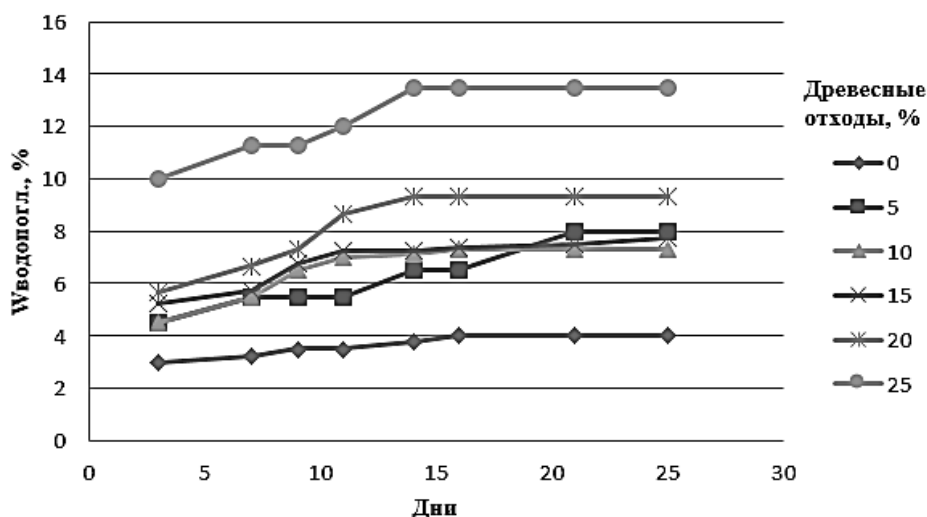


Рис. 3. Зависимость водопоглощения композита от содержания древесного наполнителя, %

Результаты исследований теплопроводности экспериментальных образцов древесно-полимерного композита в зависимости от содержания в них древесного наполнителя представлены на рис.4. Анализ экспериментальных данных показывает, что увеличение процента наполняемости теплоизоляционного материала повышает коэффициент теплопроводности, но до определенного значения. Это объясняется пределом наполняемости полимера, а также резким снижением адгезии полимерной матрицы по отношению к наполнителю.

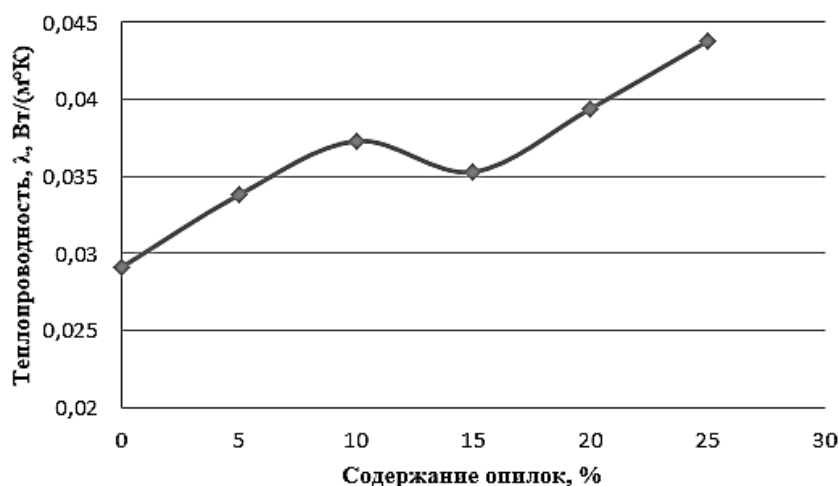


Рис. 4. Зависимость теплопроводности от содержания древесного наполнителя

Сравнение свойств пенополиуретана с полученным композитом представлено в таблице 2. Пористость и ее характер оказывают решающее влияние на акустические и теплоизоляционные свойства материала. При замкнутой пористости материал относится к теплоизоляционным, а при сквозной (в определенных пределах) – к звукопоглощающим.

Из таблицы 2 следует, что увеличение концентрации древесных частиц в пенополиуретановой композиции способствует увеличению теплопроводности теплоизоляционного материала. Это связано с тем, что теплопроводность у древесных частиц больше ($\lambda = 0,130$ Вт/мК), чем у пенополиуретана ($\lambda = 0,019-0,028$ Вт/мК). Можно сделать вывод, что полученный теплоизоляционный материал имеет хорошие показатели теплопроводности и может быть рекомендован для применения в качестве теплоизоляционного материала.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики пенополиуретана и образцов полученного композита

Теплоизоляционный материал	Плотность, кг/ м ³	Теплопроводность Вт/(м°К)	Пористость
Пенополиуретан	40-80	0,029 – 0,041	закрытая
Образец № 1	41,5	0,0291	закрытая
Образец № 2	54,25	0,0338	закрытая
Образец № 3	65,5	0,0373	закрытая
Образец № 4	66,7	0,0353	закрытая
Образец № 5	98	0,0394	закрытая
Образец № 6	120,25	0,0438	закрытая

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 5, 6, говорят об удовлетворительных прочностных характеристиках полученного материала. В связи с этим его можно рассматривать как конструкционный. Исследование механических свойств полученного композита проводилось на испытательной универсальной машине ИР 5082-50.

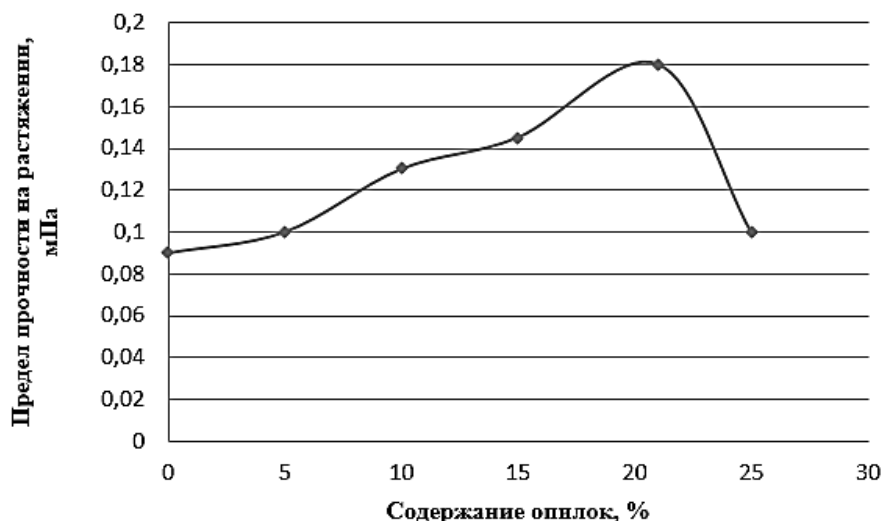


Рис. 5. Зависимость предела прочности на растяжение от содержания древесного наполнителя

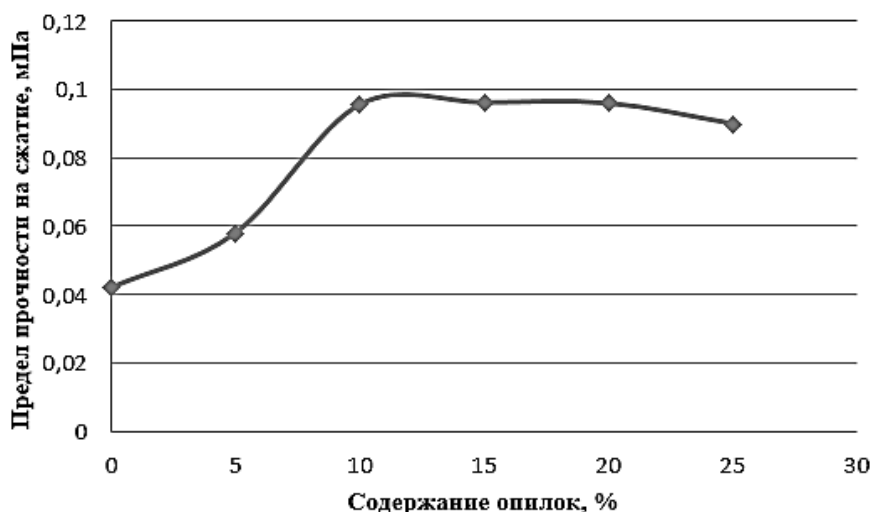


Рис. 6. Зависимость предела прочности на сжатие от содержания древесного наполнителя

Поскольку содержание древесных частиц в полимерной матрице напрямую влияет на вязкость смеси, то их добавление ограничено. Исходя из результатов проведенных исследований, максимальное содержание древесных опилок может достигать 20 % по массе. В связи с тем, что полученные образцы с процентным содержанием опилок 20 % имеют наиболее высокие прочностные показатели, предположено, что материал можно использовать в качестве конструкционного.

Механические характеристики полученного композита в зависимости от содержания в нем древесного наполнителя сведены в таблице 3. На первоначальном этапе, при увеличении содержания опилок заметно увеличивается прочность на сжатие, т. к. повышается плотность материала, а поры уменьшаются, заполняясь древесным наполнителем. При достижении содержания опилок 10 % и выше, предел прочности практически не изменяется и остается постоянным. Анализ результатов исследования на растяжение показывает, что увеличение содержания древесного наполнителя до 20 % благоприятно влияет на прочностные показатели материала. Дальнейшее увеличение содержания древесного наполнителя приводит к ухудшению данного показателя.

Таблица 3 - Пределы прочности на сжатие и растяжение материала в зависимости от содержания древесных частиц

Содержание опилок, %	Предел прочности на растяжении, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
0	0,09	0,042
5	0,1	0,058
10	0,13	0,096
15	0,145	0,0962
20	0,18	0,096
25	0,05	0,09

Заключение

Теоретически аргументирована и экспериментально доказана возможность производства древесно-полимерного теплоизоляционного материала на основе древесного наполнителя и пенополиуретана. Полученный материал обладает оптимальными эксплуатационными свойствами, в том числе прочностными показателями. Обосновано следующее соотношение компонентов древесно-полимерного теплоизоляционного композита, обладающего перечнем необходимых эксплуатационных свойств: полиол 32 %, полиизоцианат 48 %, древесные частицы 20 %. Теплопроводность полученного композита составляет 0,0394 Вт/(м°К), что соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 16381-77 «Материалы

и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие требования». Перспективным направлением применения полученного композита с наполнителем из опилок является теплоизоляция домов и сооружений.

Литература

1. Пат. 2493136 Рос. Федерация, МПК C04B 40/00. Способ получения теплоизоляционного материала / Левашко Л.И., Зиятдинова Д.Ф., Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Сафин Р.Р., Степанов В.В., Игнатьева Г.И., Нуруллина А.Т., Мухаметзянова А.Г., Хайруллина Э.Р.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»; заявл. 28.02.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. - 5 с.
2. Горшкова Т.А., Шевченко С.М., Феоктистов И.П. Современные строительные материалы на основе древесных отходов // Вестник Минского университета. - 2014. - Т. 13. №25. - С. 102-121.
3. Денисов А.В. Жесткие пенополиуретаны теплоизоляционного назначения // Строительные материалы. 2005. - № 6. - С. 21-22.
4. Дудынов С.В. Композиционные материалы с экологически чистыми добавками // - Саранск: изд-во Мордовского университета, 2003. - 136 с.
5. Ермолина А.В., Миронов П.В. Теплоизоляционный материал на основе древесно-волоконистых продуктов // Химия растительного сырья. - 2011. - № 3. - С. 197-200.
6. Корнеев А.Д., Проскурякова А.О. Наполненный пенополиуретан с улучшенными эксплуатационными свойствами // Вестник центрального регионального отделения. Материалы Академических научных чтений «Проблемы архитектуры, градостроительства в социально-экономическом развитии регионов». - Тамбов-Воронеж. - 2012. Выпуск 11. - С. 227-230.
7. Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., Галиев И.М., Салдаев В.В. Композиционные материалы на основе древесных частиц и полимеров // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. Т 18. - № 19. - С. 184-187
8. Сафин Р.Г., Исаков Т.Д., Гайнуллин А.А., Степанова Т.О., Хабибуллина А.Р. Разработка композиционных материалов на основе древесных отходов // Деревообрабатывающая промышленность. - 2014, - В.4. - С.32-37
9. Салдаев В.А., Салдаева О.С., Степанов В.В., Просвирников Д.Б., Саттарова З.Г. Аппаратурное оформление процесса получения плитного древесно-наполненного теплоизоляционного материала на основе пенополиуретана // Вестник Югорского государственного университета. - 2015. - № S2 (37). - С. 111 - 113
10. Салдаев В.А., Просвирников Д.Б., Сафин Р.Г., Салдаева О.С., Степанов В.В., Саттарова З.Г. Исследование эксплуатационных свойств древесно-наполненного пенополиуретана // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. Т 18. - № 20. - С. 181 - 184
11. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А. Исследование влияния фракционного состава и обработки древесного наполнителя на водопоглощение композита // Лесотехнический журнал. - 2015. Т.5. - № 4. (20) . - С. 161-169.
12. Сушков С.И., Филичкина М.В. Принципы формирования древесно-композиционных материалов с использованием отходов лесопромышленного производства // Строительные и дорожные машины. - 2014. - № 1. - С. 12 -16.
13. Угрюмов С.А., Федотов А.А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов с использованием древесных отходов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2014. Т.2. - № 2. - С. 160-164.
14. Филичкина М.В., Сушков А.С. Рациональное использование древесных отходов // Воронежский научно-технический Вестник. - 2013. - № 4 (6). - С. 27-32.
15. Шкуро А.Е., Глухих В.В., Мухин Н.М. Получение и изучение свойств древесно-полимерных композитов с наполнителями из отходов растительного происхождения // Лесной вестник - 2016. -Т. 3. №4. - С. 101-106.
16. Safin R.G. Sattarova Z.G., Khairullina E.R. Technology of wood waste processing to obtain construction material // Solid State Phenomena. - Vol. 265, 2017. pp. 245-249.

© Саттарова З.Г. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail:

sattarova@list.ru; **Сафин Р.Г.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: safin@kstu.ru; **Фахрутдинов Р.Р.** - магистрант кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: ryslan22437@gmail.com; **Байгильдеева Е.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: bai48@rambler.ru.

UDC 674.812.2

HEAT-INSULATING WOOD-POLYMER COMPOSITE MATERIAL

Z.G. Sattarova, R.G. Safin, R.R. Fakhrutdinov, E.I. Baigildeeva

The possibility of effective use of waste from logging and woodworking enterprises by using it in the production of heat-insulating material, which meets the strategies of resource conservation and environmental protection, is considered. A new composite material based on wood waste and polyurethane foam with optimal thermal insulation characteristics is proposed. The use of wood particles in the material will reduce the cost of production, ensure a low specific weight of the product and its low thermal conductivity. Studies were conducted to determine the water absorption and thermal conductivity of samples of the resulting composite material with different component compositions. The possibility of using the obtained material as a structural one is considered, and its mechanical properties are investigated. The optimal component composition of the developed composite is proposed.

Keywords: wood filler, polymer, insulation, composite.

References

1. Pat. 2493136 ROS. Federation, IPC C04B 40/00. [A method of obtaining a heat-insulating material] / Levashko L.I., Ziatdinova D.F., Timerbaev N.F., Safin R.G., Safin R.R., Stepanov V.V., Ignatieva G.I., Nurullina A.T., Mukhametzyanova A.G., Khayrullina E.R.; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Kazan National Research Technological University"; declared 02/28/2012; publ. 09/20/2013, Bull. No. 26. - 5 p. (InRuss.)
2. Gorshkova T.A., Shevchenko S.M., Feoktistov I.P. [Modern construction materials based on wood waste] // Bulletin of the Minsk University. - 2014. - Vol. 13. No. 25. - P. 102-121. (InRuss.)
3. Denisov A.V. Rigid polyurethane foams for thermal insulation purposes // Building material. 2005. - No. 6. - Pp. 21-22. (InRuss.)
4. Dudynov S.V. [Composite materials with environmentally friendly additives] // - Saransk: publishing house of the Mordovian University, 2003. - 136 p. (InRuss.)
5. Ermolina A.V., Mironov P.V. [Heat-Insulating material based on wood-fiber products] // Chemistry of plant raw materials. - 2011. - No. 3. - Pp. 197-200. (InRuss.)
6. Korneev A.D., Proskuryakova A.O. [Filled polyurethane foam with improved operational properties] // Bulletin of the Central regional Department. Materials of Academic scientific readings "Problems of architecture, urban planning in the socio-economic development of regions". - Tambov-Voronezh. - 2012. Issue 11. - Pp. 227-230. (InRuss.)
7. Safin R.G., Sattarova Z.G., Galiev I.M., Saldaev V.V. [Composite materials based on wood particles and polymers] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]. - 2015. T 18. - No. 19. - S. 184-187 (InRuss.)
8. Safin R.G., Iskhakov T.D., Gajnullin A.A., Stepanova T.O., Habibullina A.R. [Development of composite materials based on wood waste] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. - 2014, - B.4. - S.32-37 (InRuss.)
9. Saldaev V.A., Saldaeva O.S., Stepanov V.V., Prosvirnikov D.B., Sattarova Z.G. [The hardware design of the process of obtaining a slab wood-filled heat-insulating material based on polyurethane foam] // Vestnik YUgorskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Ugra State University]. - 2015. - No. S2 (37). - S. 111 - 113 (InRuss.)
10. Saldaev V.A., Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Saldaeva O.S., Stepanov V.V., Sattarova Z.G. [Research of operational properties of wood-filled polyurethane foam] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University]. - 2015. T 18. - No. 20. - S. 181 - 184. (InRuss.)
11. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A. [Investigation of the influence of fractional composition and processing of wood filler on water absorption of composite] // Lesotekhnicheskii Zhurnal. - 2015. Vol. 5. - № 4.

(20) . – pp. 161-169. (InRuss.)

12.Sushkov S.I. [The principles of the formation of wood-composite materials using waste from timber industry] // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and road machines]. - 2014. - No. 1. - S. 12 -16 (InRuss.)

13.Ugryumov S.A., Fedotov A.A. [Improving the technology of production of composite materials using wood waste] // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. - 2014. Vol. 2. - No. 2. - Pp. 160-164. (InRuss.)

14.filichkina M.V., Sushkov A.S. [Rational use of wood waste] // Voronezh scientific and technical Bulletin. – 2013. - № 4 (6). – S. 27-32. (InRuss.)

15.Shkuro E.A., Glukhikh V.V., Mukhin N.M. [Receive and study the properties of wood-plastic composites with fillers from waste of plant origin] // Forest Bulletin - 2016. -Vol. 3. No. 4. - S. 101 to 106. (InRuss.)

16.Safin R.G. Sattarova Z.G., Khairullina E.R. Technology of wood waste processing to obtain construction material // Solid State Phenomena. - Volume 265, 2017. Pages: 245-249.

© **Sattarova Z.G.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: sattarova@list.ru; **Safin R.G.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor, Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: safin@kstu.ru; **Fakhrutdinov R.R.** – Undergraduate of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: ryslan22437@gmail.com; **Baygildeeva E.I.** - PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Wood Materials Processing, KNRTU, e-mail: bai48@rambler.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 678

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО АЦЕТАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ

Д.В. Татаринова, В.А. Незнанов, А.Е. Шкуро, В.В. Глухих, О.Ф. Шишлов, Ю.М. Кулаженко

Работа посвящена изучению свойств триацетата целлюлозы, пластифицированного с помощью диметилизофталата и трифенилфосфата, и наполненного мукой костры технической конопли. Содержание наполнителя в образцах варьировалась от 20 до 50 мас. %. Получение композиционного материала осуществлялось методом вальцевания. Стандартные образцы для испытаний физико-механических свойств композитов изготавливались методом горячего прессования. В результате проведения исследования были установлены зависимости между показателями основных физико-механических свойств композиционных материалов на основе пластифицированного триацетата целлюлозы и содержанием в их составе волокон технической конопли. Использование конопляного волокна позволяет получать более твердые и жесткие материалы, по сравнению с ненаполненными этролами. Наполненные эфиры целлюлозы демонстрируют снижение показателя водопоглощения пропорциональное содержанию волокон целлюлозы в композите. Высокие значения показателей водопоглощения за 30 суток выдержки являются индикатором способности материалов к биоразложению в грунте.

Ключевые слова: эфиры целлюлозы, пластификаторы, ацетат целлюлозы, наполнитель, этрол, конопля техническая

Введение

Термопластичные полимеры обладают рядом преимуществ по сравнению с термореактивными полимерными материалами. Среди достоинств термопластов выделяются относительно низкая стоимость, возможность применения высокопроизводительных методов переработки, возможность формования сложных конструкций, гибкость и высокая ударная прочность производимых, а так же простота наполнения полимеров волокнами различного происхождения, в том числе растительного. Именно волокна растительного происхождения являются одним из наиболее перспективных типов армирующих наполнителей благодаря повсеместной доступности, низкой стоимости и высокому потенциалу к биоразложению.

Главный недостаток волокон растительного происхождения заключается в том, что температура их переработки не может превышать 220-230 °С. При больших температурах начинается процесс термического разложения. Таким образом, большинство волокон растительного происхождения может быть использовано только в сочетании с термопластами, температуры переработки которых лежат ниже 230 °С. Из крупнотоннажных полимеров данному условию удовлетворяют только полиэтилен, полипропилен и поливинилхлорид [1].

Волокна растительного происхождения обычно имеют более высокий модуль упругости, чем ненаполненные термопласты, что позволяет получать композиционные материалы с более высоким модулем упругости. Композиты на основе термопластов, армированные волокнами растительного происхождения это гибкие, прочные материалы с хорошими физико-механическими свойствами. Однако в композитах на основе термопластов волокна наполнителя, как правило, не ориентированы (ориентация является случайной), и поэтому улучшение свойств композита по сравнению с ненаполненным полимером не так велико, как в композитах с термореактивными связующими. Расплавы термопластов характеризуются очень высокой вязкостью, поэтому их совмещение с волокнами растительного происхождения представляется нетривиальной задачей. Известно, что показатель вязкости термопласта находится в обратной зависимости от его температуры. Однако повышение температуры может привести к деструкции волокон растительного происхождения [1].

Полиолефины являются наиболее широко применяемым типом термопластичных полимерных матриц для производства композитов, армированных волокнами растительного происхождения. При производстве таких материалов главной проблемой является низкое межфазное взаимодействие неполярной полимерной матрицы и полярного наполнителя. В работе [2] была определена полярность волокон конопли, стекловолокна и изучено влияние этого показателя на адгезию волокон к полимерной (полипропиленовой) матрице, а так же физико-механические свойства полученных композитов. В результате исследования было обнаружено, что нерегулярная морфология поверхности конопли может улучшить адгезию волокон к матрице. Прочность на разрыв композитов полипропилена наполненного коноплей полипропилена составляла 50 % от прочности композитов стеклонеполненного ПП, а модуль упругости при растяжении составлял 80 % от показателя стеклонеполненного ПП при степени наполнения 40 %. Использование малеинизированного полипропилена (МПП) в качестве агента совместимости (компатибилизатора) привело к значительному повышению физико-механических свойств композитов.

В исследовании [3] рассмотрены механические свойства композитов из волокон растительного происхождения. В качестве наполнителей были использованы три вида нетканых материалов на основе кенафа (лат. *Hibiscus cannabinus*). В качестве матрицы был использован акриловый полимер. Соотношение смеси кенафа и конопли составляло 50:50. Препреги формовали прессованием. Предел прочности этих композитов варьировался от 28 до 75 МПа при давлении формования от 1,5 до 6 МПа. Модуль упругости при растяжении варьировался от 3,9 до 11 ГПа. Относительное удлинение до разрушения варьировалось от 0,8 % до 1,4 %. Было проведено исследование микроструктуры разрушенных образцов, которое показало хорошее сцепление волокна с полимерной матрицей.

В работе [4] рассмотрены термические и механические свойства композитов из сополимера 1-пентена и полипропилена, армированных пеньковым (конопляным) волокном. При массовой доле волокна 30% прочность при растяжении составляла 25 МПа, модуль упругости при растяжении – 2,5 ГПа, прочность при изгибе – 3,3 ГПа и ударная вязкость составляла 1,3 кДж/м². Результаты исследования свидетельствуют, что термостойкость композитов, армированных конопляным волокном, выше чем у волокон или матрицы по отдельности.

Исследование [5] описывает механические свойства композитов полученных из волокон растительного происхождения и полипропилена. В качестве наполнителей растительного происхождения были использованы волокна кенафа, сизаля, конопли и джута. Степень наполнения полученных композитов составляла 40 мас. %. Композиты с конопляным волокном показали самую высокую прочность при разрыве (52 МПа). Прочность при разрыве композитов, армированных волокнами кенафа, сизаля и джута составляла примерно 30 МПа. Композит с конопляным волокном так же продемонстрировал наибольшее значение показателя прочности при изгибе.

