



СОВРЕМЕННАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

**MODERN PULP AND PAPER INDUSTRY. CURRENT
CHALLENGES AND PROMISING SOLUTIONS**

**Материалы
VII Международной научно-технической конференции
учёных и специалистов ЦБП**



**Санкт-Петербург
2025**

МИНОБРНАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

PULPFor 2025



**ВШ
ТЭ**

ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ



Материалы
VII Международной научно-технической конференции
учёных и специалистов ЦБП

**«СОВРЕМЕННАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ
И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ»**

24 – 25 ноября 2025 г.



Санкт-Петербург
2025

УДК 676 (665+378+628)+674.8+502.17

ББК 65.9(2)304.18

С 568

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ТЦКМ Э. Л. Аким; д-р техн. наук, проф. кафедры ТЦКМ Л. Г. Махотина; д-р техн. наук, зав. кафедрой ПиАХТ Н. П. Мидуков; д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой ОХ Ю. Г. Тришин; канд. хим. наук, директор Института технологии А. В. Лоренцсон; канд. техн. наук, зам. директора Института технологии И. В. Ключкин; канд. техн. наук, доц. кафедры ПТЭ С. Н. Смородин; канд. техн. наук, зав. кафедрой ПМИ И. В. Ремизова; канд. техн. наук, зав. кафедрой ООСиРИПР О. А. Шанова; канд. техн. наук, доц. кафедры ТБиК Е. И. Симонова; канд. хим. наук, доц. кафедры ФиКХ Е. Ю. Демьянцева; канд. техн. наук, доц. кафедры МАС В. А. Марков; канд. техн. наук, доц. кафедры ООСиРИПР А. В. Епифанов; канд. техн. наук, доц. кафедры АЭиЭ О. А. Кундюков; канд. хим. наук, доц. кафедры ФиКХ И. И. Осовская; канд. хим. наук, доц. кафедры ООСиРИПР Ю. Л. Морева; канд. техн. наук, доц. кафедры ТСУиТД Ю. В. Волков; доц. кафедры дизайна интерьера и оборудования Е. Ю. Лобанов; ст. препод. кафедры ООСиРИПР Е. А. Васильева

С 568 Материалы VII Международной научно-технической конференции учёных и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (Санкт-Петербург, 24 – 25 ноября 2025 года) / Отв. ред.: О. В. Фёдорова, О. В. Запольская. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. — 169 с.
ISBN 978-5-91646-459-7

В сборнике материалов размещены доклады научно-технической конференции, представленные студентами, аспирантами, учёными и специалистами целлюлозно-бумажной промышленности России, Узбекистана, ведущими фундаментальные и прикладные научные исследования. Конференция посвящена проблемам современного состояния целлюлозно-бумажной промышленности.

Представленные доклады освещают пять основных тем:

- Технологии и оборудование ЦБП;
- Охрана окружающей среды и энергосбережение;
- Проблемы применения профессиональных стандартов;
- Условия внедрения наилучших доступных технологий;
- Цифровизация и кибербезопасность.

Сборник предназначен тем, кто интересуется современными технологиями и методами исследования в различных отраслях науки.

УДК 676 (665+378+628)+674.8+502.17

ББК 65.9(2)304.18

ISBN 978-5-91646-459-7

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ЦБП

Балыбердин К. И., Казаков Я. В., Романов М. Е. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск; ООО «БКТ-Сервис», Санкт-Петербург Перспективные решения для создания специальных видов бумаги и картона.....	7
Бутусов В. Д., Смирнова Е. Г. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Анализ процесса обезвоживания в сеточной части плоскосеточной БДМ.....	13
Васильев И. Ю. Московский политехнический университет, Москва Влияние рецептуростроения биокомпозиционных материалов на их фотодеструкцию.....	19
Васильев И. Ю. Московский политехнический университет, Москва Биокомпозиционные материалы на основе полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом.....	24
Васильев И. Ю. Московский политехнический университет, Москва Повышение адгезионной прочности многослойных пленок в технологии экструзионного ламинирования.....	30
Казаков В. Г., Громова Е. Н., Максимов В. С. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Тенденции модернизации цикла регенерации щелока в сульфатном производстве целлюлозы.....	36
Зайцев А. В., Дубовый В. К. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Разработка технологии получения полимерпесчаных плит на основе отходов макулатурного производства.....	41
Королько А. С., Королько Н. С. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург Заготовка балансовой древесины канатными установками в ходе лесохозяйственных мероприятий.....	46
Макаров Р. С., Ерохина О. А., Аким Э. Л. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Использование пластификатора для получения композиционного материала.....	52