Сообщается [6], что композиты на основе полипропилена и конопляных волокон демонстрируют высокие значения прочности при изгибе (54 МПа), которые сопоставимы с показателями композитов полученных на основе стекловолокна и полипропилена (60 МПа). Отмечается так же что показатель прочности при изгибе для образца композита с коноплей (36,5 МПа) выше, чем у композита, армированного стекловолокном (24 МПа). Аналогичные тенденции демонстрируют показатели модулей упругости при растяжении и тенденции. Максимальный модуль упругости при растяжении зарегистрированный для композита с коноплей составляет 6,8 ГПа, сопоставим с показателями композитов, армированных стекловолокном (6,2 ГПа). Ударная вязкость композитов с конопляным волокном оказалась довольно низкой по сравнению с композитами, армированными стекловолокном. Максимальная ударная вязкость (для композитов с волокнами растительного происхождения) была зарегистрирована для композитов с пенькой и сизалем, и составляла 25 кДж/м². В то же время для композитов, армированных стекловолокном показатель ударной составил 54 кДж/м².

Физико-механические свойства композитов на основе термопластов, армированных пеньковым волокном, показывают, что конопляное волокно является одним из наиболее перспективных типов волокон растительного происхождения в полимерной отрасли. Благодаря высоким показателям физико-механических свойств и коммерческой доступности в ближайшей перспективе конопляное волокно (пенька) способно частично заменить стеклянные волокна в качестве наполнителя для термопластичных полимеров.

Как было замечено ранее не каждый термопластичный полимер может стать матрицей для композиционного материала, армированного волокнами растительного происхождения. Из-за

температурной нестабильности таких волокон, список применимых термопластов достаточно мал. Одним из типов полимерных матриц совместимых с волокнами растительного происхождения являются пластифицированные эфиры целлюлозы или этролы.

Целлюлоза не является термопластичным полимером. Это обстоятельство в значительной степени ограничивает ее применение в полимерной индустрии. Однако различные сложные и простые эфиры целлюлозы с легкостью поддаются пластификации под действием широкого ряда органических веществ [7]. Не смотря на то, что пластифицированные эфиры целлюлозы были одними из первых открытых полимерных материалов (например, нитрат целлюлозы производится с 1878 года), на сегодняшний день эта категория материалов по своему распространению в быту и промышленности значительно уступает синтетическим полимерам. Можно выделить две основные группы материалов на основе эфиров целлюлозы, широко используемых в настоящее время. Первая группа – это эфиры применяемые для изготовления волокон, вторая – термопластичные производные эфиров целлюлозы (этролы), которые можно использовать для переработки методами экструзии и литья под давлением. Химическая структура эфира целлюлозы, его молекулярная масса, тип и количество использованного пластификатора в значительной степени определяют физико-химические свойства каждого конкретного типа этролов. Так же эти параметры оказывают влияние на скорость биоразложения материала. В зависимости от необходимых материалу свойств в состав этрола вводят смесь пластификаторов. Некоторые пластификаторы способны придавать композиции различные специальные свойства. Так, например, введение в состав этрола трифенилфосфата способствует повышению водостойкости материала, введение трихлорэтилфосфата – повышению огнестойкости, дибутилсебацат – морозостойкости. Использование цитратов (эфиров лимонной кислоты) позволяет получать нетоксичные этролы, пригодные для использования в пищевой упаковке. Наиболее широко в промышленности в качестве пластификаторов применяются различные органические эфиры фосфорной и фталевой кислот.

На сегодняшний день наиболее самым востребованным сложным эфиром целлюлозы, несмотря на общемировую тенденцию к падению интереса к сложным эфирам целлюлозы (и росту интереса к простым эфирам), остается ацетат целлюлозы. Благодаря комплексу эксплуатационных свойств и относительной доступности исходно сырья для их производства ацетилцеллюлозные этролы являются перспективной заменой крупнотоннажных синтетических полимеров полиолефинового ряда.

Как и во многих других областях полимерной промышленности в переработке ацетилцеллюлозных этролов распространено применение различных типов наполнителей. Чаще всего в качестве наполнителей пластифицированных эфиров целлюлозы применяют туф, каолин, тальк, мел и некоторые другие минералы. Так же возможно использование лигноцеллюлозных наполнителей растительного происхождения, в частности древесной муки [П], а также различных измельченных отходов лесной и аграрной промышленности. Массовая доля наполнителя в составе композиций с пластифицированными эфирами целлюлозы не превышает 50 %, а наиболее часто составляет менее 30 %.

В работе [8] были рассмотрены вопросы получения термопластичного ацетата целлюлозы, была оценена эффективность действия пластификаторов – трибутилфосфата и диметилизофталата и исследованы физико-механические свойства серии образцов ацетилцеллюлозных.

Целью настоящей работы являюсь получение и исследование свойств композиционных материалов на основе пластифицированного триацетата целлюлозы и измельченной костры технической конопли. В задачи исследования входила оценка влияния содержания наполнителя на физико-механические свойства образцов полученных композиционных материалов.

Методы и материалы

В качестве сырья для получения пластифицированных эфиров целлюлозы использовался триацетат целлюлозы (ОАО «Ацетат Химволокно», ТУ 6-05-943-75). В качестве пластификаторов использовались диметиловый эфир изофталевой кислоты и трибутиловый эфир фосфорной кислоты (ТБФ) ТУ 18-09-8783-87. В качестве лубриканта применялась техническая стеариновая кислота марки Т-32.

В качестве наполнителя была использована измельченная до состояния муки костра технической конопли. Мука костры технической конопли трех марок: 120, 250 и 560, - была предоставлена ООО «Композит-Основа» (г. Волгоград).

Для исследования влияния содержания измельченной технической конопли на физико-механические свойства композиционных материалов на основе триацетата целлюлозы была получена серия образцов композитов в соответствии со следующими рецептурами (таблица 1).

Таблица 1 – Рецептуры композитов

№	Содержание компонента, мас. %				
	Ацетат целлюлозы	ДМФ	ТФФ	Стеариновая кислота	КМ-180
1	55,0	12,0	12,0	1,0	20,0
2	48,1	10,5	10,5	0,9	30,0
3	41,2	9,0	9,0	0,8	40,0
4	34,4	7,5	7,5	0,7	50,0

Смешение компонентов композиционного материала производилось на вальцах марки ПД-320-160/160. Полученная смесь после вальцевания (ДПС) охлаждалась до комнатной температуры, а затем подвергалась измельчению. Затем методом горячего прессования изготавливались диски, использованные для изготовления стандартных образцов и испытаний их физико-механических свойств. Для полученных в работе материалов были определены показатели следующих свойств: $\sigma_{и}$ – прочность при изгибе, МПа; H_B – твёрдость по Бринеллю, МПа; E_k – контактный модуль упругости при сжатии, МПа; σ_p – предел прочности при растяжении, МПа; ЧУ – число упругости, %; П – пластичность, %; a – ударная вязкость, кДж/м²; W_{24} – водопоглощение за 24 часа, мас. %; W_7 – водопоглощение за 7 суток, мас. %; W_{30} – водопоглощение за 30 суток, мас. %. Твёрдость по Бринеллю, контактный модуль упругости при сжатии образцов, пластичность и число упругости образцов древесно-полимерных композитов с измельченной кострой технической конопли определялись с помощью твердомера модели БТШПСП У42 по ГОСТ 4670-67. Определение ударной вязкости и предела прочности при консольном изгибе проводились на приборе «Динстат-Дис» по ГОСТ 17036-71. Водопоглощение образцов ДПКт определялось по ГОСТ 19592.

Результаты

Средние арифметические значения показателей физико-механических свойств образцов композитов, полученных совмещением пластифицированного триацетата целлюлозы и костры технической конопли, показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства образцов композитов с конопляным волокном

Показатель	Номер опыта в плане			
	1	2	3	4
$\sigma_{и}$, МПа	10,7	22,1	36,9	48,3
H_B , МПа	26,6	61,2	153,2	139,8
E , МПа	193	631	1890	1705
ЧУ, %	52,2	7004	99,2	100
П, %	47,8	29,6	0,8	0
a , кДж/м ²	6,1	5,8	3,6	5,7
ВП ₂₄ , %	8,6	4,1	7,3	6,5
ВП ₇ , %	19,2	12,9	14,7	13,3
ВП ₃₀ , %	24,4	19,9	21,8	20,1

Результаты графического анализа полученных экспериментальных данных представлены на рисунках 1-5

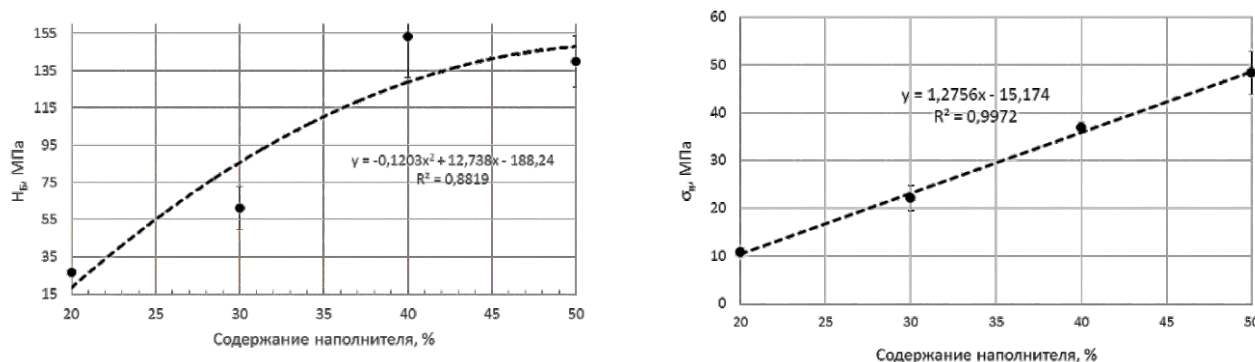


Рис. 1. График зависимости плотности образцов композитов от содержания биомассы опавших листьев

Для зависимости показателя твердости по Бринеллю от содержания в образцах этролов конопляной муки характерна экстремальная зависимость: Данная зависимость описывается уравнением $y = -0,1203x^2 + 12,738x - 188,24$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,8819$, говорящем о достаточно высокой точности описания моделью экспериментальных данных. Наибольшего значения (по прогнозу) твердость по Бринеллю при содержании 52,9 мас. % муки технической конопли в составе композита. Аналогичная тенденция характерна и для показателя модуля упругости при сжатии, характеризующем жесткость материала. Наибольшие значения твердости по Бринеллю (139,8 МПа) и модуля упругости (1,7 ГПа) в рассматриваемом интервале степеней наполнения продемонстрировали образцы композита, содержащего 50 % мас. муки технической конопли. Стоит отметить, что данные показатели значительно превосходят твердость и жесткость древесно-полимерных композитов полученных на основе термопластичных полимеров (полипропилена и полиэтилена) и конопляных волокон.

Для показателя предела прочности при изгибе в рассматриваемом интервале степеней наполнения характерна линейная зависимость от содержания костры технической конопли. Данная зависимость выражается уравнением $y = 1,2756x - 15,174$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9972$. Максимальные значения этого показателя (48,3 МПа), характерные для композита со степенью наполнения конопляным волокном 50 мас. % так же значительно превосходят аналоги, получаемые на основе полиолефинов.

Увеличение показателей твердости по Бринеллю, контактного модуля упругости при сжатии и предела прочности при изгибе при повышении содержания конопляного волокна в материале косвенно свидетельствует о его однородном распределении в полимерной матрице. Такое распределение можно объяснить сродством матрицы и наполнителя, которое обусловлено их сходной химической структурой (в частности высоким содержанием целлюлозы).

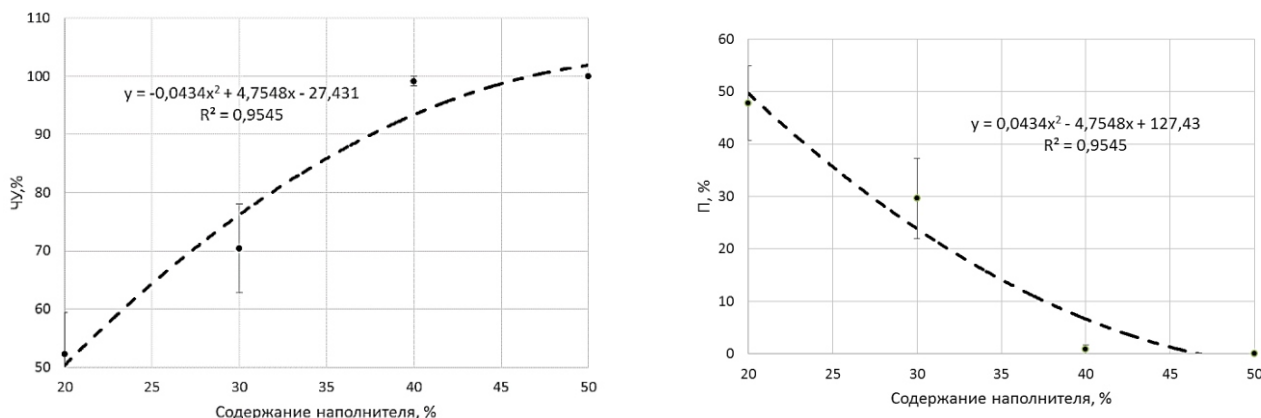


Рис. 2. Графики зависимости числа упругости и пластичности образцов композитов от содержания костры технической конопли

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что число упругости образцов композитов полученных на основе пластифицированного ацетата целлюлозы и костры технической конопли увеличивается с ростом содержания костры технической конопли в составе композиционного материала. Данная зависимость описывается уравнением $y = -0,0434x^2 + 4,7548x - 27,43$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9545$. При содержании 50 мас. % наполнителя показатель числа упругости

приближается к 100 %, что говорит о высокой способности к обратимым деформациям. В сочетании с высоким значением модуля упругости при сжатии (жесткостью) это потенциально характеризует наполненный конопляным волокном этрол как высококачественный конструкционный материал.

Пластичность материала изменяется обратно пропорционально содержанию наполнителя и описывается уравнением $y = 0,0434x^2 - 4,7548x + 127,43$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9545$. Наибольшей пластичностью обладает образец наполненного этрола, содержащий 20 мас. % муки технической конопли.

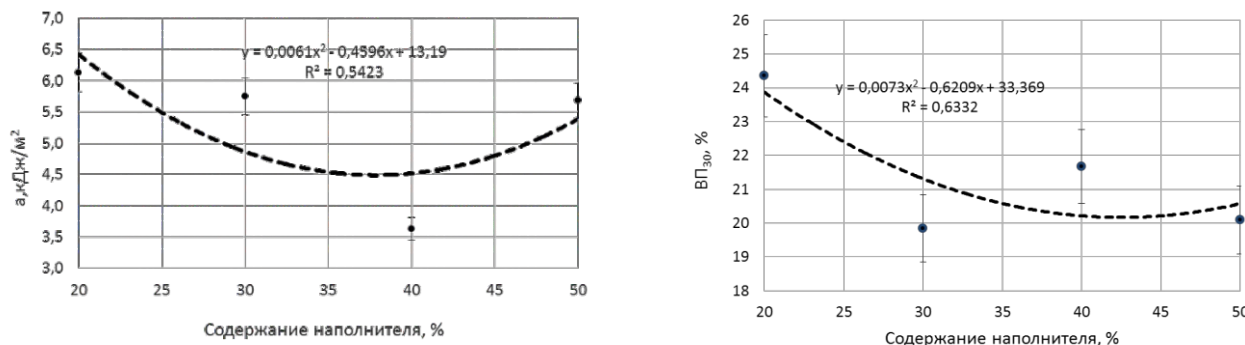


Рис. 3. Графики зависимости показателей ударной вязкости и водопоглощения за 30 суток образцов композитов от содержания костры технической конопли

Зависимость показателя ударной вязкости образцов наполненных этролов от содержания костры технической конопли в настоящем исследовании не удалось описать с приемлемой точностью ($R^2 < 0,6$.) Однако очевидно, что по этому показателю наполненные пластифицированные этролы сопоставимы с композитами на основе наполненных термопластов ($a = 5-10$ кДж/м²).

Для показателя водопоглощения за 30 суток я характерна обратная зависимость от содержания волокон целлюлозы в составе образца. Более высокое водопоглощение композитов с низкими степенями наполнения объясняется высокой гидрофильностью полимерной матрицы, возможными миграциями пластификаторов (содержание которых в композите обратно пропорционально содержанию наполнителя) и большей плотностью высоконаполненных образцов, связанной с высокой однородностью распределения наполнителя. Высокие значения показателей водопоглощения за 30 суток выдержки являются индикатором потенциала наполненных этролов с мукой костры технической конопли к биоразложению в грунте.

Заключение

В результате проведенных испытаний были установлены основные закономерности влияния содержания муки технической конопли в этролах на показатели их ключевых физико-механических свойств. Установлено что увеличение содержания наполнителя приводит к росту таких показателей как твердость по Бринеллю, контактный модуль упругости при сжатии, число упругости, предел прочности при изгибе. К положительным эффектам, оказываемым увеличением содержания наполнителя, следует так же отнести повышение водостойкости материала. Увеличение показателей твердости по Бринеллю, контактного модуля упругости при сжатии и предела прочности при изгибе при повышении содержания конопляного волокна в косвенно материале свидетельствует о его однородном распределении в полимерной матрице. Такое распределение можно объяснить сродством матрицы и наполнителя обусловленное сходной химической структурой (высокое содержание целлюлозы).

По большинству физико-механических свойств образцы ацетилцеллюлозных этролов, наполненных кострой технической конопли превосходят аналоги с полиолефиновыми матрицами и волокнистыми наполнителями растительного происхождения. Увеличение показателей твердости по Бринеллю, контактного модуля упругости при сжатии и предела прочности при изгибе при повышении содержания конопляного волокна свидетельствует о его однородном распределении в полимерной матрице композита. Это явление объясняется сродством между матрицей и наполнителем, обусловленном сходством из химической структуры (в том числе, высоким содержанием целлюлозы). Высокие значения показателей водопоглощения за 30 суток выдержки говорят о высоком потенциале этролов, наполненных мукой костры технической конопли, к биоразложению в грунте.

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

Литература

1. Asim S. [Hemp fiber and its composites – A review] // Journal of Composite Materials. – 2012. – V.4. – №8. – pp. 973-986.
2. Mutje P, Lopez J.P, Lopez A, Vallejos M. E and Vilaseca F. [Full exploitation of cannabis sativa as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials] // Compos Part A-Appl S. – 2007. – V. 38. – pp. 369-377.
3. Yamamoto T., Medina L., Schledjewski R. [Tensile properties of natural fiber reinforced thermoset composites] // Adv. Compos. Lett. – 2005. – V. 14. pp. 29-34.
4. Khoathane M.C., Vorster O.C., Sadiku E.R. [Hemp fiber reinforced 1-pentene/polypropylene copolymer: The effect of fiber loading on mechanical and thermal characteristics of the composites] // J. Reinf. Plast. Comp. – 2008. – V. 27. – pp. 1533-1544.
5. Wambua P., Ivens J., Verpoest I. Natural fibers: Can they replace glass in fiber reinforced plastics? // Compos. Sci. Technol. – 2003. – V. 53, - pp. 1259-1264.
6. Hull D., Clyne T.W. An introduction to composite materials // New York, USA: Cambridge University Press. – 1996. – P. 326.
7. Simon J., Miller H. P., Koch R., Müller V. Thermoplastic and Biodegradable Polymers of Cellulose // Polymer Degradation and Stability. – 1998. – V. 59. – pp.107-115.
8. Кудрявцев А.Д., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Исследование физико-механических свойств ацетилцеллюлозных этролов // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22. – №. С. 28-32.

© **Незнанов В.А.** – студент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), e-mail: vladislav.neznanov19@gmail.com; **Татарина Д.В.** – студент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: tatarinova.das.v@mail.ru; **Шкуро А.Е.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **Глухих В.В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Шишлов О.Ф.** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: o.shishlov@uscr.ru; **Кулаженко Ю.М.** – аспирант кафедры технологии ЦБП и переработки полимеров, ФГБОУ ВО «УГЛТУ», e-mail: kulazhenkoyuliya@mail.ru.

UDC 678

RESEARCH OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON PLASTIFIED CELLULOSE ACETATE AND TECHNICAL HEMP

D.V. Tatarinova, V.A. Neznanov, A.E. Shkuro, V.V. Glukhikh, O.F. Shishlov, Y.M. Kulazhenko

The work is devoted to the study of the properties of cellulose triacetate plasticized with dimethyl isophthalate and triphenyl phosphate, and filled with industrial hemp fire flour. The filler content in the samples varied from 20 to 50 wt. %. The composite material was obtained by rolling. Standard samples for testing the physical and mechanical properties of composites were prepared by hot pressing. As a result of the study, the relationship was established between the indicators of the main physical and mechanical properties of composite materials based on plasticized cellulose triacetate and the content of industrial hemp fibers in their composition. The use of hemp fiber allows for harder and tougher materials than unfilled etrolls. The filled cellulose ethers show a decrease in water absorption proportional to the content of cellulose fibers in the composite. High water absorption rates for 30 days of exposure are an indicator of the biodegradability of materials in the soil.

Key words: cellulose ethers, plasticizers, cellulose acetate, filler, etrol, technical hemp.

References

1. Asim S. [Hemp fiber and its composites – A review] // Journal of Composite Materials. – 2012. – V.4. – №8. – pp. 973-986.
2. Mutje P, Lopez J.P, Lopez A, Vallejos M. E and Vilaseca F. [Full exploitation of cannabis sativa as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials] // Compos Part A-Appl S. – 2007. – V. 38. – pp. 369-377.
3. Yamamoto T., Medina L., Schledjewski R. [Tensile properties of natural fiber reinforced thermoset composites] // Adv. Compos. Lett. – 2005. – V. 14. pp. 29-34.
4. Khoathane M.C., Vorster O.C., Sadiku E.R. [Hemp fiber reinforced 1-pentene/polypropylene copolymer: The effect of fiber loading on mechanical and thermal characteristics of the composites] // J. Reinf. Plast. Comp. – 2008. – V. 27. – pp. 1533-1544.
5. Wambua P., Ivens J., Verpoest I. Natural fibers: Can they replace glass in fiber reinforced plastics? // Compos. Sci. Technol. – 2003. – V. 53, - pp. 1259-1264.
6. Hull D., Clyne T.W. An introduction to composite materials // New York, USA: Cambridge University Press. – 1996. – P. 326.
7. Simon J., Miller H. P., Koch R., Müller V. Thermoplastic and Biodegradable Polymers of Cellulose // Polymer Degradation and Stability. – 1998. – V. 59. – pp. 107-115.
8. Kudryavtsev AD, Shkuro AE, Krivonogov PS Study of physical and mechanical properties of cellulose acetate etrols // Bulletin of the Technological University. – 2019. – T. 22. – pp. 28-32. (InRuss).

© **Neznaniv V.A.** – student of the Department of pulp and paper technology and polymer processing, Ural State Forestry Engineering University («USFEU»), e-mail: vladislav.neznanov19@gmail.com; **Tatarinov D.V.** – student of the Department of pulp and paper technology and polymer processing, USFEU, e-mail: tatarinova.das.v@mail.ru; **Shkuro A.E.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of pulp and paper technology and polymer processing, USFEU, e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru; **V.V. Glukhikh** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of pulp and paper technology and polymer processing, USFEU, e-mail: gluhihvv@m.usfeu.ru; **Shishlov O.F.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of pulp and paper technology and polymer processing, USFEU, e-mail: o.shishlov@ucp.ru; **Kulazhenko Y.M.** – Post-graduate student of the Department of pulp and paper technology and polymer processing, USFEU, e-mail: kulazhenkoyuliya@mail.ru.

УДК 579.66

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИГИДРОКСИАЛКАНОАТОВ

А.Х. Сафиуллина, Г.Ф. Илалова, Р.А. Халитов, В.И. Петров

Синтетические полимерные материалы стали неотъемлемой частью современной жизни, однако применение их привело к глобальной экологической проблеме. Данные материалы производятся из невозобновляемых ресурсов, поэтому накопление их приводит к загрязнению окружающей среды. По этим причинам, исследователи придают все большее значение разработке экологически чистых материалов, получаемых из возобновляемого сырья - биомассы растений и продуктов микробиологического синтеза с получением биополимеров и биопластиков. В качестве заменителей пластика в настоящее время тестируются крахмал, целлюлоза, полимеры молочной и гликолевой кислот, а также полигидроксиалканоаты (ПГА). Для получения ПГА возможно привлечение разнообразных субстратов (углекислого газа и водорода, сахаров, спиртов, органических кислот, отходов спиртовой, сахарной, гидролизной промышленности, производства оливкового и пальмового масла). В связи с этим активно рассматриваются закономерности и продуктивность биосинтеза ПГА известными организмами с привлечением новых субстратов, ведется поиск новых природных штаммов-продуцентов.

Ключевые слова: древесина, гидролиз, вакуумирование, сушка, ферментация, сахара, биополимеры, полигидроксиалканоаты, композит, биологическое разложение, биосовместимость.

Введение

Широкое использование неразрушаемых естественным путем нефтехимических пластмасс создает проблему их утилизации, тем самым, увеличивая опасные воздействия на окружающую среду. Поэтому, в настоящее время существует потребность в биоразлагаемых материалах для смягчения последствий воздействия синтетики на экологию. Одним из таких материалов являются полигидроксиалканоаты (ПГА) - семейство полиэфиров, которые естественным образом синтезируются микроорганизмами. Образующиеся при этом полимеры позволяют создавать материалы с чрезвычайно различными характеристиками в диапазоне от твердых до исключительно эластичных. Они могут быть термопластиками или эластомерами, иметь температуру плавления от 40 до 180°C, что позволяет изготавливать из них пленки, волокна, клеи, покрытия, формованные и прочие изделия. Среди вырабатываемых из возобновляемых ресурсов никакое другое кроме ПГА семейство полимеров не имеет столь широкого спектра свойств, которые могут в целом ряде случаев даже превосходить эксплуатационные характеристики, достигаемые при использовании обычных полимеров.

Главными свойствами полигидроксиалканоатов являются биосовместимость и биоразлагаемость. Биоразложение представляет собой вызываемый деятельностью микроорганизмов процесс изменений химического состава вещества, в результате которого образуются натуральные конечные продукты метаболизма. ПГА разлагаются микроорганизмами в активной микробиологической среде (то есть, в почве, пресной воде, морской воде, компосте и т.д.) даже в анаэробных условиях, но устойчивы в чистой воде. Они также биосовместимы. Это означает, что они не токсичны и не вызывают ни одной из известных аллергических реакций. При наличии таких свойств ПГА представляют интерес для вновь формирующейся отрасли биополимерного инжиниринга.

Мономерное строение ПГА зависит от строения боковых групп в полимерной цепи, а также от расстояния между эфирными группами в молекуле. Таким образом, в зависимости от количества атомов углерода в мономерных звеньях, ПГА можно разделить на три группы: короткоцепочечные (ПГА-сцл, содержат 3-5 атомов углерода), среднецепочечные (ПГА-мцл, 6-15 углеродных атомов) и длинноцепочечные (ПГА-лцл, содержат более 15 атомов углерода). Многие бактерии могут одновременно синтезировать ПГА-сцл и ПГА-мцл, то есть являются гетерогенными.

ПГА, как уже было отмечено ранее, по ряду физико-химических свойств сходны с широко применяемыми и выпускаемыми в огромных количествах и не разрушаемыми в природной среде синтетическими полимерами типа полипропилена. Линейная структура молекул ПГА придает им свойство термопластичности и изменения прочности. При нагревании молекулярные цепи в ПГА легко сдвигаются относительно друг друга, в результате этого материал размягчается и приобретает текучесть. Данное технологическое свойство имеет большую коммерческую ценность, так как позволяет с использованием различных методов получать из этих полимеров разнообразные изделия.

К настоящему моменту описано свыше 100 различных ПГА, однако пока реально получаемые и исследуемые ПГА – это гомогенный полигидроксibuтират и сополимеры гидроксibuтирата и гидроксивалерата (ПГБ/ПГВ). Эти полиэферы при высоком уровне биосовместимости распадаются в организме и окружающей среде на безвредные фрагменты, метаболизируемые до воды и углекислого газа, а в некоторых случаях являются естественными метаболитами организма.

По физическим свойствам ПГБ близок к полипропилену. Однако чистый ПГБ характеризуется низким растяжением на разрыв, а также более высокой температурой стеклования, чем полипропилен. Как и все полигидроксиалканоаты он устойчив к воздействию УФ излучения, но малоустойчив к растворителям, кислотам и щелочам. ПГБ нерастворим в воде и относительно устойчив к гидролитическому разложению, это отличает полигидроксibuтират, как и прочие ПГА, от других биоразрушаемых пластиков, используемых в настоящее время. ПГБ подвергается растворению хлороформом и другими хлорпроизводными углеводов.

У полигидроксibuтирата, аналогично многим полимерным материалам, температура, при которой происходит его деформация, ниже температуры кипения (температурной деградаци), поэтому газовое состояние в полимерах не реализуется и основным видом фазового равновесия в них является конденсированное состояние – кристаллическое, стеклообразное, вязко-текучее и жидкое.

Помимо ПГБ, микроорганизмы способны синтезировать гетерополимерные ПГА — сополимеры гидроксibuтирата и гидроксивалерата, гидроксibuтирата и гидроксигексаноата, гидроксibuтирата и гидроксигептаноата и другие, а также трех-, четырех- и более компонентные полимеры.

Гетерополигидроксibuтиратвалерат (ПГБВ) – наиболее известный гетеро-полимерный ПГА, являющийся продуктом сополимеризации 3-оксимасляной и 3-оксивалериановой кислот. В зависимости от соотношения мономеров в полимере и их природы, свойства полимерных материалов изменяются, в т.ч. механическая прочность, температура плавления, биоградируемость.

Выявлено, что ПГА различного химического состава обладают различной структурой и базовыми физико-химическими свойствами, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства ПГА и синтетических полимеров

Свойство	ПГБ	ПГБВ	ПП	ПЭТ
Температура плавления, °С	180	145	176	267
Степень кристалличности	60-80	50-60	50-70	30-50
Модуль изгиба, ГПа	3,5	1,2	1,7	2,9
Растяжение на разрыв МПа	8	50	400	100
Предел прочности на разрыв	40	32	38	70
газопроницаемость	45	60	1700	70

Тем не менее, стоит отметить, что в настоящее время массовое применение биоразрушаемых полимеров сдерживается их относительно высокой ценой, которая в большей степени зависит от исходного сырья по сравнению с синтетическими полимерами, получаемыми из нефти. Поэтому кардинальное направление исследований, которые определяют план промышленного производства биополимеров данного класса на сегодняшний день связано с возможностями расширения сырьевой базы.

Анализ исследований сырьевой базы для производства ПГА

Полигидроксисалканоаты (ПГА) могут быть получены из различных субстратов, среди которых встречаются отдельные соединения (диоксид углерода и водород, сахара, спирты, органические кислоты); отходы алкогольной, сахарной и гидролизной промышленности, а также производства оливкового и пальмового масла. Данные исследования отражены в работах [1, 2]. Помимо этого, используются и нетрадиционные субстраты, в том числе токсичные. Обнаружено, что ПГА могут быть синтезированы из плохо растворимого и токсичного октана и октаноата, бензоата натрия, фенола и метакриловой кислоты [3, 4, 5].

Способность ПГА к разложению в биологических средах до безвредных продуктов является одним из главных преимуществ, отличающих этот класс соединений от небiorазрушаемых пластиков, тем самым сохраняя и коммерческий интерес. В начале 1990-х годов, несмотря на значительно высокие затраты на производство, немецкая компания Wella начала использовать ПГА в качестве упаковочного материала для некоторых своих средств по уходу за волосами.

Другим стимулом для получения новых полимеров является возможность биосинтеза полимеров микроорганизмами из дешевого возобновляемого сырья. В течение последних нескольких лет множество исследований было посвящено разработке процессов производства ПГА на основе промышленных побочных продуктов и отходов, таких как сельскохозяйственное сырье, отработанные растительные масла или сточные воды. Использование недорогих источников углерода в виде отходов позволяет снизить стоимость производства ПГА и повысить их устойчивость [6, 7].

Установлено, что хемоавтотрофная водородоокисляющая бактерия *Ralstonia eutropha* синтезирует высокомолекулярные ПГА различной структуры в различных количествах на различных субстратах. Возможность синтеза данной бактерии на водороде и углекислом газе, то есть без использования дорогостоящих органических сред, делает эту бактерию перспективным коммерческим производителем ПГА. Более того, поскольку некоторые виды водородоокисляющих бактерий устойчивы к воздействию окиси углерода, крупномасштабное производство ПГА может быть основано на промышленных источниках водорода - водородсодержащих продуктах конверсии природного газа, угля и других природных углеродсодержащих соединений, включая промышленные отходы (древесные отходы, лигнин и др.). Примечательным фактом является то, что очень немногие исследовательские группы

занимаются изучением синтеза полигидроксикарбоновых кислот из водорода. Эти команды работают в Японии [8] и в России, в Институте биофизики СО РАН. Исследователи из Института биофизики СО РАН изучали накопление ПГА в клетках водородоокисляющей бактерии *Ralstonia eutropha* [9, 10] и нового вида - аэробной карбоксидобактерии *Seliberia carboxydohydrogena* [11].

Компаниями, которые активно разрабатывают и успешно продают биоразлагаемые полимеры, являются Monsanto, Nodax, Metabolix Inc., Tephra, Procter & Gamble, Berlin Packaging Corp., Bioscience Ltd., BioVentures Alberta Inc. и Merck. Однако стоит отметить, что данные компании не пользуются популярностью на российском рынке, ввиду высокой себестоимости продукции.

Сферы применения ПГА очень разнообразны: из них возможно получение гибких пленок различной толщины, в том числе полупроницаемых мембран, нитей, нетканых материалов, различных полых форм (бутылки, контейнеры, коробки и пр.), а также гелей и клеев. Совокупность свойств, характерных для ПГА, делает их перспективными для применения в различных сферах – медицине, фармакологии, пищевой и косметической промышленности, сельском и коммунальном хозяйстве, радиоэлектронике и других сферах.

Удовлетворение потребностей различных сфер применения биополимеров требует разработки и совершенствования методов их получения [12]. В связи с этим активно рассматриваются закономерности и продуктивность биосинтеза ПГА известными организмами с привлечением новых субстратов, а также ведется поиск новых природных штаммов-продуцентов, что положительно сказывается на эффективности технологического процесса биосинтезируемых полимеров. Таким образом, является фундаментальной задачей исследование влияния штамма – продуцента и условий биосинтеза на молекулярную и кристаллическую структуру, а также свойства этих полимеров, создание на их основе композиционных материалов [13-15].

Практически неисчерпаемым источником сырья для крупнотоннажного получения ПГА являются растительные биомассы, образуемые в огромных количествах ежегодно. Отходы различных сельскохозяйственных культур, содержащие полисахариды различной структуры и состава, могут быть гидролизваны с получением спектра водорастворимых сахаров.

Гидролизная промышленность объединяет целый ряд производств, основу технологии которых составляет гидролитическая деструкция растительных материалов [16, 17]. Этот процесс осуществляется путем каталитического превращения природных полисахаридов древесины (целлюлоза и гемицеллюлоза) в моносахариды, которые используются в дальнейшем для получения целого ряда высокоценных продуктов [18-20]. Содержание полисахаридов в растительных материалах достигает 55-75 %.

В зависимости от вида выпускаемой продукции гидролизное производство подразделяется на такие профили, как: спирто-дрожжевое, дрожжевое, фурфурольно-дрожжевое и ксилитно-дрожжевое. Гидролизное производство спирто-дрожжевого профиля перерабатывает в основном древесину хвойных пород, поскольку здесь образуется больше гексозных сахаров, сбраживающихся спиртообразующими штаммами дрожжей на этиловый спирт. Для гидролизного производства дрожжевого профиля соотношение пентозных и гексозных сахаров не имеет большого значения, так как штаммы дрожжей усваивают все сахара. На производстве данного типа возможно использование любого вида древесины и сельхозотходов. На производствах фурфурольно-дрожжевого и ксилитно-дрожжевого профилей используется пентозансодержащее сырье: лиственная древесина и сельхозотходы.

Большинство существующих гидролизных предприятий - это производства спирто-дрожжевого профиля, на которых из гексозных сахаров получают этиловый спирт, а из пентозных – кормовые дрожжи. Растительное сырье на производстве этого типа, подаваемое в гидролизные аппараты, подвергается перколяционному гидролизу в присутствии разбавленной серной кислоты. Одним из недостатков данного процесса является активное разрушение образовавшихся моносахаридов до целого ряда карбоновых кислот и, как следствие этого, снижение выхода до 25 % при теоретическом выходе 65-70 %. В этой связи целесообразно использовать не только сахара, выделенные в процессе гидролиза, но и твердый остаток.

Таким образом перспективным направлением исследований является разработка ПГА из продуктов гидролиза древесины, а также комплексная технология получения композиционного материала на основе полигидроксикарбоновой кислоты и высушенного твердого остатка после процесса гидролиза древесины.

Заключение

Актуальность применения биоразлагаемых ПГА как альтернативы неразрушаемым синтетическим пластикам очевидна, так как масштабы производства последних превысили 350 млн тонн в год, что создает глобальную экологическую проблему. Анализ публикаций ранее проведенных исследований свидетельствует о несомненной перспективности использования ПГА в качестве биополимера. Вместе с тем, увеличение областей применения ПГА сдерживаются их высокой стоимостью, в связи с чем поиск и привлечение доступных, дешевых субстратов – одно из главных направлений биотехнологии этих ценных макромолекул. Среди перспективных субстратов для производства ПГА могут быть рассмотрены сахара, полученные в результате гидролиза. Для получения кислотных и ферментативных гидролизатов используются различные виды лигноцеллюлозосодержащего сырья: прессованный жом сахарной свеклы, солома пшеницы, опил низкосортной древесины. Однако при проведении ферментативного гидролиза лигноцеллюлозных материалов в их естественном виде выход сахаров достигает порядка 25 % от теоретически возможного. При этом установлено, что выход сахаров при проведении ферментативного гидролиза древесины имеет наименьшее значение среди всех лигноцеллюлозных материалов. Таким образом рационально использовать не только сахара, выделенные в процессе гидролиза, но и твердый остаток. Это позволит в дальнейшем создать лигнонаполненный композиционный материал, где в качестве связующего будет использоваться ПГА, полученный из жидкой фракции процесса гидролиза.

Литература

1. Lee S.Y. Poly (3-hydroxyalkanoate) production from xylose by recombinant *E. coli*. *Bioprocess. Engin.* – 1998. 18: 397-399.
2. Sugimoto T., Tsuge T., Tanaka K., Ishizaki A. [Control of acetic acid concentration by pH -stat continuous substrate feeding in heterotrophic culture phase of two-stage cultivation of *Alcaligenes eutrophus* for production of P(3HB) from CO₂, H₂, and O₂ under non-explosive conditions]// *Biotechnol. Bioengin.* – 1999 – 62: pp. 625-631.
3. Lee I.Y., Kim C.H., Yeon B.K., Hong W.K., Vhoi E.S., Rhee S.K., Park Y.H., Sung D.H., Baek W.H. [High production of D-β-hydroxybutyric acid from methacrylic acid by *Candida rugosa* and its mutant. *Bioprocess Engin.*]. – 1997. 16: pp. 247-252.
4. Galyavetdinov N.R., Khasanshin R.R., Safin R.R., Safin R.G., Razumov E.Y. [The usage of wood wastes in the manufacture of composite materials]// 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 – 2015 – Sofia. – pp. – 779-786.
5. Durner R., Witholt B. Egli T. [[Accumulation of poly[(R)-3-hydroxyalkanoates] in *Pseudomonas oleovorans* during growth with octanoate in continuous culture at different dilution rates]]. *Appl. Environ. Microbiol.* – 2000. 66: pp. 3408-3422.
6. Iftikhar, A.; Nazia, J. Enhanced [Biosynthesis of Poly(3-Hydroxybutyrate) from Potato Starch by *Bacillus cereus* Strain 64-Insina Laboratory-Scale Fermenter]// *Preparative Biochemistry and Biotechnology* 2014 – 44, pp. 822–833.
7. Narodoslawsky, M.; Shazad, H. S. K.; Kollmann, R. [LCA of PHA Production-Identifying the Ecological Potential of Bio-Plastic]. *Chem. Bio. Chem. Eng. Q.* – 2015 – 29 – pp. 299–305. DOI:10.15255/CABEQ.2014.2262.
8. Ishizaki A., Tanaka K., Taga N. [Microbial production of poly-D-3-hydroxybutyrate from CO₂]. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2001 – 57 – pp. 6-12.
9. Волова Т.Г., Калачева Г.С., Константинова В.М., Пузырь А.П. Влияние условий роста на накопление полигидроксibuтирата водными бактериями // *Прикладная биохимия и микробиология* – 1992. 28: 221-232.
10. Волова, Т.Г., Беляев О.Г., Гительзон И.И., Калачева Г.С., Луковенко С.Г., Плотников В.Ф. Получение и исследование микробных гетерополимерных полиоксiалканоатов // *Докл. РАН.* -1996, а.-Т. 346 – С. 558-561.
11. Волова Т. Г., Калачева Г. С., Константинова В. М. Накопление полиоксibuтирата аэробной СО – окисляющей карбоксидобактерией *Seliberia* // *Микробиология.* – 1994 б. – Т. 63. – С. 211-216.
12. Талипова Г.А., Галяветдинов Н.Р. Разработка биоразлагаемых композиционных материалов из полимера и растительного наполнителя // *Актуальные проблемы биологии и экологии. Материалы*

международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 235-240.

13. Галяветдинов Н.Р., Сабирова Г.А., Сафин Р.Р., Галиханов М.Ф. Исследование биоразлагаемых древесно-наполненных композиционных материалов на основе полилактида // Деревообрабатывающая промышленность. – 2019. № 3. – С. 61-68.

14. Сабирова Г.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Производство композиционных материалов на основе биоразлагаемых компонентов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2019. № 55. – С.181-184.

15. Сафиуллина А.Х., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. Технология предварительной обработки древесного наполнителя озоном в производстве композиционных материалов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. № 57. – С. 60-63.

16. Илалова Г.Ф., Саерова К.В., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Сафиуллина А.Х. Исследование высокотемпературного гидролиза соснового опила сернистой кислотой с целью увеличения выхода редуцирующих веществ // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. № 3. – С. 71-80.

17. Саерова К.В., Илалова Г.Ф., Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Сафиуллина А.Х. Высокотемпературный гидролиз соснового опила сернистой кислотой с целью выявления концентрации редуцирующих веществ // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. № 57. – С. 54-59.

18. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Галяветдинов Н.Р., Иманаев Р.М. Исследование совмещенной сушки-пропитки массивных капиллярно-пористых коллоидных материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. № 6. С.78.

19. Белякова Е.А., Сафин Р.Р., Бодылевская Т.А. Разработка методики классификации термомодифицированной древесины с помощью цветовой гаммы // Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. № 1. – С. 30-34.

20. Разумов Е.Ю., Белякова Е.А., Сафин Р.Р. Математическая модель процесса термомодифицирования древесины труднопропитываемых пород жидкости // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. № 16. С.233-239.

© Сафиуллина А.Х. – старший преподаватель кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: ShayaAlbina@mail.ru.; Илалова Г.Ф. – аспирант кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: achtung.guzik@mail.ru; Халитов Р.А. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Оборудования химических заводов», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: halitovra@mail.ru; Петров В.И. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Оборудования химических заводов» ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: oxz1@rambler.ru.

UDC 579.66

CURRENT PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE USE OF POLYHYDROXYALKANOATES

A.Kh. Safiullina, G.F. Ilalova, R.A. Khalitov, V.I. Petrov

Synthetic polymer materials have become an integral part of modern life, but their use has led to a global environmental problem. These materials are produced from non-renewable resources, so their accumulation leads to environmental pollution. For these reasons, researchers attach increasing importance to the development of environmentally friendly materials derived from renewable raw materials - plant biomass and products of microbiological synthesis to produce biopolymers and bioplastics. Starch, cellulose, polymers of lactic and glycolic acids, as well as polyhydroxyalkanoates (PHA) are currently being tested as substitutes for plastics. To obtain PHA, it is possible to attract a variety of substrates (carbon dioxide and hydrogen, sugars, alcohols, organic acids, waste from the alcohol, sugar, hydrolysis industry, olive and palm oil production). In this regard, the regularities and productivity of PHA biosynthesis by known organisms with the involvement of new substrates are actively considered, and new natural strains-producers are being searched for.

Keywords: wood, hydrolysis, vacuuming, drying, fermentation, sugars, biopolymers, polyhydroxyalkanoates, composite, biodegradation, biocompatibility.

References

1. Lee S.Y. Poly (3-hydroxyalkanoate) production from xylose by recombinant E. coli. Bioprocess. Engin.

- 1. Lee S.Y. Poly (3-hydroxyalkanoate) production from xylose by recombinant *E. coli*. *Bioprocess. Engin.* – 1998. 18: 397-399.
2. Sugimoto T., Tsuge T., Tanaka K., Ishizaki A. [Control of acetic acid concentration by pH-stat continuous substrate feeding in heterotrophic culture phase of two-stage cultivation of *Alcaligenes eutrophus* for production of P(3HB) from CO₂, H₂, and O₂ under non-explosive conditions]// *Biotechnol. Bioengin.* – 1999 – 62: pp. 625-631.
3. Lee I.Y., Kim C.H., Yeon B.K., Hong W.K., Vhoi E.S., Rhee S.K., Park Y.H., Sung D.H., Baek W.H. [High production of D-β-hydroxybutyric acid from methacrylic acid by *Candida rugosa* and its mutant. *Bioprocess Engin.*]. – 1997. 16:pp. 247-252.
4. Galyavetdinov N.R., Khasanshin R.R., Safin R.R., Safin R.G., Razumov E.Y. [The usage of wood wastes in the manufacture of composite materials]// 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 – 2015 – Sofia. – pp. – 779-786.
5. Durner R., Witholt B., Egli T. [[Accumulation of poly[(R)-3-hydroxyalkanoates] in *Pseudomonas oleovorans* during growth with octanoate in continuous culture at different dilution rates]]. *Appl. Environ. Microbiol.* – 2000. 66: pp. 3408-3422.
6. Iftikhar, A.; Nazia, J. Enhanced [Biosynthesis of Poly(3-Hydroxybutyrate) from Potato Starch by *Bacillus cereus* Strain 64-Insina Laboratory-Scale Fermenter]// *Preparative Biochemistry and Biotechnology* 2014 – 44, pp. 822–833.
7. Narodoslawsky, M.; Shazad, H. S. K.; Kollmann, R. [LCA of PHA Production-Identifying the Ecological Potential of Bio-Plastic]. *Chem. Bio. Chem. Eng. Q.* – 2015 – 29 – pp. 299–305. DOI:10.15255/CABEQ.2014.2262.
8. Ishizaki A., Tanaka K., Taga N. [Microbial production of poly-D-3-hydroxybutyrate from CO₂]. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2001 – 57 – pp. 6-12.
9. Volova T.G., Kalacheva G.S., Konstantinova V.M., Puzyr A.P. [Effect of growth conditions on polyhydroxybutyrate accumulation by aquatic bacteria] // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied biochemistry and Microbiology] – 1992. 28:pp. 221-232. (InRuss.).
10. Volova. T.G., Belyayev O.G., Gitelzon I.I., Kalacheva G.S., Lukovenko S.G., Plotnikov V.F. [Obtaining and study of microbial heteropolymeric polyoxyalkylene] // *doklad RAN* [report of the Russian Academy of Sciences] -1996, a.-T. 346.-pp. 558-561. (InRuss.).
11. Volova T.G., Kalacheva G.S., Konstantinova V.M. [The accumulation of polyoxometalate aerobic CO – oxidizing carboxydobacteria *Seliberia*] // *Mikrobiologiya* [Microbiology] – 1994 6. – T. 63. – pp. 211–216. (InRuss.).
12. Talipova G.A., Galyavetdinov N.R. [Development of biodegradable composite materials made of polymer and vegetable filler] // *Aktualnyye problemy biologii i ekologii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of biology and ecology. Materials of the international scientific and practical conference] – 2019. – pp. 235-240. (InRuss.).
13. Galavetdinov N. R., Sabirova G. A., Safin R. R., M. F. Galikhanov. [Research of biodegradable wood-filled composite materials based on polylactide] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Wood industry] – 2019. № 3. – pp. 61-68. (InRuss.).
14. Sabirova G. A., Galavetdinov N. R., Safin R. R. [Production of composite materials based on biodegradable components] // *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex] – 2019. № 55. – pp.181-184. (InRuss.).
15. Safiullina A. Kh., Safin R. R., Mukhametzyanov Sh. R. [Technology of pretreatment of wood filler with ozone in the production of composite materials] // *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex] – 2020. № 57. – pp. 60-63. (InRuss.).
16. Ilalova G. F., Saerova K. V., Safin R. R., Mukhametzyanov sh. R., Safiullina A. H. [Investigation of high-temperature hydrolysis of pine sawdust with sulfurous acid in order to increase the yield of reducing substance] // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Wood industry] – 2020. № 3. – pp. 71-80. (InRuss.).
17. Saerova K. V., Ilalova G. F., Safin R. R., Mukhametzyanov sh. R., Safiullina A. H. [High-Temperature hydrolysis of pine sawdust with sulfurous acid to detect the concentration of reducing substances] // *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex] – 2020. № 57. – pp. 54-59. (InRuss.).
18. Safin R. R., Safin R. G., Galyautdinov N. R., Imayev R. M. [Study of the combined drying and impregnating of solid capillary-porous materials kolloidnyh] // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin

thermomodification wood with the help of colors] // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Wood industry] – 2013. № 1. – pp. 30-34. (InRuss.).