Мельничук М. С., Анисимова О. С., Демьянцева Е. Ю., Дубовый В. К. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Оптимизация водно-щелочной обработки сульфатной беленой целлюлозы для повышения качества материала, предназначенного для химической переработки.....	58
Никешин В. Г., Сидельников В. И. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Теоретические аспекты разработки МРС-системы для управления процессом варки щепы в целлюлозно-бумажном производстве.....	62
Обухова И. А., Кокшаров А. В., Пименов С. Д., Трапезникова И. Н., Сиклицкий В. И. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова; ЦБП группы «ИЛИМ», Коряжма; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт- Петербург Параметры молекулярных связей, деконволюция образцов крафт-бумаги, произведенной на целлюлозно-бумажном комбинате группы «ИЛИМ», г. Коряжма.....	67
Орехов Е. В., Митилинеос А. Г., Смирнова Е. Г., Казакевич Ю. Е. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург; ООО Аквафор, Санкт-Петербург Разработка угленаполненных фильтровальных картонов и исследование их сорбционных и гидродинамических свойств.....	73
Ромашева М. М., Демьянцева Е. Ю., Селянкин М. А., Смит Р. А. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Влияние условий кислотного гидролиза на состав и качество гидролизатов лигноцеллюлозных остатков сельскохозяйственного происхождения.....	79
Симонова Е. И., Зайцев В. В., Дубовый В. К. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Влияние параметров низкотемпературной щелочной обработки на свойства волокнистых полуфабрикатов из недревесного растительного сырья.....	83
Суслов В. А. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург Регенеративные подогреватели выпарных станций.....	87
Лунева Т. О., Дубовый В. К., Савилов С. В. Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва Исследование влияния композиции по волокну на свойства целлюлозно- гидрогелевого композита.....	93
Урозова Д. Д., Казаков Я. В. Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск Оптимизация технологии переработки рисовой соломы для получения из нее бумажной массы.....	98

Раздел 2. УСЛОВИЯ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Васильев М. В., Назарова А. Н.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Методологические основы и условия эффективного внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) при рекультивации отработанных карьеров с применением отходов V класса опасности.....104

Ившин С. Ю.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Интеграция логистического аутсорсинга в стратегию внедрения наилучших доступных технологий на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности: эффективность, барьеры, перспективы.....110

Шифрин Б. М., Иванов Н. А., Лисовский И. К., Калимуллин Д. В.

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

Применение нечеткой логики для оптимизации горячего прессования фанеры.....116

Раздел 3. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Громова Е. Н., Иванов В. В.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Разработка рациональной схемы использования низкопотенциальной теплоты в сушильных частях БДМ.....122

Исаев Е. А., Сергеев Н. С., Ерохина О. А., Васильев И. Ю., Аким Э. Л.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург; Московский политехнический университет, Москва

Исследование биоразлагаемости композиционных материалов с полиэтиленом, наполненным арабиногалактаном.....127

Колесников Р. В.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Исследование российской системы обращения с отходами картона и бумаги и их возвращение в экономический оборот.....133

Копыльцов Ю. А., Добряков Ю. Г.