20. Razumov E.Yu., Belyakova EA, Safin R.R. [A mathematical model of the process of thermal modification of wood of hard-to-absorb liquids] // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Technological University] – 2011. – No. 16. – pp. 233-239. (InRuss.).

© **Safiullina A.Kh.** – Senior lecturer of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: ShayaAlbina@mail.ru; **Ialova G.F.** – Post-graduate student of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: achtung.guzik@mail.ru; **Khalitov R.A.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Environmental Protection, KNRTU, e-mail: halitovra@mail.ru; **Petrov V.I.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Chemical plant equipment, KNRTU, e-mail: oxz1@rambler.ru.

УДК 66.092-977

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ В УГОЛЬНЫЕ БРИКЕТЫ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, С.В. Китаев, Г.И. Игнатьева

Использование отходов в качестве вторичного сырья или топлива является неотъемлемой составляющей экономически эффективного развития предприятий лесопромышленного комплекса России. В большинстве случаев отходы лесной отрасли России утилизируются с применением процессов сжигания, так как это самый простой метод переработки, однако сжигание имеет малую эффективность. Поэтому задача по разработке эффективных технологий более глубокой переработки отходов лесной отрасли актуальна. Изучив современные методы переработки данных видов отходов, авторами был сделан вывод, что наиболее перспективным методом переработки является процесс кондуктивного пиролиза. В работе представлено описание технологии переработки отходов лесной отрасли в угольные брикеты высокой прочности без использования связующего вещества на основе процесса кондуктивного пиролиза. Технология направлена на решение проблемы утилизации отходов лесной отрасли, а также на увеличение выхода целевого продукта. Также в работе представлены результаты исследований основных физико-химических свойств полученных угольных брикетов и их сравнительный анализ.

Ключевые слова: кондуктивный пиролиз, угольные брикеты высокой прочности, каменный уголь, установка кондуктивного пиролиза, прочностные свойства угольных брикетов.

Введение

На предприятиях лесопромышленного комплекса (ЛПК) Российской Федерации ежегодно образуются 36000 тыс. куб. м древесных отходов, что составляет 33 % от объема используемого пиловочника [1]. Использование данного невостребованного сырья в производстве существенно сократит расходы лесных ресурсов за счет повышения общей глубины переработки древесины, снизит себестоимость производства изделий из дерева, улучшит экологическую обстановку в стране и уменьшит пожароопасность на складах предприятий. Древесные отходы в качестве вторичного сырья являются неотъемлемой составляющей экономически эффективного развития предприятий лесопромышленного комплекса Российской Федерации и отрасли в целом.

В настоящее время основными направлениями использования отходов лесной отрасли являются:

- переработка в технологическую щепу для производства целлюлозно-бумажной продукции;
- применение при производстве композиционных материалов в качестве древесных наполнителей

[2];

- тарное производство;
- изготовление изделий народного потребления;
- термохимическая переработка [3-6].

Термохимическая переработка позволяет обеспечить комплексную переработку невостребованного древесного сырья с умеренными капитальными затратами в энергию и различные полезные химические

продукты. Основные направления термохимической переработки биомассы: пиролиз, газификация и сжигание. В настоящее время в России основная масса древесных отходов утилизируются путем сжигания. Это самый простой метод переработки, в процессе которого продукты горения используют для получения горячей воды или пара для технологических нужд. При этом нужно отметить, что процесс сжигания имеет малую эффективность [7]. Анализируя вышесказанное можно сделать вывод о необходимости разработки технологий глубокой переработки отходов лесной отрасли и это направление имеет актуальный характер.

Методы и материалы

Процесс пиролиза представляет собой разложение древесины при ее нагревании в безвоздушном пространстве, с получением жидких, газообразных продуктов и твердого остатка – древесного угля. Современные технологии пиролиза древесного сырья по скорости нагрева классифицируются на следующие виды: быстрый и медленный (традиционный) пиролиз [8]. При рассмотрении традиционного пиролиза основным продуктом, на получение которого направлен процесс, является древесный уголь, при быстром пиролизе – пиролизная жидкость.

Древесный уголь является высокоуглеродистым материалом. Этот ценный продукт имеет широкое применение во многих отраслях промышленности, а также в быту [11]. Свойства угля зависят от породы древесины и конечной температуры пиролиза. Для ряда отраслей промышленности древесный уголь должен соответствовать требованиям и нормам, указанным в технических условиях на древесный уголь [12]. Однако, при производстве древесного угля с использованием в качестве сырья отходов ЛПК, производитель сталкивается с такими проблемами как относительно низкая плотность древесного угля, которая в свою очередь является причиной низкой удельной теплотворной способности угля на единицу объема, а также повышенная хрупкость, которая ограничивает область его экономически эффективной транспортировки. Хотя теплотворная способность единицы веса угля и угольных брикетов почти одинакова (около 7000 ккал/кг [13]), теплотворная способность единицы объема брикетов в 2-4 раза больше.

Эти проблемы решаются организацией производства древесно-угольных брикетов (ДУБ), которые имеют следующие преимущества:

- сырьем для производства древесно-угольных брикетов могут служить древесные отходы независимо от породного состава, а также мелкодисперсный уголь;
- повышенная механическая прочность и высокая плотность древесно-угольных брикетов;
- возможность регулировать потребительские свойства древесно-угольных брикетов в широких пределах.

Одним из перспективных способов переработки древесных отходов среди процессов термохимической конверсии является кондуктивный пиролиз. Данный метод термического разложения имеет низкие инвестиционные затраты и высокую энергетическую эффективность по сравнению с другими процессами переработки, особенно при мелкомасштабном производстве. В процессе кондуктивного пиролиза древесных отходов доминирующим продуктом является угольный остаток, обладающий высокими прочностными свойствами без использования связующего. Угольные брикеты, полученные по технологии кондуктивного пиролиза, могут стать экологически чистой заменой каменному углю.

На рис.1 изображена схема технологии переработки отходов лесной отрасли в угольные брикеты кондуктивным пиролизом [14], которая состоит из нескольких зон:

- зона подготовки-приемки сырья 1;
- зона подготовки теплоносителя 2;
- зона сушки растительного сырья 3;
- зона кондуктивного пиролиза 4;
- зона охлаждения готового продукта 5.

Технология переработки древесных отходов в угольные брикеты кондуктивным пиролизом заключается в следующем: измельченное до размеров 20-25 мм растительное сырье из приемного бункера 6 шнековым транспортером 18 через секторные питатели 8 подается на сушку. Сушка подготовленного сырья осуществляется кондуктивным способом. Для сушки используются последовательно установленные шнековые транспортеры 9 и 10. Обогрев шнековых транспортеров производится отработанными топочными газами 20. Температура сушильного агента в шнековых

транспортерах 9,10 составляет 180 – 250 °С. После сушки часть отработанных топочных газов направляется в пространство между секторными питателями 8 для обеспечения герметичности подачи сырья в зону сушки 3, а остальная часть отработанных топочных газов 21 сбрасывается в атмосферу. Высушенное и подогретое сырье после сушки накапливается в бункере-накопителе 11. Часть подготовленного сырья из приемного бункера 6 направляется в зону подготовки теплоносителя, которая выполнена в виде теплогенератора, снабженного топочной камерой 7. Теплогенератор может работать как на газообразном (парогазовая смесь 23, выделяющаяся при сушке растительного сырья и пиролизные газы 24, образующиеся при термическом разложении сырья), так и на твердом топливе (часть сырья, поступающая из зоны подготовки-приемки сырья 1). Поток топочных газов 22 из теплогенератора направляется в реактор кондуктивного пиролиза 14, который выполнен в виде трубы, имеющей сужение по диаметру. Высушенное и подогретое сырье из бункера-накопителя 11 поступает в реактор, перемещение сырья в реакторе осуществляется гидроцилиндром 12 с плунжером 13. Температура реактора кондуктивного пиролиза составляет 450 – 470 °С. Данная температура позволяет достичь полного разложения растительного сырья. Рабочее давление в реакторе кондуктивного пиролиза составляет 50 – 60 кг/см² и создается гидроцилиндром 12 с плунжером 13. Готовые брикеты удаляются транспортером револьверного типа 15. Угольные брикеты охлаждаются до температуры 20 -30 °С и направляются для дальнейшего использования.

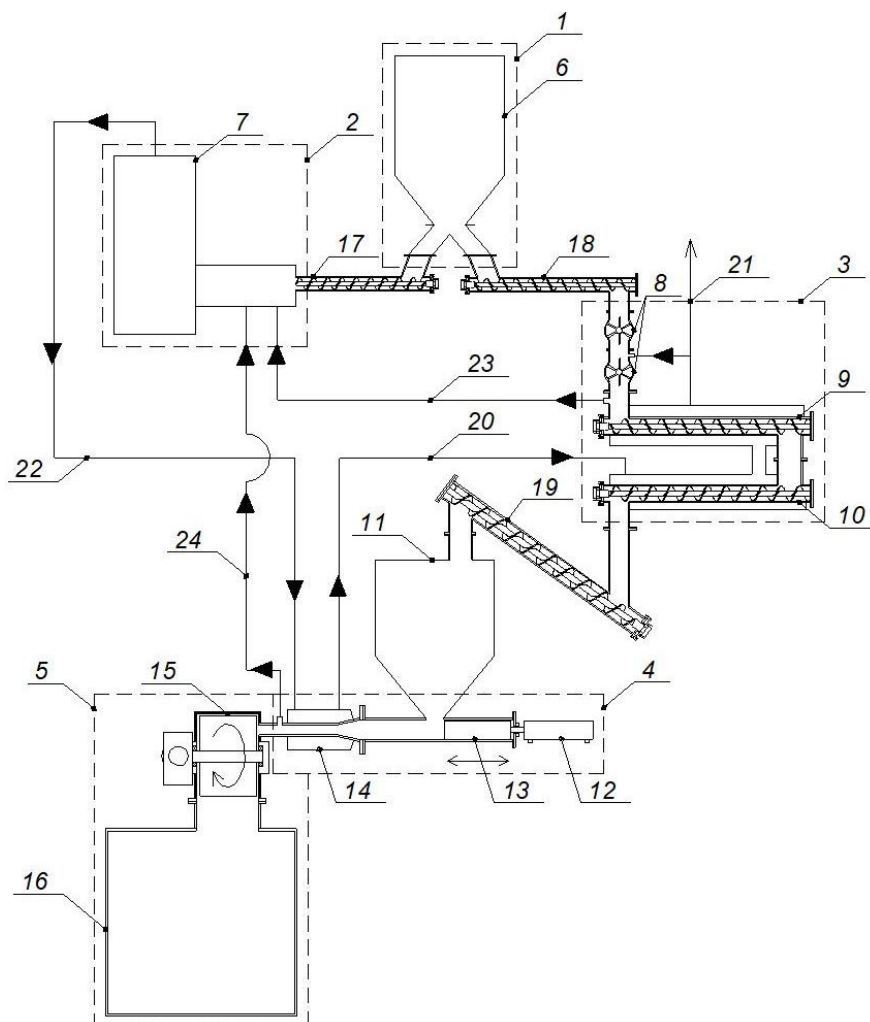


Рис. 1. Схема установки для переработки древесных отходов в угольные брикеты кондуктивным пиролизом: 1 – зона подготовки-приемки сырья; 2 – зона подготовки теплоносителя; 3 – зона сушки растительного сырья; 4 – зона пиролиза растительного сырья; 5 – зона охлаждения готового продукта; 6 – приемный бункер сырья; 7 – топочная камера; 8 – секторные питатели; 9, 10 – обогреваемые шнековые транспортеры; 11 – бункер-накопитель; 12 – гидроцилиндр; 13 – плунжер; 14 – реактор пиролиза; 15 – транспортер револьверного типа; 16 – приемный бункер готового продукта; 17, 18, 19 – шнековые транспортеры; 22 – поток топочных газов; 20, 21 – потоки отработанных топочных газов; 23 – поток парогазовой смеси; 24 – поток пиролизных газов

По представленной технологии переработки древесных отходов в угольные брикеты кондуктивным пиролизом были получены образцы угольных брикетов из древесины и коры сосны и осины. Были проведены исследования в соответствии с ГОСТ 10742–71 – по определению прочности на сжатие и сопротивление брикета удару при сбрасывании, ГОСТ 33625-2015 – по определению массовой доли золы, массовой доли летучих веществ, ГОСТ 147-2013 – по определению теплоты сгорания. Так же получены данные по массовому выходу образцов и их плотности.

Результаты

Получены результаты выхода угольных брикетов из отходов древесины хвойных и лиственных пород, а также результаты исследований показателей плотности и прочности на сжатие угольных брикетов (табл. 1) при использовании технологии кондуктивного пиролиза.

Таблица 1 – Основные характеристики угольных брикетов

Вид сырья	Температура пиролиза, °С	Давление прессования, кг/см ²	Выход угольных брикетов, %	Наименование показателей	
				Плотность, г/см ³	Прочность на сжатие, кг/см ²
Древесина сосны	430-450	50	48	0,95	301
Кора сосны	430-450	50	60	1,1	438
Древесины осины	430-450	50	45	0,9	210
Кора осины	430-450	50	46	1,08	500

Как показывают результаты исследований высокий выход угольных брикетов (до 60 %) достигается при переработке коры сосны. Также угольные брикеты из древесины коры показывают плотность более 1 г/см³ и высокую механическую прочность. Данные факты говорят об эффективности технологии кондуктивного пиролиза при переработке отходов лесной отрасли.

На рис. 2 представлены показатели зольности брикетов. Максимальные показатели зольности имеют образцы угольных брикетов, полученные из коры осины – 4,9%, а минимальные показатели имеют угольные брикеты, полученные из древесины сосны – 0,92%. Высокая зольность брикетов, полученных из древесной коры, объясняется тем что сырье для их получения имеет повышенные показатели зольности. Сравнивая показатели зольности угольных брикетов, полученных из коры сосны (1,6%) и коры осины (4,9%) необходимо обратить внимание на два фактора: низкий выход угольных брикетов из коры осины в сравнении с корой сосны и первоначальная повышенная зольность коры осины. Данные факторы приводят к разнице в зольности в 3 раза. Проведенные исследования так же показали, что предварительная промывка перерабатываемого сырья позволяет снижать показатели зольности на 20 - 30%.

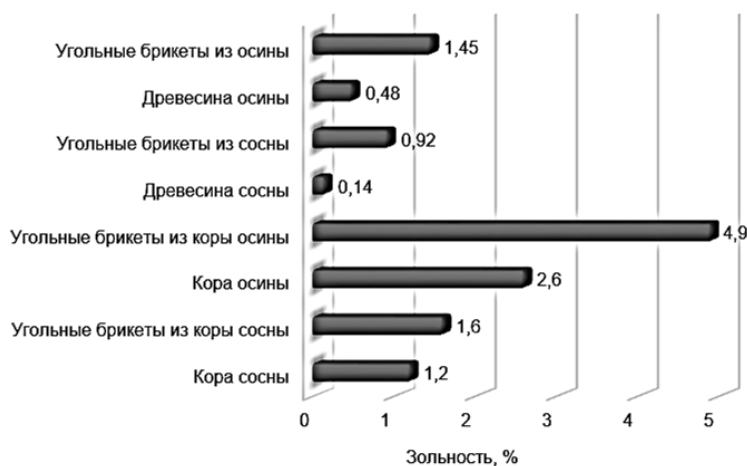


Рис. 2. Показатели зольности перерабатываемого сырья и полученных угольных брикетов

Были получены данные по теплоте сгорания перерабатываемого сырья и полученных угольных брикетов (рис. 3). Наибольшие показатели по теплоте сгорания имеют угольные брикеты, полученные из древесной части и коры сосны, и составляют 29,9 МДж/кг. Показатель теплоты сгорания угольных брикетов из коры осины ниже показателя теплоты сгорания из коры сосны на 3 МДж/кг, что объясняется высокой зольностью коры осины. Показатели теплоты сгорания угольных брикетов в сравнении с перерабатываемым сырьем выше на 45 – 50 %.

В рамках проведенных исследований была составлена сравнительная оценка свойств угольных брикетов, полученных по разработанной технологии переработки древесных отходов в угольные брикеты кондуктивным пиролизом и природного коксового угля (рис. 4).

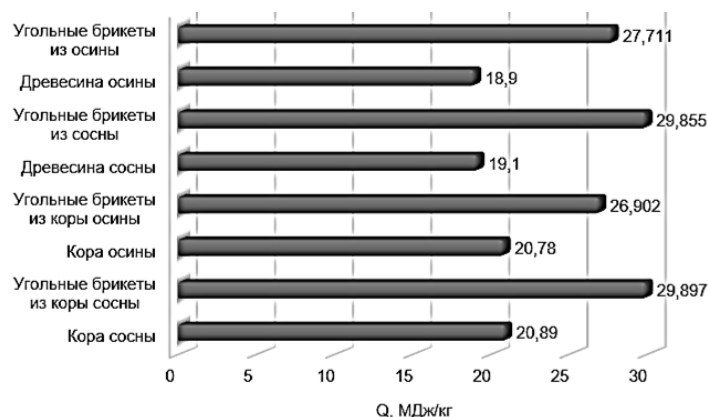


Рис. 3. Показатели теплоты сгорания перерабатываемого сырья и полученных угольных брикетов



а)



б)

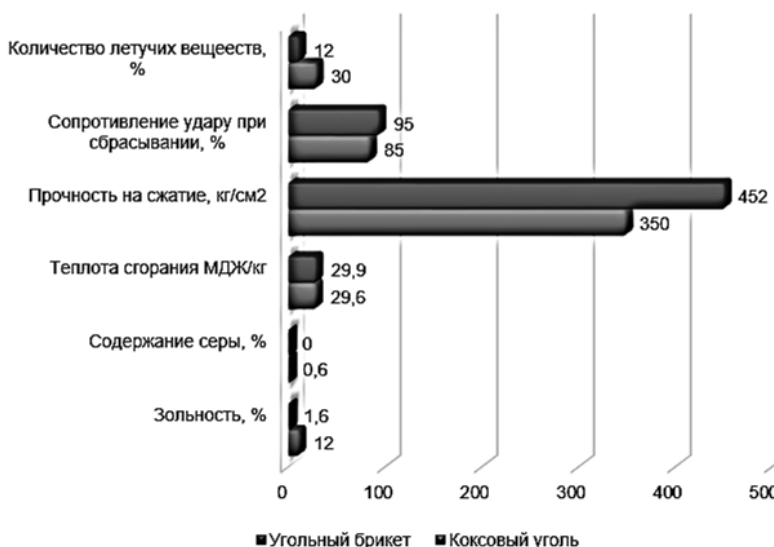


Рис. 4. Сравнение основных свойств полученных угольных брикетов (а) и коксового угля (б)

Сравнительная оценка показала, что угольные брикеты, полученные по технологии кондуктивного пиролиза, имеют лучшие показатели чем каменный уголь. Данное сравнение позволяет говорить, что угольные брикеты, полученные по разработанной технологии, могут стать экологически чистой заменой каменного угля.

Заключение

Разработанная технология переработки древесных отходов в угольные брикеты кондуктивным пиролизом позволяет достичь высокого выхода (до 60 %) продукта от исходной массы перерабатываемого сырья. Сравнительная оценка полученных угольных брикетов с каменным углем по составу, по прочности и по теплоте сгорания показала, что по данным свойствам полученные угольные брикеты имеют лучшие показатели.

Разработанная технология позволяет переработать отходы лесной отрасли в режиме безотходных технологий, так как в целом работает в замкнутом энергетическом режиме. Важным преимуществом технологии является, то что при получении угольных брикетов не используется связующее, что исключает дополнительные затраты на подготовку связующего и смешивание связующего с уплотняемым сырьем перед прессованием.

Литература

1. Колесникова А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук [Электронный ресурс]. 2013. № 33. Режим доступа – <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-drevesnyh-otходов-na-predpriyatiyah-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii> (дата обращения: 06.10.2020).
2. Хайруллина Э.Р. Усовершенствование технологии получения древесных плитных материалов на основе минеральных вяжущих веществ // Сб. матов II Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса». 2013. С. 69-70.
3. Тунцев Д.В., Касимов А.М., Хисматов Р.Г., Романчева И.С., Савельев А.С. Разработка комплексной технологии термохимической переработки древесных отходов // Деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 4. С. 50-55.
4. Тунцев Д.В., Хисматов Р.Г., Хайруллина М.Р., Савельев А.С., Романчева И.С. Современные направления переработки древесной биомассы // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-1 (13-1). С. 464-468.
5. Тимербаев Н.Ф., Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Китаев С.В. Технология и оборудования для электроэнергетического использования древесных отходов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 102-107.
6. Тунцев Д.В., Хисматов Р.Г., Хайруллина М.Р., Савельев А.С., Романчева И.С. Переработка низкокачественной древесины в уголь на установке "ПУ-10" // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-1 (13-1). С. 459-463.
7. Садрtdинов А.Р., Сафин Р.Г., Исмагилова Л.М., Галеев Т.Х., Мингалеева Г.Р. Тенденции образования и потенциал использования отходов растительного происхождения лесопромышленного и агропромышленного комплексов // Деревообрабатывающая промышленность. 2017. № 2. С. 8-17.
8. Тунцев Д.В., Китаев С.В., Сафин Р.Г., Хайруллина М.Р., Хузеев М.В. Переработка древесной коры в угольные брикеты высокой прочности // Деревообрабатывающая промышленность. 2019. № 4. С. 78-85.
9. Гильфанов М.Ф., Шаймуллин А.Т., Хайруллина М.Р., Забелкин С.А., Грачев А.Н., Башкиров В.Н. Исследование свойств древесного угля основных лесобразующих пород Республики Татарстан // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 21. С. 112-114.
10. Тимербаев Н.Ф., Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Китаев С.В. Технология и оборудования для электроэнергетического использования древесных отходов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 102-107.
11. Грачев А.Н., Сафин Р.Г., Таймаров М.А., Гильфанов К.Х., Тунцев Д.В. Исследование свойств жидкого продукта быстрого пиролиза отходов деревообработки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 11-12. С. 80-83.
12. ГОСТ 7657-84. Уголь древесный. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов. 2002. 9с.
13. Пономарев О.С., Гиндулин И.К., Юрьев Ю.Л. Брикетирование некондиционного древесного угля // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2012. № 2 (326). С. 103-105.
14. Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Сафин Р.Г., Китаев С.В., Хисматов Р.Г. Установка для переработки растительного сырья в угольные брикеты // Патент РФ № 2732834, 2020. Бюл. № 27.

© **Тунцев Д.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: tuncsev_d@mail.ru; **Хайруллина М.Р.** – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: khayrullina_mila@mail.ru; **Китаев С.В.** – инженер-исследователь кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kitaev-sv@gmt.com.ru; **Игнатьева Г.И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: ignatieva_pdm@mail.ru.

UDC 66.092-977

TECHNOLOGY OF PROCESSING WASTE OF THE FOREST INDUSTRY INTO COAL BRIQUETTES

D.V. Tuntsev, M.R. Khairullina, S.V. Kitaev, G.I. Ignatieva

The use of waste as a secondary raw material or fuel to compensate for production costs is an integral part of the cost-effective development of enterprises in the Russian timber industry. In most cases, waste from the Russian forest industry is disposed of using incineration processes, as this is the simplest method of processing, but incineration has little efficiency. Therefore, the task of developing more effective technologies of deep processing of timber industry waste has an actual character. Having studied modern methods of processing these types of waste, the authors concluded that the most promising method of processing is the pyrolysis process. The paper describes the technology for processing forest industry waste into high-strength coal briquettes without the use of a binder based on the process of conductive pyrolysis. The technology is aimed at solving the problem of waste disposal in the forest industry, as well as increasing the yield of the target product. The paper also presents the results of research on the main physical and chemical properties of the obtained coal briquettes and their comparative analysis.

Keywords: *conductive pyrolysis, high-strength coal briquettes, hard coal, installation of conductive pyrolysis, strength properties of coal briquettes.*

References

1. Kolesnikova A.V. [Analysis of the formation and use of wood waste at enterprises of the Russian timber industry] Aktual'nye voprosy ekonomicheskikh nauk [Elektronnyj resurs] [Actual issues of economic Sciences [Electronic resource]]. 2013. № 33. Access mode – <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-drevesnyh-otvodov-na-predpriyatiyah-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii> (accessed: 06.10.2020). (InRuss.).
2. Khairullina E.R. [Improvement of technology for obtaining wood slab materials based on mineral binders] Sb. matov II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa [Collection of materials of the II International scientific and technical conference «Current problems and prospects of development of the timber industry»]. 2013. pp. 69-70. (InRuss.).
3. Tuntsev D.V., Kasimov A.M., Khismatov R.G., Romancheva I.S., Savelyev A.S. [Development of integrated technologies for the thermochemical processing of waste wood] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2014. № 4. pp. 50-55.
4. Tuntsev D.V., Khismatov R.G., Khairullina M. R., Savelyev A.S., Romancheva I.S. [Modern directions of wood biomass processing] Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. 2015. Vol. 3. № 2-1 (13-1). pp. 464-468.
5. Timerbaev N.F., Tuntsev D.V., Khairullina M.R., Kitaev S.V. [Technology and equipment for electric power use of wood waste] Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki [Power engineering: research, equipment, technology]. 2017. Vol. 19. № 1-2. pp. 102-107.
6. Tuntsev D.V., Khismatov R.G., Khairullina M.R., Savelyev A.S., Romancheva I.S. [Processing of low-quality wood into coal at the PU-10 installation"] Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. 2015. Vol. 3. № 2-1 (13-1). pp. 459-463.
7. Sadrtidinov A.R., Safin R.G., Ismagilova L.M., Galeev T.Kh., Mingaleeva G.R. [Trends in the formation And potential use of waste of plant origin in forestry and agro-industrial complexes] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2017. № 2. pp. 8-17.
8. Tuntsev D.V., Kitaev S.V., Safin R.G., Khairullina M.R., Khuzeev M.V. [Processing of wood bark into high-strength coal briquettes] Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry]. 2019. № 4. pp. 78-85.
9. Gilfanov M.F., Shaimullin A.T., Khairullina M.R., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N. [Research of properties of charcoal of the main forest-forming breeds of the Republic of Tatarstan] Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan technological University]. 2013. Vol. 16. № 21.–pp.112-114.

10. Timerbaev N.F., Tuntsev D.V., Khairullina M.R., Kitaev S.V. [Technology and equipment for electric power use of wood waste] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology]. 2017. Vol. 19. № 1-2. pp. 102-107.
11. Grachev A.N., Safin R.G., Taimarov M.A., Gilfanov K.Kh., Tuntsev D.V. [Investigation of properties of a liquid product of rapid pyrolysis of woodworking waste] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology]. 2009. № 11-12. pp. 80-83.
12. GOST 7657-84 [Charcoal. Technical conditions] Moscow: IPK publishing house of standards. 2002. 9s.
13. Ponomarev O.S., Gindulin I.K., Yuryev Yu.L. [Briquetting of non-standard charcoal] *Izvestie vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)]. 2012. № 2 (326). pp. 103-105.
14. Tuntsev D. V., Khairullina M. R., Safin R. G., Kitaev S. V., Hismatov R. G. [Plant for processing vegetable raw materials into coal briquettes] RF patent № 2732834, 2020. Byul. № 27.

© **Tuntsev D.V.** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: tuncev_d@mail.ru; **Khayrullina M.R.** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Wood Materials Processing, (KNRTU), e-mail: khayrullina_mila@mail.ru; **Kitaev S.V.** – scientific engineer of the Department of Wood Materials Processing, (KNRTU), e-mail: kitaev-sv@gmt.com.ru; **Ignatieva G.I.** – Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Wood Materials Processing, (KNRTU), e-mail: gnatieva_pdm@mail.ru.

УДК 663.1

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ГИДРОЛИЗА ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Р.Т. Валеева, С.А. Понкратова, М.Ю. Шурбина, О.В. Ананьева, А.С. Понкратов

В работе проведен анализ проведенных экспериментальных работ по оптимизации процессов высокотемпературного гидролиза контрольного сырья целлюлозы и двух основных образующихся отходов получаемых на основе переработки пшеницы: пшеничной соломы и отрубей и смеси пшеничной соломы и отрубей в соотношении 1:1 минеральными серосодержащими кислотами при гидромодуле 1: 5,8 и варьировании технологических параметров: температуры в диапазоне 150°С - 190°С и концентрации кислот 1 – 4% масс. и с целью получения гидролизатов с максимальным содержанием редуцирующих веществ. Все процессы гидролиза проводились на лабораторной установке высокотемпературного гидролиза капсульного типа. Как следует из анализа полученных результатов, солома является трудно гидролизующим сырьем, причем конечная концентрация РВ в сухих веществах зависит от выбора гидролизующего агента. В то же время содержание РВ в сухом веществе гидролизатов отрубей практически идентично при использовании в процессе гидролиза серной и сернистой кислот. Это связано с наличием остаточного количества легко гидролизующего крахмала в отрубях. Кроме того, использование добавки отрубей к гидролизующей соломе позволяет снизить температуру процесса гидролиза, т.е. обеспечить энергосбережение в производстве гидролизатов. Поэтому для повышения эффективности процесса гидролиза и получения качественных гидролизатов целесообразно использовать добавки легко гидролизующих компонентов к соломе.

Ключевые слова: предварительная обработка, гидролиз, гидролизат пшеничная солома и отруби.

Введение

Исследование процессов деполимеризации полисахаридов целлюлозосодержащего сырья при приготовлении питательных сред, предназначенных к применению в биотехнологических производствах таких, как производство топливных спиртов и кормовых дрожжей, является актуальной задачей по ряду обстоятельств: мировая тенденция к замене ископаемых топлив продукцией переработки возобновляемых видов сырья, наличие недостаточно эффективно используемых отходов сельского хозяйства и лесо- деревоперерабатывающей промышленности в объемах, соответствующих

многотоннажному производству, необходимость защиты окружающей среды от многотоннажных отходов и возможность получения необходимых ценных продуктов из дешевых компонентов; возможность снижения энергоемкости продукции микробиологических производств.

Известно, что основная трудность преобразования лигноцеллюлозной биомассы в этанол второго поколения состоит в расщеплении структурно-химического комплекса биомассы. Биомасса состоит из полисахаридов - целлюлозы и гемицеллюлозы, которые гидролизуются до отдельных сахарных компонентов с последующим восстановлением этанола с помощью хорошо известных и разработанных технологий ферментации [1-3]. Учитывая, что сахара, необходимые для ферментации, получаются из целлюлозы, связанной с лигнином, требуется предварительная обработка биомассы для удаления и / или модификации матрицы лигнина и гемицеллюлозы. В отличие от крахмала, который является важным источником энергии для растений, целлюлоза играет в основном структурную роль, поскольку обеспечивает механическую прочность клеток растений гемицеллюлозой и лигнином. Природные целлюлозные материалы не обладают высокой реакционной способностью; поэтому для ферментационного осахаривания требуется большая поверхность целлюлозы и нарушенная структура микропленок целлюлозы. Лигнин также снижает реактивность природных субстратов. Целями предварительной обработки исходного сырья лигноцеллюлозы являются сохранение гемицеллюлозы, снижение образования ингибиторов и затрат энергии [1].

Для разработки ресурсосберегающих процессов переработки сырья в биологически усвояемые сахара с максимальным содержанием редуцирующих веществ более 2-3% необходимо определить оптимальные режимы процессов предварительной подготовки сырья и процессов гидролиза на основе экстремальных зависимостей выхода сахаров и энергозатрат от технологических параметров таких, как температура, концентрации реагентов. Необходимо подобрать гидролизующие агенты, минимизирующие образование побочных продуктов, повышенные концентрации которых ингибируют рост микроорганизмов и биосинтез целевых экзометаболитов, а также определить возможность и параметры процессов их рекуперации (например, проведение рекуперации сернистого газа в процессах гидролиза пшеничной соломы сернистой кислотой [4].

Методы предварительной обработки делятся на три отдельные категории, это физическая, химическая и биологическая обработка [5, 6].

Физический метод заключается в паровом взрыве без катализаторов, предварительной обработке горячей водой, механическом измельчении и облучении частицами с высокой энергией. Паровой взрыв является наиболее широко используемым методом из-за его низкой стоимости [7-9]. При данной предварительной обработке гидролиз гемицеллюлозы осуществляется с использованием пара и органических кислот [10]. Решающими факторами в отношении проведения парового взрыва являются продолжительность и температура процесса, размер частиц и влажность используемого сырья [11, 12]. Обычно температура составляет от 160°C до 270°C, время обработки колеблется от нескольких секунд до пары минут. Предварительная обработка горячей водой осуществляется водой в жидком состоянии при повышенных температурах [13-16] или паровая обработка в автоклаве [17]. Данный метод позволяет увеличить производительность обработки целлюлозы, экстракции сахаров и извлечения пентоз, но полученный предварительный гидролизат может содержать ингибитор ферментации сахаров [18].

Наиболее эффективным, однако, дорогим и энергоемким методом является механическое измельчение целлюлозосодержащего сырья. Биомассу можно измельчать различными способами измельчения с использованием различных видов мельниц: молотковые и шаровые мельницы коллоидные или вибромельницы [17, 19, 20], компрессионное измельчение [21, 22], дезинтеграторы и дробилки, диспергирование на вальцах [17]. Механическая обработка разрушает кристаллическую структуру целлюлозы, снижает уровень полимеризации, увеличивает поверхность биомассы целлюлозы, как следствие значительно возрастает реакционная способность целлюлозосодержащего сырья [17].

Измельчают целлюлозосодержащее сырье, как в сухом, так и во влажном виде [17].

Исследования предварительной обработки биомассы с целью ее разрушения лигноцеллюлозной структуры продолжаются в течение многих лет, но ни один из результатов не был внедрен в промышленное производство этанола из-за невысокой экономической рентабельности. Только несколько методов предварительной обработки, такие как использование разбавленной кислоты и парового взрыва прошли успешно [23].

И для решения задачи глубокой переработки целлюлозосодержащего сырья и получения биотехнологических продуктов необходимо [24]:

- выбрать субстрат;
- провести предварительную обработку субстрата механической, химической или биохимической обработкой для улучшения доступности полимерных компонентов воздействию гидролизующих агентов (при этом стоимость предварительной обработки должна быть соотнесена с конечной стоимостью продукта);

- провести гидролиз преимущественно полимерных субстратов, таких как полисахариды и белки;
- подготовить среды на основе продуктов гидролиза;
- провести процесс культивирования с использованием соответствующих продуцентов;
- провести последующее выделение конечных продуктов и получить количественные значения показателей качества.

Этим требованиям отвечает постановка задачи разработки оптимальных способов приготовления питательных сред и культивирования микроорганизмов на основе гидролизатов целлюлозосодержащих видов сырья.

Методы и материалы

В работе исследовались три вида сырья: целлюлоза (фильтровальная бумага), пшеничная солома и отруби, смесь пшеничной соломы и отрубей в соотношении 1:1.

Пшеничная солома - один из наиболее дешевых возобновляемых источников сырья, самый много тоннажный отход, запасы которого исчисляются сотнями млн. тонн. Солома - естественный воспроизводимый ресурс, поддерживающий баланс двуокиси углерода в атмосфере, один из основных объектов исследований как исходный субстрат для получения микробного белка. Химический состав соломы зерновых культур достаточно сложен и состоит главным образом из трех групп органических соединений (таблица 1) [25, 26].

Пшеничные отруби – крупнотоннажный побочный отход мукомольного производства в виде твердой оболочки зерна, получаемый при отделении внешних слоев зерновки пшеницы от внутренних, который больше используется в виде пищевых волокон в пищевой промышленности [27-29]. Пшеничные отруби составляют в среднем 15-16 % от общего количества массы зерна пшеницы данным [30-33].

Таблица 1 – Химический состав сырья, % масс. [26, 28]

Вид соломы	Содержание		
	Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Лигнин
Пшеничная солома	38	27	17
Пшеничные отруби	43	35	5
Солома - отруби	41	31	11

Пшеничную солому предварительно подвергали механической обработке - измельчали на лабораторных мельницах СЕМОТЕС 1090 просеивали через сита и в работе использовали среднюю фракцию сырья с размерами частиц 1-3 мм. Пшеничные отруби взятые на одном из мукомольных заводов Поволжья соответствовали данным размерам и только просушивались, как и остальные виды сырья в сушильном шкафу при температуре 120°C в течение 2 часов до постоянной величины – получения более точной навески сухого материала. Фильтровальная бумага нарезалась до размеров 1-3 мм.

В качестве гидролизующих агентов использовались концентрированная серная кислота и разбавленная сернистая кислота (полученная на лабораторной установке по получению сернистой кислоты путем сжигания порошковой серы).

Все процессы гидролиза проводились на лабораторной установке высокотемпературного гидролиза капсульного типа [34] по отработанным методикам, аналогично ранее выполненным исследованиям по гидролизу растительного сырья минеральными кислотами [35, 36].

Все исследования процессов высокотемпературного гидролиза с минеральными кислотами проводились при гидромодуле 1:5,8 и варьировании технологических параметров: температуры в диапазоне 150°C - 190°C, концентрации кислот 1 – 4% масс. Точность поддержания температуры составляла $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Полученные образцы гидролизатов разделяли центрифугированием и анализировали на содержание редуцирующих и сухих веществ, водородного показателя. Оценка воспроизводимости

экспериментальных данных при реализации процессов высокотемпературного гидролиза проводилась по трем проведенным процессам при каждом значении температуры и концентрации кислот. Для каждого проведенного процесса гидролиза в периодически отбираемых пробах определяли концентрации полисахаридов и редуцирующих веществ, рассчитывали конверсию исследуемого сырья, скорость процесса гидролиза и содержание редуцирующих веществ в сухих веществах.

Результаты

Проведенные исследования процессов высокотемпературного гидролиза выявили различия в динамике накопления редуцирующих веществ от значений параметров температуры и концентрации кислот (табл. 1 и рис.1).

Из представленных данных в таблице 1 и на рисунке 1 следует, что:

- содержание редуцирующих веществ в гидролизатах целлюлозы, полученных с использованием сернистой кислоты, выше, чем в гидролизатах целлюлозы полученных гидролизом серной кислотой;
- содержание редуцирующих веществ в гидролизатах соломы, отрубей и смеси соломы с отрубями при гидролизе серной кислотой выше, чем в гидролизатах целлюлозы, полученных с использованием сернистой кислоты;
- содержание редуцирующих веществ в гидролизатах отрубей выше, чем в гидролизатах целлюлозы и соломы;
- содержание редуцирующих веществ в гидролизатах соломы, отрубей и смеси соломы с отрубями полученных при гидролизе серной кислотой выше, чем в гидролизатах целлюлозы, полученных с использованием сернистой кислоты.

Таблица 2– Расчетные данные по конверсии сырья и скорости проведенных процессов

Сырье	Концентрация кислоты, %	Температура, °C	Время, мин	PВmax, %	Конверсия, %	R, г ПВ/л*час	Средняя концентрация СВ, %	Содержание ПВ в СВ, %
Гидролизующий агент серная кислота								
Целлюлоза	3	190	5	4,7900	27,86	574,56	5,15	92,97
Пшеничная солома	3	190	10	5,6287	50,38	337,72	12,12	46,44
Пшеничные отруби	3	190	10	7,6831	57,31	460,99	8,94	86,94
Солома - отруби	3	190	5	5,6287	39,94	675,44	8,42	66,85
Гидролизующий агент сернистая кислота								
Целлюлоза	3	190	30	6,0511	35,24	121,16	8,88	68,20
Пшеничная солома	2	170	30	4,1500	37,15	83,00	13,00	31,92
Пшеничные отруби	2	160	20	6,5665	48,98	197,00	7,86	83,54
Солома - отруби	3	150	60	5,4500	38,67	54,50	8,99	60,62

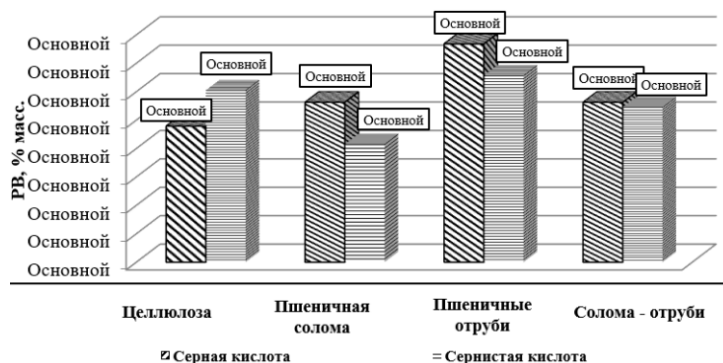


Рис. 1. Сравнительная оценка проведенных процессов гидролиза

Заключение

Как следует из анализа полученных результатов (табл. 1), солома является трудно гидролизуемым сырьем, причем конечная концентрация РВ в сухих веществах зависит от выбора гидролизующего агента. В то же время содержание РВ в сухом веществе гидролизатов отрубей практически идентично при использовании в процессе гидролиза серной и сернистой кислот. Это связано с наличием остаточного количества легко гидролизуемого крахмала в отрубях. Кроме того, использование добавки отрубей к гидролизуемой соломе позволяет снизить температуру процесса гидролиза, т.е. обеспечить энергосбережение в производстве гидролизатов. Поэтому для повышения эффективности процесса гидролиза и получения качественных гидролизатов целесообразно использовать добавки легко гидролизуемых компонентов к соломе.

Литература

1. Ritslaid, K. State of the Art in Bioethanol Production / K. Ritslaid, A. Küüt, J. Olt // *Agronomy Research*. – 2010. – № 8. – P. 236-254.
2. Saha, B.C. Alpha-L-Arabinofuranosidases, biochemistry, molecular biology and application in biotechnology / B.C. Saha // *Biotechnology Advances*. – 2000. – V. 18. – № 5. – pp. 403-423.
3. Effect of reduction in yeast and enzyme concentrations in a simultaneous- saccharification-and-fermentation-based bioethanol process / A. Wingren [et al] // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2005. – № 122. – pp. 485-499.
4. Мухачев, С.Г. Питательная среда для генерации биомассы сахарамидов / С.Г. Мухачев, Р.Т. Валеева, Р.М. Нуртдинов // *Производство спирта и ликероводочных изделий*. – 2011. – № 3. – С. 20-23.
5. Сушкова, В.И. Безотходная конверсия растительного сырья в биологически активные вещества / В.И. Сушкова, Г.И. Воробьева. – Киров: ДеЛи принт, 2007. – 204 с.
6. Yi, Z. Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production / Z. Yi, P. Zhongli, Z. Ruihong // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2009. – V. 2. – № 3. – pp. 51-68.
7. McMillian, J.D. Pretreatment of lignocellulosic biomass / J.D. McMillian // *Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production*. – 1994. – № 15. – pp. 292-324.
8. Hsu, T.A. Pretreatment of biomass / T.A. Hsu // *Handbook on Bioethanol, production and utilization*. – 1996. – pp. 179-212.
9. Chandra, R.P. Substrate pretreatment, the key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics / R.P. Chandra // *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. – 2007. – № 108. – pp. 67-93.
10. Pretreatment of yellow poplar sadust by pressure cooking in water / J.R. Weil [et al] // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 1997. – V. 68. – № 1. – pp. 21-40.
11. Ballesteros, I. Dilute sulfuric acid pretreatment of cardoon for ethanol production / I. Ballesteros [et al] // *Biochemical Engineering Journal*. – 2008. – V. 42. – № 1. – pp. 84-91.
12. Negro, M.J. Changes in various physical/chemicals parameters of *Pinus pinaster* wood after steam explosion pretreatment / M.J. Negro [et al] // *Biomass and Bioenergy*. – 2003. – V. 25. – № 3. – pp. 301-308.
13. Hydrolysis of Tifton 85 bermudagrass in a pressurized batch hot water reactor / S.K. Brandon [et al] // *Chemical Technology and Biotechnology*. – 2008. – V. 83. – № 4. – pp. 505-512.
14. Dien, B.S. Enzymatic saccharification of hot-water pretreated corn fiber for production of monosaccharides / B.S. Dien [et al] // *Enzyme and Microbial Technology*. – 2006. – V. 39. – № 5. – pp. 1137-1144.
15. Hydrothermal pretreatment conditions to enhance ethanol production from poplar biomass / M.J. Negro [et al] // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2003. – № 105. – pp. 87-100.
16. Rogalinski, T. Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures / T. Rogalinski, T. Ingram, G.J. Brunner // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2008. – V. 47. – № 1. – pp. 54-63.
17. Предварительная обработка растительного сырья и отходов сельскохозяйственного производства с целью повышения выхода редуцирующих веществ / Р.М. Нуртдинов, Р.Т. Валеева, С.Г. Мухачев, М.В. Харина // *Вестник технологического университета*. – 2011. – № 9. – С. 264-268.
18. Walsum, V. Conversion of lignocellulosics pretreated with liquid hot water to ethanol / V. Walsum [et al] // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 1996. – № 57. – pp. 157-170.

19. Rivers, D.B. Lignocellulose pretreatment, a comparison of wet and dry ball attrition / D.B. Rivers, G.H. Emert // *Biotechnology Letters*. – 1987. – № 9. – pp. 365-368.
20. Yoshida, M. Effects of cellulose crystallinity, hemicellulose, and lignin on the enzymatic hydrolysis of *Miscanthus sinensis* to monosaccharides / M. Yoshida // *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. – 2008. – № 72. – pp. 805-810.
21. Effect of compression milling on cellulose structure and enzymatic hydrolysis kinetics / D.D. Ryu [et al] // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1982. – V. 24. – № 5. – pp. 1047-1067.
22. Tassinari, T. Differential speed two roll mill pretreatment of cellulosic materials for enzymatic hydrolysis / T. Tassinari, C. Macy // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1977. – V. 19. – № 9. – pp. 1321-1330.
23. Iogen Corporation. Iogen's Cellulosic Ethanol Demonstration Plant [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.iogenenzymes.com/company/demo_plant/index.html, свободный. Загл. с экрана. (Дата обращения: 15.12.2020)
24. Pardeep, K.S. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review / K.S. Pardeep [et al] // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2018. – № 5. – pp. 1-15.
25. Валеева, Р.Т. Солома как перспективное сырье для биотехнологических производств: монография / Р.Т. Валеева. [и др.]. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 142 с.
26. Тарабанько, В.Е. Исследование процесса переработки пшеничной соломы в ароматические альдегиды и левулиновую кислоту / В.Е. Тарабанько [и др.] // *Химия растительного сырья*. – 1998. – № 3. – С. 59-64.
27. Осипов, Д.О. Влияние измельчения пшеничных отрубей на их свойства и реакционную способность при биокаталитической конверсии / Д.О. Осипов [и др.] // *Катализ промышленности*. – 2016. – № 5. – С. 75-82.
28. Бахолдина, Л.А. Исследование процесса фракционирования ферментативного гидролизата пшеничных отрубей на амберлите xad-4 / Л.А. Бахолдина, В.П. Севодин // *Техника и технология пищевых производств*. – 2015. – № 1. – С. 82-86.
29. Гайдабрус, М.А. Возможные направления использования отрубей в теплоэнергетике / М.А. Гайдабрус [и др.] // IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия Молодая»: сб. тез. докладов. – Кемерово: Изд-во «КузГТУ», 2017. – С. 1-5.
30. Chalamacharla, R.B. Wheat Bran-Composition and Nutritional Quality: A Review / R.B. Chalamacharla [et al] // *Advances Biotechnology and Microbiology*. – 2018. – № 9. – pp. 21-27.
31. Reisinger, M. Wheat bran biorefinery – A detailed investigation on hydrothermal and enzymatic treatment / M. Reisinger [et al] // *Bioresource Technology*. – 2013. – V. 144. – pp. 179-185.
32. Lehtinen, O-P. Modifying Wheat Bran for Food Applications – Effect of Wet Milling and Enzymatic Treatment / O-P. Lehtinen // *Bio and Food Technology*. – 2012. – 63 p.
33. Maes, C. Structural characterisation of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans in wheat bran / C. Maes, J.A. Delcour // *Journal of Cereal Science*. – 2002. – V. 35. – № 3. – pp. 315-326.
34. Шагивалеев, И.В. Лабораторная установка высокотемпературного гидролиза с тепловым аккумулятором / И.В. Шагивалеев, Р.Т. Валеева, С.Г. Мухачев // *Вестник технологического университета*. – 2014. – Т. 17. – № 11. – С. 190-192.
35. Валеева, Р.Т. Исследование кинетики и оптимизация процесса высокотемпературного гидролиза смеси пшеничной соломы и отрубей сернистой кислотой / Р.Т. Валеева, С.Г. Мухачев, Р.М. Нуртдинов // *Вестник Казанского технологического университета*. – Т. 17. – № 14. – С. 357-358.
36. Валеева, Р.Т. Исследование кинетики и оптимизация процесса высокотемпературного гидролиза смеси пшеничной соломы и отрубей серной кислотой / Р.Т. Валеева, [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – Т. 17. – № 22. – С. 198-199.