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург

Применение парофазного источника газовых смесей сероводорода для задач экологического контроля на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.....141

Дягилева А. Б., Смирнова А. И., Пилецкая А. С.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Роль лесопромышленного комплекса в системе регулирования техногенеза.....147

Янченко А. С., Колесников Р. В.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Оценка экономической целесообразности переработки отходов отщепа целлюлозно-бумажной промышленности151

Свойкин Ф. В., Россихин К. В., Фролов И. С., Игнатова Е. И.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург;

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,

Санкт-Петербург

Модульная платформа современных отечественных лесных машин на пневматиках сверхнизкого давления.....156

Раздел 4. ЦИФРОВИЗАЦИЯ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

Ильина О. В.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

Цифровой промышленный дизайн в современной индустрии.....163

Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ЦБП

УДК 66.0
ГРНТИ 66.55

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ БУМАГИ И КАРТОНА

К. И. Балыбердин*, Я. В. Казаков, М. Е. Романов

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск;
ООО «БКТ-Сервис», Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: konstantinbalyberdin54@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования влияния антипирена на основе водорастворимой соли полифосфорной кислоты на огнестойкость и механические свойства картона-лайнера. Основной целью работы стало определение возможности повышения огнестойкости картона без существенного ухудшения его прочностных и деформационных характеристик. Результаты показали, что в отличие от контрольных образцов, которые быстро загорались и сгорали, с активным распространением огня по поверхности, образцы, обработанные антипиреном, воспламенялись медленнее, формировали плотный обугленный слой и горели локально, без распространения пламени по всей площади. Образование такого «защитного барьера» – ключевой фактор повышения огнестойкости, поскольку он физически изолирует негоревшую часть материала от теплового воздействия и кислорода. Анализ механических свойств выявил, что сопротивление сжатию кольца (RCT) немного возросло у обоих типов картона после обработки антипиреном, разрывная длина относительно контрольных образцов снизилась незначительно, что свидетельствует о сохранении эксплуатационной прочности. Таким образом, использованный антипирен на основе полифосфорной кислоты может быть рекомендован для промышленного применения в производстве огнестойкого картона-лайнера без критических потерь механической прочности, обеспечивая баланс между пожарной безопасностью и функциональными характеристиками упаковочного материала.

Ключевые слова: антипирены, крафт-лайнер, тест-лайнер деформационные свойства, полифосфорная кислота, межволоконные связи, огнестойкость, термическая стабильность.

Картон-лайнер в современном мире стал не просто материалом для изготовления упаковки, а ключевым элементом устойчивой экономики. Он сочетает в себе такие качества, как доступность, прочность и возможность переработки. Постоянные исследования по его модификации подтверждают, что этот традиционный материал продолжает развиваться, адаптируясь к современным требованиям.

Однако, несмотря на все преимущества, картон является легко воспламеняемым материалом, этот недостаток представляет опасность в условиях складирования, транспортировки или эксплуатации продукции [8]. С развитием требований пожарной безопасности – особенно в строительстве, логистике и при упаковке чувствительных товаров, для предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) все актуальнее становится задача по улучшению и созданию специальных видов бумаги и картона, обладающих огнестойкостью.

Одним из наиболее эффективных и технологически реализуемых решений является внедрение антипиренов (химических веществ, замедляющих процесс возгорания и распространения пламени) в технологическую линию производства. Их применение в сфере ЦБП позволит расширить сферу использования картона и бумаги за счет соответствия нормам пожарной безопасности [1, 2]. Однако введение инородных химических веществ, из которых

состоит антипирен, может инициировать физико-химические изменения в волокнистой структуре картона, влияя на прочность межволоконных связей и реологические свойства материала, что требует комплексной оценки совместимости реагента с технологическим процессом и эксплуатационными характеристиками картона.

В качестве антипирена был выбран состав водорастворимой соли полифосфорной кислоты в комплексе с аммиаком – это негалогеновый антипирен, действующий по механизму вспучивания. При тепловом воздействии данный антипирен разлагается на полимерную фосфатную кислоту и аммиак. Кислота реагирует с гидроксильными группами целлюлозы с образованием нестабильного фосфатного эфира, после обезвоживания которого на поверхности материала образуется углеродная пленка, действующая как изоляционный слой [1, 4, 9].

Стоит отметить, что антипирены на основе фосфорной кислоты широко применяются в различных пластмассах, полиэстере и резине [9].

Для исследований использовали образцы тест-лайнера из вторичных и крафт-лайнера из первичных волокон, массой соответственно 155 г/м² и 135 г/м² и площадью $\approx 0,06$ м². 20 %-й водный раствор антипирена с расходом 10 % от массы абсолютно сухого вещества (а.с.в.) наносили с помощью кисти, после чего опытные образцы подвергались процессу сушки на лабораторной сушилке при 92–95 °С в течение 15–20 минут. Для минимизации усадки и коробления в процессе сушки, образцы прижимали к греющей поверхности натянутым сукном.