© Валеева Р.Т. – канд. техн. наук, доцент кафедры химической кибернетики, ФГБОУ ВО «Казанский Национальный Исследовательский Технологический Университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), e-mail: valrt2008@rambler.ru; Понкратова С.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры химической кибернетики, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: kiberponk@gmail.com; Шурбина М.Ю. – аспирант кафедры химической кибернетики, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: masha-shurbina@mail.ru; Ананьева О.В. – аспирант кафедры химической кибернетики, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: littleromp@mail.ru; Понкратов А.С. – старший преподаватель кафедры химической кибернетики, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: aponkratov24@gmail.com.

UDC 663.1

COMPARATIVE EVALUATION OF THE PROCESSES OF WASTE HYDROLYSIS OF PROCESSING OF CELLULOSE-CONTAINING RAW MATERIALS

R.T. Valeeva, S.A. Ponkratova, M.Yu. Shurbina, O.V. Ananyeva, A.S. Ponkratov

The paper analyzes the experimental work carried out to optimize the processes of high-temperature hydrolysis of the control raw material of cellulose and two main waste products obtained on the basis of wheat processing: wheat straw and bran and a mixture of wheat straw and bran in a 1: 1 ratio with mineral sulfur-containing acids at a hydromodule of 1: 5, 8 and varying technological parameters: temperatures in the range 150 °C - 190 °C and acid concentration 1 - 4% of the mass. and with the aim of obtaining hydrolysates with a maximum content of reducing substances. All hydrolysis processes were carried out on a laboratory capsule-type high-temperature hydrolysis plant. With an increase in the concentration of phosphoric acid, the content of reducing substances in hydrolysates also increases; with an increase in temperature parameters, the concentration of phosphoric acid increases and the duration of hydrolysis processes decreases, and the content of reducing substances in hydrolysates decreases. The maximum values of the content of reducing substances were obtained in the processes of hydrolysis of a mixture of wheat straw and bran at a temperature of 150 °C and a sulfurous acid concentration of 4%. In the studies carried out on the high-temperature hydrolysis of a mixture of wheat straw and bran, hydrolysates were obtained in which the reducing substances constituted on average about 41,81 % of the total mass of soluble substances. When carrying out the processes of high-temperature hydrolysis, a pre-treated mixture of wheat straw and bran was used.

Key words: pretreatment, hydrolysis, hydrolyzate wheat straw and bran.

References

1. Ritslaid, K. [State of the Art in Bioethanol Production] / K. Ritslaid, A. Küüt, J. Olt // [Agronomy Research]. – 2010. – № 8. – pp. 236-254.
2. Saha, B. C. [Alpha-L-Arabinofuranosidases, biochemistry, molecular biology and application in biotechnology] / B.C. Saha // [Biotechnology Advances]. – 2000. – Vol. 18. – № 5. – pp. 403-423.
3. [Effect of reduction in yeast and enzyme concentrations in a simultaneous- saccharification-and-fermentation-based bioethanol process] / A. Wingren [et al] // [Applied Biochemistry and Biotechnology]. – 2005. – № 122. – pp. 485-499.
4. Mukhachev, S. G. [Nutrient medium for the generation of biomass of sakhomycetes] / S. G. Mukhachev, R. T. Valeeva, R. M. Nurtdinov // [Production of alcohol and alcoholic beverages]. – 2011. – № 3. – pp. 20-23. (In Russ.).
5. Sushkova, V. I. [Waste-free conversion of plant materials into biologically active substances] / V. I. Sushkova, G. I. Vorobyova. – Kirov: DeLi print, 2007. – 204 p.
6. Yi, Z. [Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production] / Z. Yi, P. Zhongli, Z. Ruihong // [International Journal of Agricultural and Biological Engineering]. – 2009. – Vol. 2. – № 3. – pp. 51-68.
7. McMillian, J. D. [Pretreatment of lignocellulosic biomass] / J.D. McMillian // [Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production]. – 1994. – № 15. – pp. 292-324.
8. Hsu, T. A. Pretreatment of biomass / T.A. Hsu // Handbook on Bioethanol, production and utilization. – 1996. – pp. 179-212.
9. Chandra, R. P. [Substrate pretreatment, the key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics] / R.P. Chandra // [Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology]. – 2007. – № 108. – pp. 67-93.
10. [Pretreatment of yellow poplar saduy by pressure cooking in water] / J. R. Weil [et al] // [Applied Biochemistry and Biotechnology]. – 1997. – Vol. 68. – № 1. – pp. 21-40.
11. Ballesteros, I. [Dilute sulfuric acid pretreatment of cardoon for ethanol production] / I. Ballesteros [et al] // [Biochemical Engineering Journal]. – 2008. – Vol. 42. – № 1. – pp. 84-91.
12. Negro, M. J. [Changes in various physical/chemicals parameters of *Pinus pinaster* wood after steam explosion pretreatment] / M. J. Negro [et al] // [Biomass and Bioenergy]. – 2003. – Vol. 25. – № 3. – pp. 301-308.

13. [Hydrolysis of Tifton 85 bermudagrass in a pressurized batch hot water reactor] / S. K. Brandon [et al] // [Chemical Technology and Biotechnology]. – 2008. – Vol. 83. – № 4. – pp. 505-512.
14. Dien, B. S. [Enzymatic saccharification of hot-water pretreated corn fiber for production of monosaccharides] / B. S. Dien [et al] // [Enzyme and Microbial Technology]. – 2006. – Vol. 39. – № 5. – pp. 1137-1144.
15. [Hydrothermal pretreatment conditions to enhance ethanol production from poplar biomass] / M. J. Negro [et al] // [Applied Biochemistry and Biotechnology]. – 2003. – № 105. – pp. 87-100.
16. Rogalinski, T. [Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures] / T. Rogalinski, T. Ingram, G.J. Brunner // [The Journal of Supercritical Fluids]. – 2008. – Vol. 47. – № 1. – pp. 54-63.
17. [Pretreatment of vegetable raw materials and agricultural waste in order to increase the yield of reducing substances] / R. M. Nurtdinov [et al] // [Bulletin of the Technological University]. – 2011. – Vol. 9. – pp. 264-268.
18. Walsum, V. [Conversion of lignocellulosics pretreated with liquid hot water to ethanol] / V. Walsum [et al] // [Applied Biochemistry and Biotechnology]. – 1996. – № 57. – pp. 157-170.
19. Rivers, D. B. [Lignocellulose pretreatment, a comparison of wet and dry ball attrition] / D. B. Rivers, G. H. Emert // [Biotechnology Letters]. – 1987. – № 9. – pp. 365-368.
20. Yoshida, M. [Effects of cellulose crystallinity, hemicellulose, and lignin on the enzymatic hydrolysis of *Miscanthus sinensis* to monosaccharides] / M. Yoshida // [Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry]. – 2008. – № 72. – pp. 805-810.
21. [Effect of compression milling on cellulose structure and enzymatic hydrolysis kinetics] / D. D. Ryu [et al] // [Biotechnology and Bioengineering]. – 1982. – Vol. 24. – № 5. – pp. 1047-1067.
22. Tassinari, T. [Differential speed two roll mill pretreatment of cellulosic materials for enzymatic hydrolysis] / T. Tassinari, C. Macy // [Biotechnology and Bioengineering]. – 1977. – Vol. 19. – № 9. – pp. 1321-1330.
23. Iogen Corporation. Iogen's Cellulosic Ethanol Demonstration Plant [Electronic resource]. – Access mode: http://www.ioGENzymes.com/company/demo_plant/index.html, free. Title from the screen. (Date of access: 15.12.2020)
24. Pardeep, K. S. [Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review] / K. S. Pardeep [et al] // [Bioresources and Bioprocessing]. – 2018. – № 5. – P. 1-15.
25. Valeeva, R. T. [Straw as a promising raw material for biotechnological industries]: monograph / R. T. Valeeva [et al] – Kazan: Publishing house of KNRTU, 2016. – 142 p. (In Russ.).
26. Tarabanko, V. E. [Investigation of the process of processing wheat straw into aromatic aldehydes and levulinic acid] / V.E. Tarabanko [et al] // [Chemistry of vegetable raw materials]. – 1998. – № 3. – pp. 59-64. (In Russ.).
27. Osipov, D. O. [The influence of grinding wheat bran on their properties and reactivity during biocatalytic conversion] / D. O. Osipov [et al] // [Industrial Catalysis]. – 2016. – № 5. – pp. 75-82. (In Russ.).
28. Bakholdin, L. A. [Investigation of the process of fractionation of enzymatic hydrolyzate of wheat bran on amberlite xad-4] / L. A. Bakholdin, V. P. Sevodin // [Technics and technology of food production]. – 2015. – № 1. – pp. 82-86. (In Russ.).
29. Gaidabrus, M. A. [Possible directions of using bran in heat power engineering] / M. A. Gaidabrus [et al] // IX All-Russian scientific-practical conference of young educational «Russia Young»: collection of articles. thesis. reports. – Kemerovo: Publishing house «KuzGTU», 2017. – pp. 1-5.
30. Chalamacharla, R. B. [Wheat Bran-Composition and Nutritional Quality: A Review] / R. B. Chalamacharla [et al] // [Advances Biotechnology and Microbiology]. – 2018. – № 9. – pp. 21-27.
31. Reisinger, M. [Wheat bran biorefinery – A detailed investigation on hydrothermal and enzymatic treatment] / M. Reisinger [et al] // [Bioresource Technology]. – 2013. – Vol. 144. – pp. 179-185.
32. Lehtinen, O-P. [Modifying Wheat Bran for Food Applications – Effect of Wet Milling and Enzymatic Treatment] / O-P. Lehtinen // [Bio and Food Technology]. – 2012. – 63 p.
33. Maes, C. [Structural characterisation of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans in wheat bran] / C. Maes, J.A. Delcour // [Journal of Cereal Science]. – 2002. – Vol. 35. – № 3. – pp. 315-326.
34. Shagivaleev, I. V. [Laboratory installation of high-temperature hydrolysis with heat accumulator] / I. V. Shagivaleev, R. T. Valeeva, S. G. Mukhachev // [Bulletin of the Technological University]. – 2014. – T.17. – № 11. – pp. 190-192. (In Russ.).

35. Valeeva, R. T. [Investigation of the kinetics and optimization of the process of high-temperature hydrolysis of a mixture of wheat straw and bran with sulfurous acid] / R. T. Valeeva, S. G. Mukhachev, R. M. Nurtdinov // [Bulletin of Kazan Technological University]. – Т. 17. – № 14. – pp. 357-358. (InRuss.).

36. Valeeva, R. T. [Investigation of the kinetics and optimization of the process of high-temperature hydrolysis of a mixture of wheat straw and bran with sulfuric acid] / R. T. Valeeva [et al] // [Bulletin of Kazan Technological University]. – 2014. – Т. 17. – № 22. – pp. 198-199. (InRuss.).

© **Valeeva R.T.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Cybernetics, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: valrt2008@rambler.ru; **Ponkratova S.A.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Cybernetics, KNRTU, e-mail: kiberponk@gmail.com; **Shurbina M.Yu.** – postgraduate student of the Department of Chemical Cybernetics, KNRTU, e-mail: masha-shurbina@mail.ru; **Ananyeva O.V.** – postgraduate student of the Department of Chemical Cybernetics, KNRTU, e-mail: littleromp@mail.ru; **Ponkratov A.S.** – Senior Lecturer of the Department of Chemical Cybernetics, KNRTU, e-mail: aponkratov24@gmail.com.

УДК 625.142

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПИТОЧНОГО СОСТАВА ОТРАБОТАННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

А.А. Макаров, С.А. Забелкин, И.Г. Земсков, А.Н. Грачев, Г.М. Бикбулатова, В.Н. Башкиров, И.Р. Шарафутдинов

В статье представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований по вопросу термического разложения отработанных деревянных шпал. Проведён анализ объекта исследования (деревянных шпал), технологий его производства, свойств древесного материала и пропиточного состава. Представлены результаты экспериментальных исследований модельных смесей методом термического анализа. Показано, что процесс термического разложения отработанных деревянных шпал происходит в 4 стадии. Основными продуктами термической утилизации ОДШ являются пиролизная жидкость и уголь, которые востребованы потребителями.

Ключевые слова: деревянные шпалы, пропиточный состав, быстрый пиролиз, утилизация шпал.

Введение

Технологию изготовления деревянных шпал можно разбить на два основных этапа: на первом осуществляют подготовку непропитанной шпалы по заданным размерам и требованиям на лесопильных предприятиях; на втором – пропитку полученных заготовок на шпалопропиточных заводах [1].

При пропитке шпал на шпалопропиточных заводах применяют метод автоклавной пропитки под давлением выше атмосферного [2]. Пропитка древесины под давлением обеспечивает наиболее глубокое проникновение защитного средства и применяется для пропитки шпал, эксплуатируемых в тяжелых условиях. Древесина должна быть сухой или предварительно подсушенной непосредственно перед пропиткой в том же автоклаве. Выделяют способ полного поглощения или вакуум-давление-вакуум (ВДВ) и способ ограниченного поглощения [3].

В то же время в ряде небольших предприятий применяются более простые способы пропитки деревянных шпал, которые осуществляются по техническим условиям самого предприятия. В качестве примера можно привести пропитку при атмосферном давлении методом нанесения состава на поверхность шпал кисточкой. При этом глубина пропитки составляет не более 1-2 мм.

По техническим условиям шпалы, подвергаемые такой пропитке, должны иметь абсолютную влажность менее 20%. Давление, вакуум и продолжительность пропитки регулируются таким образом, чтобы в шпалах оставалось около 65 кг пропиточного состава на 1 м³ древесины (допускается отклонение $\pm 10\%$). Таким образом, принимая объём шпалы в размере 0,124 м³, масса пропиточного состава в одной шпале составит 8,06 кг или (12,15 % мас.). При глубине пропитки 1 см максимальное содержание пропиточного состава в верхнем слое составляет 47% мас.

В целях получения максимально сквозной пропитки шпал проводят предварительную наколку шпал в соответствии требованиями нормативно-технической документации [4]. Глубина пропитки шпал считается удовлетворительной, если в девяти шпалах из десяти, контролируемых в каждой загрузке, суммарная величина пропитки на образце длиной 100 мм будет у восьми шпал не менее 80 мм, а у одной шпалы – не менее 70 мм. Таким образом, объёмная доля пропитки в среднем в зависимости от вида шпал принимает значения 12,9-19%.

В качестве пропиточного состава для деревянных шпал применяются различные виды антисептиков. Антисептики для пропитки деревянных шпал бывают масляными и водорастворимыми.

Продукты сухой перегонки каменного угля и древесины называются масляными антисептиками. Их используют в натуральном виде или смешивают с другими маслами и растворителями. Наиболее используемыми являются каменноугольные и сланцевые пропиточные масла. Каменноугольные создаются в процессе фракционной разгонки каменноугольной смолы, а сланцевые – при термической переработке горючих сланцев. Сегодня самым лучшим из масляных антисептиков считают каменноугольное пропиточное масло, которое широко применяется в нашей стране, Европе и США. Оно создаётся в процессе перегонки каменноугольной смолы и почти полностью состоит из нейтральных углеводородов с примесью фенолов, нафталина, антрацена. Каменноугольное креозотовое масло не поглощает водяные пары из воздуха и весьма устойчивое к выщелачиваемости его из пропитанной древесины, защищает шпалы от паразитов и микроорганизмов, нелетучее, сохраняет целостность структуры металла и древесины. К недостаткам каменноугольного пропиточного масла относится экологическая опасность, очень резкий запах, горючесть и невозможность дальнейшей покраски древесины после пропитки. Для самого процесса пропитки часто используют смесь креозота с мазутом по технологии ограниченного поглощения.

В зависимости от свойств древесины и других параметров водные антисептики используются в виде растворов различных концентраций и в твёрдом виде для самостоятельного получения раствора. Из водорастворимых антисептиков наиболее часто применяются минеральные соли: медный купорос, сулема, триолит, хлористый цинк, динитрофенол, фтористый или кремнефтористый натрий. Недостатки водорастворимых антисептиков - неустойчивость к вымыванию водой из древесины, которая приводит к существенному сокращению срока службы пропитанной древесины, а так же высокая токсичность.

Однако многие предприятия используют и выпускают на рынок ряд пропиточных составов, изготовленных по собственным техническим условиям. Данные составы, как правило, не соответствуют требованиям ГОСТ. Тем не менее, шпалы, применяемые на объектах транспортной инфраструктуры, должны соответствовать требованиям государственных стандартов, и основным пропиточным составом для них является каменноугольное шпалопротиточное масло [5].

Каменноугольное шпалопротиточное масло ГОСТ 2770-74 готовится на основе первой антраценовой фракции и поглотительного масла (3:1), образующихся в процессе фракционирования смолы коксования каменных углей [6]. Каменноугольное масло (КМ) представляет собой темно-коричневую жидкость со своеобразным резким запахом, является сложной многокомпонентной смесью ароматических углеводородов и содержит более тысячи соединений, некоторые из которых не идентифицированы до сих пор. При нагревании компоненты каменноугольного масла начинают испаряться уже при температуре 210°C (объёмная доля паров от общей массы составляет 3%, а при 360°C – 70 %). При дальнейшем нагревании КМ коксуется и образует пек.

В соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 каменноугольное масло для пропитки древесины по степени воздействия на организм относится к первому (чрезвычайно опасное вещество) или второму (высокоопасное вещество) классу в зависимости от массовой доли токсичных веществ в возгонах каменноугольных смол. Вредное воздействие каменноугольного масла обусловлено действием токсичных компонентов, входящих в его состав, наиболее опасным из которых является бенз(а)пирен, классифицирующийся как вероятно канцерогенный для человека и как канцероген при воздействии на животных. Бенз(а)пирен относится к веществам 1-го класса опасности. Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК) бенз(а)пирена в воздухе населённых мест составляет 0,001 мкг/м³, в воздухе рабочей зоны – 0,15 мкг/м³. Источниками поступления поверхностно активных углеводородов (ПАУ) в окружающую среду являются практически все производства, включающие процессы горения (ТЭЦ, котельные, нефтехимические и асфальтобитумные производства, производство алюминия, пиролиз), а также автотранспорт, горящие свалки и т.д. [5].

Деревянные шпалы, ежегодно образующиеся в количестве более 2 млн. штук, необходимо как-то утилизировать [7]. Существующие на сегодняшний день методы утилизации отработанных деревянных шпал (ОДШ) - захоронение, химическая нейтрализация, газификация с последующим сжиганием, использование в качестве композиционных материалов экологически не целесообразны и энергетически затратны. Ввиду этого, применение или внедрение данных методов может привести к большим энергетическим затратам или к попаданию токсичных компонентов каменноугольного масла, используемого для пропитки шпал, в окружающую среду. В то же время, приемлемое решение проблемы может дать ощутимый эффект для малой энергетики.

Решением задачи утилизации отработанных деревянных шпал может стать пиролиз [8]. Применение метода пиролиза для утилизации ОДШ, позволит не только предотвратить загрязнение окружающей среды, т.к. процесс пиролиза осуществляется в герметичных условиях, но и позволит получить экономическую выгоду [9]. Использование тепла сжигания образующихся пирогазов позволит до минимума снизить энергозатраты на процесс пиролиза. При правильной организации технологического процесса данный метод утилизации позволит не только покрыть энергетические потребности процесса пиролиза, но и использовать излишки вырабатываемого тепла в технических или бытовых нуждах. Кроме того, экономическая эффективность данного способа утилизации может быть значительно повышена за счет реализации жидких и твердых продуктов пиролиза, которые могут быть использованы в промышленности [10].

Для возможности утилизации ОДШ методом быстрого пиролиза необходимо провести анализ объекта исследования (ОДШ и пропиточного состава).

Методы и материалы

С целью исследования процесса термического разложения ОДШ и идентификации рациональных технологических режимов термического разложения проведены исследования методом ТГА -ДСК с применением модельных составов, состоящих из древесного материала и пропиточного состава и имитирующих физико-химические свойства деревянных пропитанных шпал.

В качестве древесного материала использовалась древесная мука, свойства которой представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства древесной муки

Параметр	Единица измерения	Значение
Влажность	%	5,6
Массовая доля золы	%	0,2
Масса окрашенных примесей	%	0,03
Массовая доля металломагнитных примесей	%	0,001
Насыпная плотность	кг/м ³	130
Массовая доля остатка: - на сетке 018 - на сетке 025 - на сетке 0125	%	1,3 0,0 17,2
Массовая доля древесины лиственных пород	%	5,0
Массовая доля кислот	%	0,08
Массовая доля смол и масел	%	4,0

С целью сравнения свойств модельной смеси со свойствами исходного древесного материала был проведён термический анализ древесной муки и пропиточного состава методом ТГА -ДСК. Термический анализ проб осуществлялся на совмещённом микротермоанализаторе STA 449 C Jupiter, сопряжённом с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 C Aeolos для анализа газообразных продуктов разложения. Измерения проводили в интервале температур 30-600 °С в динамической атмосфере аргона (расход газа 75 мл/мин.), при скорости нагрева 10 °С/мин [(Shafizadeh)].

В качестве пропиточного состава применялся экстракт пропиточного состава из отработанных деревянных шпал, полученных у МУП «Метроэлектротранс», которые эксплуатировались на трамвайных путях г. Казани по ул. Академика Павлова. Также в качестве пропиточного состава использовалось пропиточное масло производства ООО «Химэк», г. Магнитогорск [5]. Свойства данной жидкости представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Свойства пропиточного масла ООО «Химэк»

Параметр	Единица измерения	Значение
Плотность	кг/м ³	1075
Влажность	%	2,34

Экстракция пропиточного состава из ОДШ осуществлялась следующим образом. Отработанные деревянные шпалы в количестве 10 штук подвергались очистке от металлических (костыли, подкладки) элементов и от минеральных загрязнений. Пропитанная часть выбранных шпал подвергалась цилиндрическому фрезерованию на фуговальном станке с глубиной фрезерования не более 1 см. Полученная стружка из пропитанной части ОДШ подвергалась дальнейшей жидкостной экстракции с применением ацетона в качестве экстрагента. Экстрагирование осуществлялось 24 часа при нормальных условиях. Далее экстракт подвергался упариванию при температуре 90°C и разрежению при остаточном давлении 0,2 кгс/см² с отгонкой растворителя. Экспериментальный стенд для отгонки растворителя представлен на рисунке 1 [12].

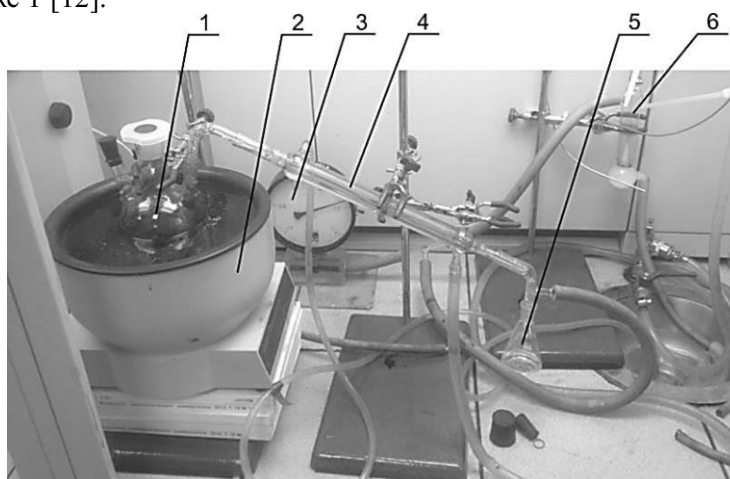


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда для экстракции пропиточных масел: 1 – колба с экстрактом и растворителем, 2 – водяная баня, 3 – вакуумметр, 4 – холодильник, 5 – приёмная колба, 6 – водоструйный насос

Результаты

Результаты термического анализа древесной муки представлены на рис.2 и в таблице 3.

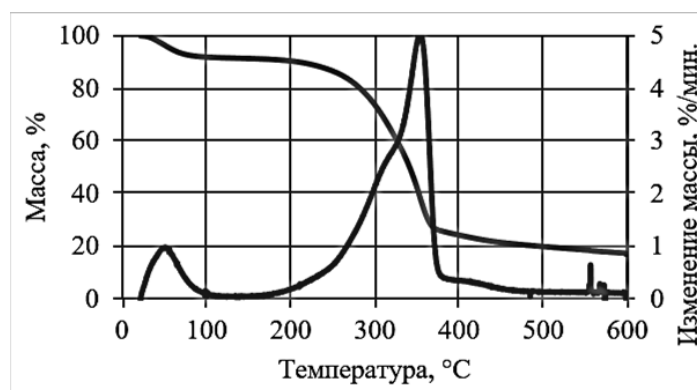


Рис. 2. Результаты термического анализа древесной муки марки 180

Таблица 3 – Результаты термического анализа древесной муки марки 180

Параметр	Единица измерения	Значение
Потеря массы до 100°C	%	8,14
до 210°C		10,04
до 275°C		17,89
до 315°C		33,3
до 360°C		67,1
Остаток при 600°C	%	16,92
Максимальная скорость потери массы	%/мин.	5,01
Соответствующая температура	°C	355

Как видно из полученных результатов, процесс термического разложения древесной муки проходит в три стадии. На первой стадии (до 100°C) происходит испарение воды. На втором этапе (180-360°C) происходит основной процесс разложения целлюлозы. На третьем этапе (более 400°C) происходит прокалка углистого остатка.

Материальный баланс при экстракции пропиточного состава из ОДШ представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Материальный баланс при экстракции пропиточного состава из ОДШ

Масса	Вес (грамм)	Проценты
Стружка, г	101,08	100%
Ацетон, г	370,55	
Смесь экстракта и ацетона, г	276,75	
Остаток после отгонки ацетона	19,79	19,6%

Таким образом, выход экстракта после отгонки ацетона составил 19,6% мас. от загруженной стружки.

Для исследования свойств полученного экстракта каменноугольного масла был проведён термический анализ методом ТГА-ДСК. Характеристика полученного экстракта представлена на рисунке 3 и таблице 5.

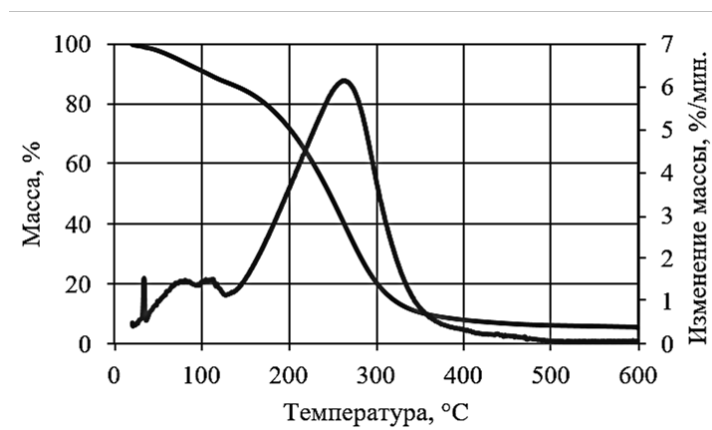


Рис. 3. Результаты термического анализа полученного экстракта

Таблица 5 – Результаты термического анализа полученного экстракта

Параметр	Единица измерения	Значение
Потеря массы до 100°C	%	8,9
до 210°C		31,8
до 275°C		67,1
до 315°C		84,2
до 360°C		90,3
Остаток при 600°C	%	5,3
Максимальная скорость потери массы	%/мин.	6,14
Соответствующая температура	°C	264

Результаты термического анализа пропиточного масла ООО «Химэк» представлены на рис. 4 и в таблице 6.

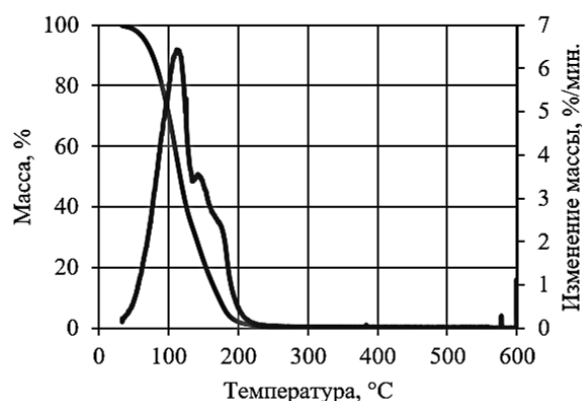


Рис. 4. Результаты термического анализа пропиточного масла ООО «Химэк»

Таблица 6 – Результаты термического анализа пропиточного масла ООО «Химэк»

Параметр	Единица измерения	Значение
Потеря массы до 100°C	%	29,59
до 210°C		98,61
до 275°C		99,5
до 315°C		99,6
до 360°C		99,65
Остаток при 600°C	%	0
Максимальная скорость потери массы	%/мин.	6,43
Соответствующая температура	°C	112

Анализ свойств данного пропиточного состава показывает, что он по существу представляет собой смесь лёгкой и фенольной фракций каменноугольного масла. Для равномерного распределения пропиточного масла в древесной муке смешивание проводилось в два этапа. На первом этапе пропиточное масло, растворённое в ацетоне в массовом соотношении 1:1,5 смешивалось с древесной мукой до получения однородной массы. Затем проводилось испарение ацетона в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянной массы. Полученные образцы также были исследованы методом термического анализа.

Сравнение результатов термического анализа образцов при различном содержании пропиточного состава представлено на рисунке 5.

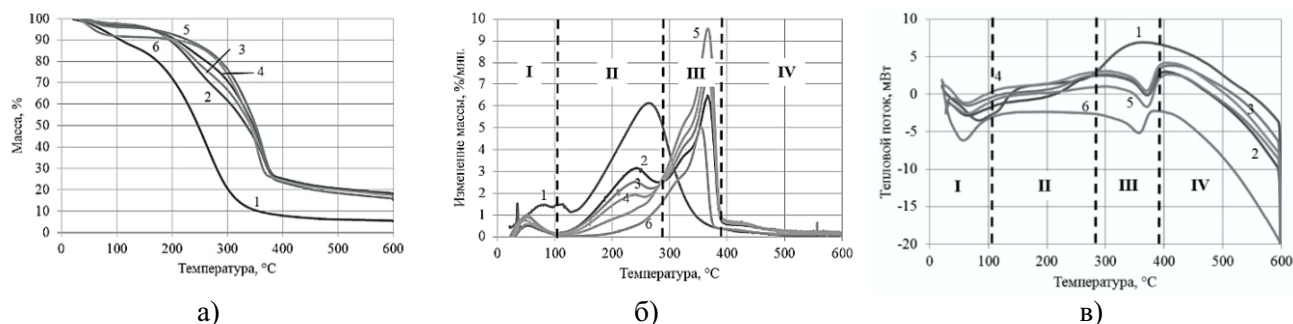


Рис. 5. Сравнение результатов термического анализа образцов при различном содержании пропиточного состава: а – изменение массы от температуры, б – изменение скорости потери массы от температуры, в – изменение теплового потока от температуры. 1 – 100% пропиточного масла, 2 – 75%, 3 – 47%, 4 – 20%, 5 – 12%, 6 – древесная мука

Процесс термического разложения модельной смеси происходит в 4 стадии. На первой стадии, так же, как и при разложении древесины, происходит испарение воды и легкокипящих веществ. Вторая стадия заключается в разложении пропиточного состава. На третьей стадии происходит разложение древесины. Четвёртая стадия заключается в прокалке углистого остатка.

Вторая стадия больше остальных зависит от содержания пропиточного состава. При его увеличении происходит увеличение скорости потери массы на данной стадии, а при содержании состава 10% и менее эта стадия практически исчезает.

Также из представленных графиков видно, что древесная мука имеет наибольший пик потери массы до 100°C. Это связано с тем, что при приготовлении модельной смеси проводилась сушка, а образец чистой древесной муки сушке не подвергался. В связи с этим пик потери массы на третьем этапе для чистой древесной муки должен быть выше, чем представлено на графике 2.5 в.

Заключение

В результате анализа объекта исследования (деревянных шпал), технологий его производства, свойств древесного материала и пропиточного состава были определены основные требования к данным материалам. На их основе была подготовлена методика изготовления модельных смесей для экспериментальных лабораторных исследований. Исследования свойств различных пропиточных составов показали, что многие представленные на рынке жидкости не соответствуют требованиям ГОСТ.

Проведённые исследования методом термического анализа показали, что процесс термического разложения модельной смеси происходит в 4 стадии. На первой стадии, так же, как и при разложении древесины, происходит испарение воды и легкокипящих веществ. Вторая стадия заключается в разложении пропиточного состава. На третьей стадии происходит разложение древесины. Четвёртая стадия заключается в прокалке углистого остатка. Вторая стадия больше остальных зависит от содержания пропиточного состава. При его увеличении происходит увеличение скорости потери массы на данной стадии, а при содержании состава 10% и менее эта стадия практически исчезает.

Основными продуктами термической утилизации ОДШ являются пиролизная жидкость и уголь. Пиролизная жидкость может быть использована как альтернативное возобновляемое топливо и сырьё для химического производства (получение клеящих смол, выделение отдельных химических веществ, применение в качестве компонента дорожного вяжущего). Мелкодисперсный уголь может использоваться в виде угольных брикетов в традиционных сферах применения.

Литература

1. Уласовец, В.Г. Технологические основы производства пиломатериалов. -Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. -510с.
2. Попова, Н.М. Консервирование древесины: проблемы, решения, экологические аспекты / Н.М.Попова, Е.В. Харук. - Новосибирск, 1991. – 171с.
3. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины/ П. С. Серговский. - М. : Лесная пром-ть, 1981.-304с.
4. Баракс, А.М. Глубокая пропитка древесины путем применения наколов/ А. М. Баракс, Ю. Н.

Никифоров. -М.: 1969.

5. ГОСТ 2770-74. Масло каменноугольное для пропитки древесины. Технические условия. –Введ 1974-29-07. –М. : Изд-во стандартов, 1974. – 7с.

6. Сухоруков, В.И. Научные основы совершенствования техники и технологии производства кокса / В.И. Сухоруков. –Екатеринбург: 1999. – 393 с.

7. Распоряжение ОАО «РЖД» от 10 мая 2011 года №987р «О порядке реализации новых и старогодных материалов верхнего строения пути в путевом хозяйстве»

8. Грачев А.Н., Макаров А.А., Забелкин С.А., Башкиров В.Н. Термохимическая переработка лигноцеллюлозного сырья в биотопливо и химические продукты (статья)/ Вестник Казанского технологического университета: Т. 16. № 21; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. техн. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – С. 109-1119;

9. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н. Уголев. –М.: Лесная пром-сть. -2001. -340 с.

10. Никитин, Н.И. Химия древесины и целлюлозы/ Н.И. Никитин.-М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. -250с.

11. Забелкин, С.А. Модификация фенолоформальдегидных смол жидкими продуктами пиролиза древесины и изучение их клеящей способности / С.А. Забелкин, А.Н. Грачев, В.Н. Башкиров, Е.Н. Черезова // Вестник Казанского технологического университета. №8, 2010. С. 440-444.

©**Макаров А.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), технический директор ООО «ЭнергоЛесПром», e-mail: smakarov86@gmail.com; **Забелкин С.А.** – канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», R&D директор ООО «ЭнергоЛесПром», e-mail: szabelkin@gmail.com; **Земсков И.Г.** – ассистент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», главный конструктор ООО «ЭнергоЛесПром», e-mail: ivanzemskov@bk.ru; **Грачев А.Н.** – д.т.н., доцент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», генеральный директор ООО «ЭнергоЛесПром», e-mail: energolesprom@gmail.com; **Бикбулатова Г.М.** – канд. техн. наук., доцент кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», ведущий инженер ООО «ЭнергоЛесПром», e-mail: gm.bikbulatova@yandex.ru; **Башкиров В.Н.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: vlad_bashkirov@mail.ru; **Шарафутдинов И.Р.** – магистрант кафедры химической технологии древесины, ФГБОУ ВО «КНИТУ», специалист ООО «ЭнергоЛесПром», e-mail: isk3641@yandex.ru.

UDK 625.142

INVESTIGATION OF IMPREGNATING COMPOSITION OF USED WOODEN SLEEPERS BY THERMAL ANALYSIS

A.A. Makarov, S.A. Zabelkin, I.G. Zemskov, A.N. Grachev, G.M. Bikbulatova, V.N. Bashkirov, I.R. Sharafutdinov

The article presents the results of analytical and experimental studies on the issue of thermal decomposition of used wooden sleepers. The analysis of the object of research (wooden sleepers), technologies of its production, properties of wood material and impregnating composition was carried out. The results of experimental studies of model mixtures by the method of thermal analysis are presented. It is shown that the process of thermal decomposition of used wooden sleepers occurs in 4 stages. The main products of the thermal utilization of ODSH are pyrolysis liquid and coal, which are in demand by consumers.

Keywords: wooden sleepers, impregnating composition, fast pyrolysis, used sleepers.

References

1. Ulasovets, V.G. [Technological foundations of lumber production]; -Yekaterinburg: Ural. state forestry engineering. un-t, 2002.-510p.
2. Popova, N.M., Haruk E.V. [Wood conservation: problems, solutions, environmental aspects]; - Novosibirsk, 1991. - 171p.
3. Sergovsky, P.S. [Hydrothermal treatment and wood conservation]; -М. : Lesnaya promishlennost; [Forest Industry], 1981.-304p.
4. Barax, A.M., Nikiforov Yu. N. [Deep impregnation of wood by using pricks]; -М. : 1969.
5. GOST 2770-74. [Coal oil for wood impregnation. Technical conditions]. –Entry 1974-29-07. –М. :

Publishing house of standards, 1974. – 7p.

6. Sukhorukov, V.I. [Scientific basis for improving the technique and technology of coke production]; - Yekaterinburg: 1999. - 393 p.

7. [Order of JSC "Russian Railways" dated May 10, 2011 No. 987r "On the procedure for the sale of new and old-year materials for the superstructure of the track in track facilities"]; - Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 10 maya 2011 goda №987r «O poryadke realizacii novyh i starogodnyh materialov verhnego stroeniya puti v putevom hozyajstv».

8. Grachev A.N., Makarov A.A., Zabelkin S.A., Bashkirov V.N. [Thermochemical processing of lignocellulosic raw materials into biofuels and chemical products]; - Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta; [Bulletin of the Kazan Technological University]: T. 16. No. 21; M-in image. and science of Russia, Kazan. nat. issled. technol. un-t. - Kazan: Publishing house of KNRTU, 2013. - pp. 109-1119;

9. Ugolev, B.N. [Wood science with the basics of forest commodity science]. –М.: Lesnaya prom-st. [Forest Industry] -2001. -340 p.

10. Nikitin, N.I. [Chemistry of wood and cellulose]. - М.-Л.: Gosenergoizdat, 1962.-250s.

11. Zabelkin, S.A., Grachev A.N., Bashkirov V.N., Tcherezova E.N. [Modification of phenol-formaldehyde resins by liquid products of wood pyrolysis and the study of their adhesive ability]; - Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta; [Bulletin of Kazan Technological University]. No. 8, 2010. pp. 440-444.

© **Makarov A.A.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Technical Director of LLC «EnergoLesProm», e-mail: smakarov86@gmail.com; **Zabelkin S.A.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, R&D Director of of LLC «EnergoLesProm», e-mail: szabelkin@gmail.com; **Zemskov I. G.** – Assistant of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, Chief Designer of of LLC «EnergoLesProm», e-mail: ivanzemskov@bk.ru; **Grachev A.N.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, General Director of LLC «EnergoLesProm», e-mail: energolesprom@gmail.com; **Bikbulatova G.M.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, leading engineer of LLC «EnergoLesProm», e-mail: gm.bikbulatova@yandex.ru; **Bashkirov V.N.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, e-mail: vlad_bashkirov@mail.ru; **Sharafutdinov R.I.** – graduate student of the Department of Chemical Technology of Wood, KNRTU, specialist of LLC «EnergoLesProm», e-mail: isk3641@yandex.ru.

УДК 674.81

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНОФРАКЦИОННОГО ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТАРЕЛОК В РЕАКТОРЕ ОТЖИГА

Р.Р. Сафин, Ш.Р. Мухаметзянов, А.В. Сафина

Исследовано влияние различных вариантов перфораций тарелок в реакторе отжига на характеристики торрефицирования разнофракционного древесного сырья перед гранулированием. Установлено, что равномерное распределение плотности сосновой щепы достигается при использовании тарелок с различным по высоте аппарата диаметром перфораций при скорости вращения лопаток 12 оборотов в минуту. Указанные параметры обеспечивают эффективность процесса и способствуют получению торрефицированных пеллет с повышенными теплотворными характеристиками.

Ключевые слова: торрефикация, реактор, перфорации тарелок, пеллеты

Введение

В настоящее время на мировом рынке увеличилось предложение нового вида твердого биотоплива 2-го поколения – торрефицированных пеллет [1]. Торрефикация представляет собой процесс «мягкого»

пиролиза биомассы без доступа воздуха при температурах 200-320 °С и атмосферном давлении. В процессе торрефикации происходит термическая деструкция части органической составляющей биомассы, снижение равновесной влажности готовой продукции, что позволяет получить твердый гидрофобный продукт с повышенными теплотворными характеристиками [2, 3, 4]. Для торрефицированных пеллет в зависимости от условий протекания процесса высшая теплота сгорания может достигать 22 МДж/кг, при том, что для обычных древесных гранул данный показатель не превышает 18 МДж/кг [5, 6].

Торрефицированные пеллеты удобны в обращении, хранении и транспортировке. Они могут храниться даже под открытым небом без опасности гниения, плесневения, разбухания и разрушения [7]. Эти достоинства особенно явно проявляются при совместном сжигании торрефицированных пеллет и угля на ТЭС без каких-либо технических переоснащений [8].

Дополнительной мотивацией для применения торрефикации является высокая экологичность биотоплива, поскольку оно является CO_2 – нейтральным [9, 10].

В процессе производства твердого топлива операция торрефикации может быть использована как на стадии подготовки древесного сырья перед гранулированием, так и на стадии обработки готовых пеллет. Анализ существующих схем производства пеллет выявил перспективность использования схемы «торрефикация – последующее гранулирование». Предварительная термическая обработка позволяет достичь фракционной однородности древесного сырья, повысить гидрофобность биомассы и снизить ее склонность к выветриванию, растрескиванию или самовозгоранию. Это не только значительно упрощает требования к условиям хранения и транспортировки торрефиката, но и оказывает влияние на повышение теплотворной способности топлива [11].

Дальнейшее исследование процесса предварительной термической обработки измельченной древесины и разработка основных конструктивных и технологических параметров оборудования по производству торрефицированных пеллет с целью повышения качественных показателей получаемой продукции, несомненно, представляется актуальным.

В работе [12] отмечается, что однородность термически обработанной сосновой щепы может быть улучшена путем обработки материала в несколько этапов, состоящих из отдельных последовательных предварительных обработок материала при 180, 230 и 270 °С. Так, материал, обработанный при температуре 270 °С, фактически обрабатывается в три этапа: сначала при 180 °С, а затем при 230 °С и 270 °С. Исследования проводились на установке термической обработки с непрерывной подачей сырья, включающей вертикальный реактор с перемешивающими механизмами. Подвод теплоты осуществлялся с помощью шести индивидуально контролируемых ленточных нагревателей, расположенных с внешней стороны реактора. На каждом этапе постепенно увеличивали температуру стенки и поддерживали ее в течение заданного времени до следующего увеличения температуры, добиваясь, таким образом, однородности торрефикации всей партии материала.

Проведенный анализ литературы по технологическим особенностям различных конструкций реакторов [13-16] позволил спроектировать реактор отжига тарельчатого типа, в котором для достижения равномерности термической обработки разнофракционного сырья предложено изменение размера перфораций тарелок по высоте аппарата. В этой связи в работе поставлена задача исследовать процесс термической обработки измельченной древесины и определить рациональные температурные режимы и параметры перфорации тарелок реактора, способствующие как интенсификации процесса, так и достижению равномерности торрефикации различных фракций сырья перед гранулированием.

Материалы и методы

В качестве материалов для изучения влияния предварительной торрефикации древесного сырья на эксплуатационные характеристики получаемых пеллет была подготовлена стружка различных пород древесины, размерами по длине в интервале 4-14 мм, по ширине 0,5-3 мм и по толщине 0,3-1,1 мм. Весь материал был разбит на фракции 4,8,11 и 14 мм древесного сырья.

Термическую обработку измельченного древесного материала проводили на лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 1.

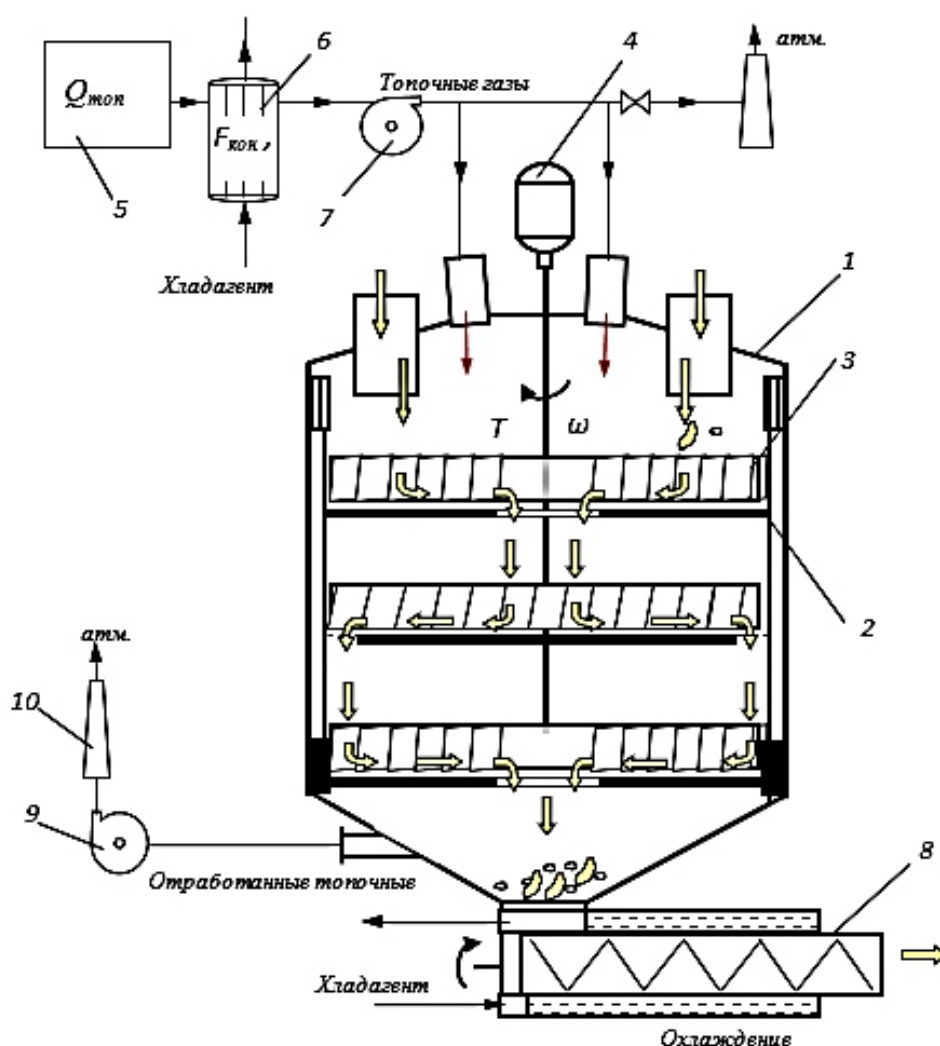


Рис. 1. Схема тарельчатого реактора для термической обработки измельченного древесного сырья в среде топочных газов: 1 – реактор; 2 – тарелка; 3 – мешалка с лопатками; 4 – двигатель; 5 – топка; 6 – теплообменник; 7 и 9 – газодувка; 8 – шнековый питатель; 10 – устройство дожигания и утилизации отходящих газов

В реакторе 1, представляющем собой аппарат цилиндрической формы, размещены тарелки 2 и система вращения мешалок 3, которая приводится в движение с помощью электродвигателя 4. Тарелки закреплены на отдельном внутреннем каркасе и подвергаются постоянной вибрации. Причем в зависимости от расположения тарелки по высоте реактора пересыпное отверстие располагается в центральной (для нечетных тарелок) и периферийной (для четных тарелок) зоне тарелки.

Верхняя часть реактора сообщается с системой получения топочного газа, которая состоит из топочного устройства 5, теплообменника 6 и газодувки 7. В нижней части к реактору примыкает шнековый питатель 8 с рубашкой охлаждения и система газоотвода, включающая газодувку 9 и устройство дожигания и утилизации 10 отработанных газов.

Благодаря вращению мешалки 3 щепа распределяется по верхней тарелке, совершая движение по спирали и стремясь к центральному пересыпному отверстию, при достижении которого сырье сыпается на следующую тарелку и продолжает движение в обратном направлении - к периферийному пересыпному отверстию. Таким образом, происходит пересыпание сырья с верхних тарелок на нижние.

Особенностью реактора является наличие в тарелках перфораций, при этом сумма площадей отверстий для всех тарелок одинакова. В экспериментальных исследованиях в реакторе было установлено 9 тарелок с различными вариантами исполнения: с одинаковой перфорацией и с изменяющимся диаметром перфораций по высоте (от крупного диаметра до мелкого). Диаметр перфораций для каждого варианта представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Диаметр перфорации тарелок для различных вариантов исполнения

№ тарелки	1 верхняя	2	3	4	5	6	7	8	9 нижняя
Вариант 1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Вариант 2	13	13	10	10	7	7	4	4	4

Кроме того, в исследованиях варьировалась скорость вращения лопаток на двух скоростях: вариант А - 6 оборотов в минуту и вариант В - 12 оборотов в минуту.

После попадания в нижнюю часть колонны древесные частицы отводятся из аппарата шнековым питателем 8, где постепенно охлаждается за счет теплопередачи хладагенту рубашки. Понижение температуры материала необходимо с целью предотвращения возможного самовозгорания при контакте с кислородом воздуха. После охлаждения обработанный материал выгружается для дальнейших исследований.

Для проведения последующих испытаний были изготовлены пеллеты из термически обработанной измельченной древесины различных фракций. Прессование брикетов осуществляли с помощью пресса в специальных пресс-формах. Полученные образцы торрефицированного твердого топлива были проанализированы на теплотворную способность на калориметре ИКА С200.

Результаты

В результате проведенных исследований были получены графики изменения средних плотностей различных фракций измельченного древесного сырья для вариантов тарелок с одинаковой перфорацией и с изменяющимся диаметром перфораций по высоте ректора (рис. 2).

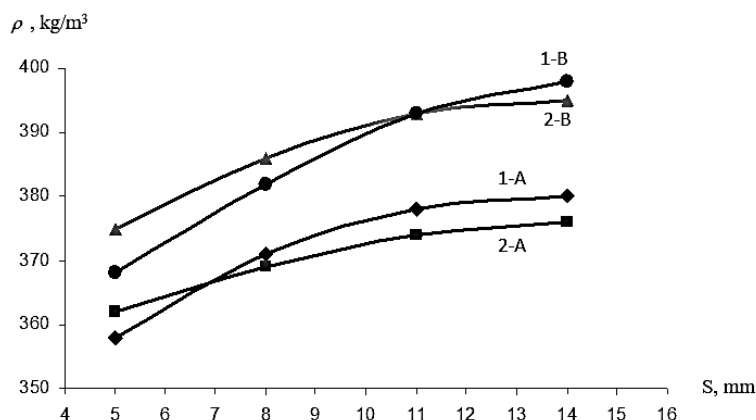


Рис. 2. Изменение средней плотности различных фракций измельченного древесного сырья: 1 – при использовании тарелок с одинаковым диаметром перфораций; 2 – при использовании тарелок с различным диаметром перфораций; А - при скорости вращения лопаток 6 об/мин; В - при скорости вращения лопаток 12 об/мин

Анализируя варианты использования тарелок (1, 2), видно, что наиболее равномерное распределение плотности разнофракционного состава щепы достигается при использовании тарелок с различным диаметром перфораций (вариант 2). В связи с этим, была предложена схема расположения тарелок с крупной перфорацией в верхней части реактора с уменьшением до более мелких в центральной и нижней частях. При этом сумма площадей отверстий для всех тарелок одинакова. Подобная схема позволяет более мелким фракциям сырья, не задерживаясь на верхних тарелках, просыпаться на нижележащие через крупные перфорации верхних тарелок. Таким образом, время пребывания в реакторе мелких фракций уменьшается и достигается равномерная степень термической обработки всей партии древесных частиц.

Анализ изменения характера кривых при различных скоростях вращения лопаток (варианты А, В) свидетельствует о том, что более равномерная степень обработки достигается так же при использовании различных перфораций тарелок. Однако на меньших скоростях вращения лопаток (вариант А)

происходит снижение производительности, поскольку даже мелкие частицы вынуждены максимальное количество времени пребывать в реакторе. Увеличение скорости вращения лопаток (вариант В) приводит к небольшому увеличению неравномерности обработки щепы на тарелках, как с равным, так и с изменяющимся диаметром перфораций. Но использование тарелок с различным диаметром перфораций при скорости вращения лопаток 12 оборотов в минуту (2-В) позволяет более мелким фракциям сырья, не задерживаясь на верхних тарелках, просыпаться на нижележащие через крупные перфорации верхних тарелок. Вследствие этого, снижается время пребывания в реакторе мелких фракций при равномерной обработке крупных фракций сырья. Такой режим перемещения щепы обеспечивает не только равномерность обработки разнофракционного сырья, но и способствует повышению производительности реактора

Далее в работе были исследованы теплотворные характеристики пеллет, полученных по схеме «торрефикация - последующее гранулирование» (рис. 3). Анализу подвергались 2 вида гранул. В первом случае пеллеты были получены из древесного сырья, подвергнутого торрефикации на тарелках с одинаковой перфорацией, во втором – на тарелках с различным диаметром перфораций. Скорость вращения лопаток в обоих случаях составляла 12 оборотов в минуту.

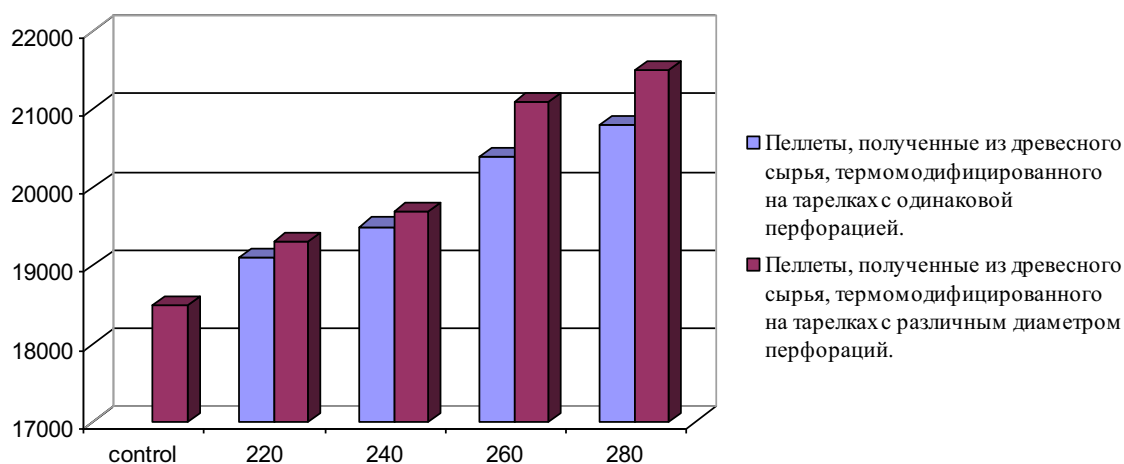


Рис. 3. Высшая теплота сгорания пеллет в зависимости от температуры обработки

Установлено, что для всех видов гранул с ростом температуры обработки наблюдается заметное увеличение теплоты сгорания. Однако, как видно из графика, большей теплотворной способностью обладают пеллеты, полученные из древесного сырья, термическая обработка которого проводилась при использовании тарелок с меняющимися размерами перфораций. Это объясняется более равномерным распределением плотности фракционного состава древесного сырья при термической обработке.

Более низкая теплота сгорания характерна для пеллет, изготовленных из щепы, термическая обработка которой осуществлялась на тарелках с равной перфорацией. Как видно из рисунка 2, при высоких скоростях вращения лопаток часть сырья крупной фракции имеет низкую степень термической обработки, что, в конечном счете, и влияет на снижение теплотворной способности конечного продукта. Учитывая, что крупная фракция имеет в весовом эквиваленте большую долю, то равномерность термической обработки имеет существенное влияние на энергетические характеристики торрефицированных пеллет.

Исходя из вышесказанного, целесообразным представляется проектирование реактора отжига тарельчатого типа с изменяющимся диаметром перфораций и средней скоростью вращения лопаток 12 оборотов в минуту. Причем, для достижения равномерности термической обработки разнофракционного сырья предложена вариация размеров перфораций тарелок по высоте аппарата: от крупных на верхних тарелках до более мелких в центральной и нижней частях колонны.

Проведенные исследования установили целесообразность использования предложенной конструктивной схемы реактора тарельчатого типа, обеспечивающей равномерную термическую обработку древесного сырья перед гранулированием, что позволит в последующем получить твердое биотопливо с повышенными теплотворными характеристиками.

Заключение

Анализ существующих конструкций оборудования для получения торрефицированных пеллет по схеме «торрефикация – последующее гранулирование» позволил спроектировать реактор отжига тарельчатого типа, основной особенностью которого является характер перемещения сырья.

В результате проведенных исследований установлено, что равномерность термической обработки разнофракционного древесного сырья достигается при использовании в реакторе тарелок с различным диаметром перфораций. Причем, диаметр перфораций постепенно изменяется по высоте аппарата: от крупных на верхних тарелках до более мелких в центральной и нижней частях колонны. Увеличению производительности и экономической эффективности процесса способствует и увеличение скорости вращения лопаток, поскольку сокращается время пребывания в реакторе мелких фракций и, тем самым, достигается равномерность термомодифицирования разнофракционного состава щепы.

Экспериментальные исследования влияния режимов обработки на энергетические характеристики твердого топлива показали, что с ростом температуры обработки наблюдается заметное увеличение теплоты сгорания древесных пеллет. При этом подтверждена эффективность использования в реакторе тарелок с различным диаметром перфораций, поскольку равномерная термическая обработка древесного сырья способствует в дальнейшем получению пеллет с повышенными теплотворными характеристиками.

Работа выполнялась при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2246.2020.8).

Литература

1. Kumar L, Koukoulas A, Mani S and Satyavolu J. Integrating Torrefaction in the wood pellet industry: A critical review energy fuels. – 2017. – № 31. – pp. 37-54.
2. Safin R.R., Shaikhutdinova A.R., Khasanshin R.R., Akhunova L.V., Safina A.V. Improving the energy efficiency of solid wood fuel. 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. Sofia, 2015. pp. 315-322.
3. Herrera-Díaz R, Sepúlveda-Villarreal V, Pérez-Peña N, Salvo-Sepúlveda L, Salinas-Lira C, Llano-Ponte R and Ananías R. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. Drying Technology. 2018. №. 36. pp. 537-544.
4. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste. В сборнике: Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. 7414929.
5. Shayakhmetova A.H., Nazipova F.V., Safin R.R., Timerbaeva A.L. and Safina A.V. Alternative types of solid biofuels and their comparative characteristics. Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 15th.) 2015. pp. 53-58
6. Garba M, Gambo S, Musa U, Tauheed K, Alhassan M and Adeniyi O. Impact of torrefaction on fuel property of tropical biomass feedstocks. Biofuels. 2018. № 9. pp. 369-377
7. Bergman P. Combined torrefaction and pelletization the TOP process. Energy Research Centre of the Netherlands (Netherlands, ECN-C-05-073). 2005.
8. Wang Ch and Yan J. Wang feasibility analysis of wood pellets production and utilization in China as a substitute for coal. International Journal of Green Energy. 2005. № 2. pp. 91-107
9. Лыжина Н.В., Сафина А.В., Хворова Е.В. Специфика оценки экономической эффективности и стимулирования инвестиций в инновационные проекты нефтегазохимического комплекса. Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 14. С. 283-288.
10. Hall W. Assessment of carbon dioxide emissions reductions achievable by using torrefaction. Journal of the Energy Institute 2012. № 85. pp. 103-113
11. Xie T, Reddy K, Wang Ch, Yargicoglu E and Spokas K. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review critical reviews in environmental. Science and Technology. 2015. № 45. pp. 939-969
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. Ghiasi B, Kumar L, Furubayashi T, Lim C, Bi X, Kim C and Sokhansanj S. Densified biocoal from wood chips: Is it better to do torrefaction before or after densification? *Energy*. 2014. № 134. pp. 133-142
14. Westover T, Phanphanich M, Clark M, Rowe Sh, Egan S, Zacher A and Santosa D. Impact of thermal pretreatment on the fast pyrolysis conversion of southern pine. *Biofuels*. 2013. № 4. pp. 45-61
15. Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю., Воронин А.Е., Зиатдинов А.Р., Сабиров А.Т. Способ сушки и термической обработки древесины. Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2009. № 5 (19). С. 82-87.
16. Karoor L, Bose D and Mekala A. Biomass pyrolysis in a twin-screw reactor to produce green fuels. *Biofuels*. 2020. № 11. pp. 101-107
17. Установка для переработки отходов древесных производств. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Оладышкина Н.А., Разумов Е.Ю., Хасаншин Р.Р., Кайнов П.А., Кузьмин И.А., Мазохин М.А., Шайхутдинова А.Р., Ахтямова Т.Н., Воронин А.Е. Патент на изобретение RU 2425305 C1, 27.07.2011. Заявка № 2010108198/06 от 04.03.2010.

© Сафин Р.Р. - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ») e-mail: cfaby@mail.ru; Мухаметзянов Ш.Р. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: joker775.87@mail.ru; Сафина А.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Архитектура и дизайн изделий из древесины», ФГБОУ ВО «КНИТУ», e-mail: alb_saf@mail.ru.

UDC 674.81

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF DIFFERENT - FACTIONAL WOOD RAW MATERIALS WHEN CHANGING THE DESIGN FEATURES OF PLATES IN THE ANNEALING REACTOR

R.R. Safin, Sh.R. Mukhametzyanov, A.V. Safina

We have studied the impact of a disc type reactor design features on the uniformity of different -fraction wood raw materials heat treatment before granulation. It was found that a uniform distribution of the pine chips density is provided by using plates with different hole diameters across the height of the device at the blades rotation rate of 12 rpm. These parameters ensure the efficiency of the process and contribute to production of torrefied pellets with improved calorific characteristics.

Keywords: torrefaction, reactor, plate perforations, pellets

References

1. Kumar L, Koukoulas A, Mani S and Satyavolu J. [Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: Kumar L, Koukoulas A, Mani S and Satyavolu J. Integrating Torrefaction in the wood pellet industry: A critical review energy fuels. – 2017. – № 31. – pp. 37-54.
2. Safin R.R., Shaikhutdinova A.R., Khasanshin R.R., Akhunova L.V., Safina A.V. Improving the energy efficiency of solid wood fuel. 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. Sofia, 2015. pp. 315-322.
3. Herrera-Díaz R, Sepúlveda-Villarreal V, Pérez-Peña N, Salvo-Sepúlveda L, Salinas-Lira C, Llano-Ponte R and Ananías R. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. *Drying Technology*. 2018. №. 36. pp. 537-544.
4. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. Tuntsev D.V., Safin R.R., Hismatov R.G., Halitov R.A., Petrov V.I. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste. В сборнике: Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. 7414929.
5. Shayakhmetova A.H., Nazipova F.V., Safin R.R., Timerbaeva A.L. and Safina A.V. Alternative types of solid biofuels and their comparative characteristics. Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 15th.) 2015. pp. 53-58
6. Garba M, Gambo S, Musa U, Tauheed K, Alhassan M and Adeniyi O. Impact of torrefaction on fuel property of tropical biomass feedstocks. *Biofuels*. 2018. № 9. pp. 369-377

7. Bergman P. Combined torrefaction and pelletization the TOP process. Energy Research Centre of the Netherlands (Netherlands, ECN-C-05-073). 2005.
8. Wang Ch and YanJ. Wang feasibility analysis of wood pellets production and utilization in China as a substitute for coal. International Journal of Green Energy. 2005. № 2. pp. 91-107
9. Lyzhina N. V., Safina A.V., Khvorova E. V. Specifics of assessing economic efficiency and stimulating investment in innovative projects of the petrochemical complex. Bulletin of the Kazan Technological University.– 2011.– No. 14. pp. 283-288. (InRuss.).
10. Hall W. Assessment of carbon dioxide emissions reductions achievable by using torrefaction. Journal of the Energy Institute 2012. № 85. pp. 103-113.
11. Xie T, Reddy K, Wang Ch, Yargicoglu E and Spokas K. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review critical reviews in environmental. Science and Technology. 2015. № 45. pp. 939-969
12. Timerbayev N. F., Safina A.V., Arslanova G. R., Ziatdinova D. F. Improving the energy efficiency of the extraction process. News of higher educational institutions. Energy problems. – 2017. – Vol. 19. –No. 5-6. pp. 35-40. (InRuss.).
13. Ghiasi B, Kumar L, Furubayashi T, Lim C, Bi X, Kim C and Sokhansanj S. Densified biocoal from wood chips: Is it better to do torrefaction before or after densification? Energy. 2014. № 134. pp. 133-142
14. Westover T, Phanphanich M, Clark M, Rowe Sh, Egan S, Zacher A and Santosa D. Impact of thermal pretreatment on the fast pyrolysis conversion of southern pine. Biofuels. 2013. № 4. pp. 45-61
15. Safin R. R., Razumov E. Yu., Voronin A. E., Ziatdinov A. R., Sabirov A. T. [Method of drying and heat treatment of wood. Questions of modern science and practice.] V. I. Vernadsky University. – 2009. – No. 5 (19). – pp. 82-87. (InRuss.).
16. Kapoor L, Bose D and Mekala A. [Biomass pyrolysis in a twin-screw reactor to produce green fuels] Biofuels. – 2020. – № 11. – pp. 101-107
17. Installation for processing wood waste. Safin R. R., Safin R. G., Oladyshkina N. A., Razumov E. Yu., Khasanshin R. R., Kainov P. A., Kuzmin I. A., Mazokhin M. A., Shaikhutdinova A. R., Akhtyamova T. N., Voronin A. E. Patent for invention RU 2425305 C1, 27.07.2011. Application no. 2010108198/06 dated 04.03.2010. (InRuss.).

© **Safin R.R.** – Grand PhD in Engineering sciences, Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (KNRTU), e-mail: cfaby@mail.ru; **Mukhametzyanov Sh.R.** – PhD in Engineering sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Design of Wood Products, KNRTU, e-mail: joker775.87@mail.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.

Уважаемые авторы и читатели журнала «Деревообрабатывающая промышленность»!

Благодарим за интерес, проявленный к нашему Журналу.

Если Вы автор и намерены опубликовать свою статью в нашем журнале, в целях ускорения процесса редактирования, публикации и распространения вашего материала Вам необходимо ознакомиться с «Требованиями для авторов». При подготовке рукописи статьи к отправке в редакцию автору (соавторам) следует руководствоваться изложенными требованиями и условиями.

При этом обращаем Ваше внимание на то, что редакция не принимает Вашу статью к рассмотрению, если:

- статья оформлена (представлена) с нарушением требований, изложенных в данных Правилах;
- автором (соавторами, правообладателями) не переданы Издательству необходимые авторские права на использование произведения (статьи);

**Авторы, направляющие статьи в журнал,
должны соблюдать следующие требования**

УДК 721.05 (Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю)

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (НАЗВАНИЕ СТАТЬИ ПРОПИСНЫМИ БУКВАМИ, ШРИФТ TIMES NEW ROMAN, КЕГЛЬ – 16, ВЫРАВНИВАНИЕ ПО ЛЕВОМУ КРАЮ ПОЛУЖИРНЫМ ШРИФТОМ)

И. О. Фамилия авторов (инициалы и фамилия авторов Шрифт Arial, кегль – 9, выравнивание по левому краю полужирным шрифтом. Например, И.И. Иванов)

*Аннотация является кратким изложением большей по объему работы. Она отражает научное содержание статьи, содержит сведения о решаемой задаче, методах решения, результатах и выводах. Аннотация не должна содержать рисунки, формулы, литературу и источники финансирования и ссылки на них. Рекомендуемый объем аннотации не менее 1000 букв. **Ключевые слова:** не менее 4 слов или словосочетаний, каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой. (Шрифт Times New Roman, кегль – 9, курсив, выравнивание по ширине, отступ справа и выступ слева – 1 см)*

Введение

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word. Статьи, представляющие результаты исследований, должны включать разделы: «Введение», «Методы и материалы», «Результаты», «Заключение», «Литература». Обзорные статьи также должны быть структурированы и состоять из разделов: «Введение», «Обзор исследований в области...», «Заключение», «Литература». Макет журнала – одноколоночный, с параметрами страницы: верх -3 см, низ -2,5 см, левое поле – 1,8 см, правое поле – 1,8 см

Десятичные цифры набираются только через запятую, а не через точку (0,25 вместо 0.25). Основной шрифт статьи «Times New Roman», размер шрифта — 11 кегль через 1 интервал, выравнивание по ширине. Абзац — 0,75 см.

Название параграфа

Формулы в статье набираются с использованием встроенного редактора формул MS Word 2007, курсивом. Использование букв кириллицы в формулах не рекомендуется. Расшифровка обозначений, принятых в формуле, производится в порядке их использования в формуле.

Все формулы желательно пронумеровать, но допустимо нумеровать лишь упоминаемые в тексте. Формулу следует располагать по центру строки, а ее номер по правому краю основного текста и заключать в круглые скобки.

Пример оформления формул

$$R = \frac{204,1187 - 9,797\tau - 1,58t + 0,1386\tau^2 + 0,0031t^2 + 0,0378\tau \cdot t}{1 - 0,056\tau - 0,0081t + 0,00067\tau^2 + 1,66 \cdot 10^{-5}t^2 + 0,00025\tau \cdot t} \quad (1)$$

Название параграфа

Рисунки и таблицы необходимо приводить после упоминания их в тексте.

Таблицы нумеруются в порядке упоминания их в тексте, нумерация сквозная (шрифт - Times New Roman, кегль – 11, для объемных – 11 и 12.). Все графы таблицы должны иметь заголовки, сокращение слов в таблицах не допускается (кроме общепринятых). Отсутствие данных обозначается прочерком (–). Названия таблиц размещаются над ними, выравниванием по ширине и выделяются полужирным шрифтом (шрифт названия таблиц – Arial, кегль - 8). Подписуемая надпись выравнивается по ширине текста (шрифт названия таблиц – Arial, кегль - 8). Точка в конце подписуемой надписи не ставится. Цвет рисунков – черно-белый. Рисунки должны быть качественными, **сканированные картинки не принимаются!**

При ссылках на рисунки и таблицы в тексте статьи необходимо указывать аббревиатуру «рис. 1» или «табл. 1».

Пример оформления таблиц

Таблица 1 – Название таблицы

Заголовок	Заголовок		
	Подзаголовок	Подзаголовок	Подзаголовок
Текст	Текст	Текст	Текст
Текст	Текст	Текст	Текст
Текст	Текст	Текст	Текст

Пример оформления рисунков

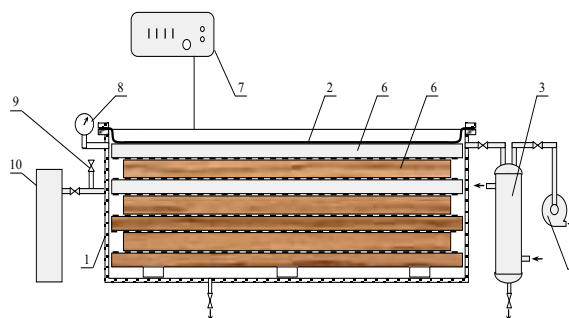


Рис. 1. Название рисунка: 1 – позиция 1; 2 – позиция 2

Заключение

Приводятся выводы по работе, рекомендации по использованию полученных результатов.

Здесь же при необходимости курсивом указывается источник финансирования исследования или благодарности.

Литература

В списке библиографических ссылок приводятся только источники, на которые автор ссылается в тексте. Список литературы составляется в порядке цитирования в работе, все указанные источники нумеруются. Ссылки на цитируемые источники в тексте статьи приводятся в виде цифр, соответствующих номеру работы в списке литературы, заключенных в квадратные скобки. Пример оформления ссылок на цитируемые источники: [1], [1, 2], [1-4]. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Рекомендуется использовать не менее 15 источников.

Ссылку на источник необходимо приводить на том языке, на котором он был опубликован.

Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.05-2008.

© **Фамилия И.О. автора** – ученая степень, ученое звание, должность, наименование кафедры наименование организации, адрес электронной почты (шрифт - Times New Roman, кегль – 10, фамилия и инициалы выделяются полужирным шрифтом)

Данные на английском языке располагаются в конце статьи и следуют в том же порядке и с тем же форматированием, как в варианте на русском языке (УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы и сведения об авторах на английском языке)

UDC

PAPER TITLE

Authors Name/s per

Автор должен представить аннотацию на английском языке. В тексте аннотации на английском языке следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов. Следует избегать употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных терминов. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах резюме.

Key words: *приводится перевод ключевых слов или словосочетаний, каждое ключевое слово или словосочетание отделяется от другого запятой.*

References

Схема библиографического описания статьи с переводом заглавия на английский язык: - авторы (транслитерация); - [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках]; - Название русскоязычного источника (транслитерация); [Перевод названия источника на английский язык]; - Выходные данные с обозначениями на английском языке; - Указание на язык статьи (In Russ.) после описания статьи. (Шрифт - Times New Roman, кегль – 11, выравнивание по ширине)

© **Authors Name/s per dept.** - academic degree, academic title, position, name of organization, e-mail address