Испытания на огнестойкость проводили по ГОСТ Р 50810-95 [3]. Результаты представлены в таблице 1. Перед испытаниями все образцы кондиционировали в стандартных условиях (температура (23 ± 1) °С и относительная влажность воздуха (50 ± 2) %).

Таблица 1 – Результаты испытаний картона-лайнера на огнестойкость

Характеристика	Тест-лайнер, 155 г/м ²			Крафт-лайнер, 135 г/м ²		
	до	после	% от исх	до	после	% от исх
Минимальное время воспламенения, с	3,0	7,0	133	3,5	10,0	217
Время остаточного горения, с	45	65	44	50	35	-33
Средняя длина обугливания, мм	–	175	–	–	165	–

Визуальные наблюдения и измерение временных показателей образцов, обработанных антипиреном, показали, что огнестойкость обоих видов картона – тест-лайнера и крафт-лайнера значительно повысилась. У тест-лайнера минимальное время воспламенения увеличилось с 3,0 до 7,0 секунд, или на 133 %, у крафт-лайнера с 3,5 до 10,0 секунд, или 217 % от исходного значения измеряемой величины. Данные показатели свидетельствуют о высокой эффективности антипирена, особенно это заметно на образцах крафтлайнера, которые после обработки продемонстрировали наиболее значительный прирост огнестойкости.

Кроме того, изменилось время остаточного горения (время горения после удаления источника пламени), у тестлайнера оно увеличилось с 45 до 65 секунд (+44 %), а у крафтлайнера сократилось с 50 до 35 секунд (-33 %). Это указывает на то, что антипирен не только замедляет воспламенение, но и изменяет характер горения [5]. В крафт-лайнере он способствует более быстрому самозатуханию, вероятно, за счет более интенсивного образования защитного углеродистого слоя [7], который препятствует доступу кислорода и тепла к горючей основе, тогда как у тест-лайнера горение наблюдалось чуть дольше, но скорость распространения огня по поверхности заметно снизилась.

Средняя длина обугливания, измеренная после испытаний, составила 175 мм для тест-лайнера и 165 мм для крафт-лайнера, что указывает на равномерность процесса обугливания и стабильность защитного слоя по всей ширине образца. Несмотря на то, что происходит

обугливание, целлюлозная структура не разрушается полностью, это подтверждается тем, что материал частично сохраняет механическую целостность и прочность даже после горения [10].

Увеличение времени воспламенения и формирование защитного обугленного слоя происходят за счет каталитического действия фосфорсодержащего соединения, входящего в состав антипирена [10]. При нагревании фосфорсодержащее вещество вступает в реакцию с гидроксильными группами целлюлозных волокон, что приводит к дегидратации и образованию термостабильных фосфатных эфиров. Эти соединения снижают скорость термического разложения целлюлозы, способствуя формированию углеродистого каркаса вместо летучих горючих продуктов. При этом полимерная структура волокон частично сохраняется, что обеспечивает не только огнезащиту, но и сохранение механической прочности материала после воздействия огня [6].

Результаты измерения физических и прочностных характеристик испытанных образцов тест-лайнера (ТЛ), 155 г/м², и крафт-лайнера (КЛ), 135 г/м², представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения ключевых характеристик картона-лайнера до и после обработки антипиреном

Характеристика	MD/ CD	Крафт-лайнер			Тест-лайнер		
		до	после	% от исх.	до	после	% от исх.
Толщина, δ , мкм	–	205	219	+7	248	267	+8
Плотность, ρ , г/см ³	–	0,65	0,66	+2	0,63	0,61	-3
Фактическая масса 1 м ² , m , г	–	134	145	+8	157	163	+4
Абсолютное сопротивление продавливанию, $P_{абс}$, кПа	–	682	628	-8	294	309	+5
Сопротивление сжатию кольца, RCT , Н	CD	236	240	+2	294	346	+18
Разрывная длина, L , м	MD	12200	11000	-10	4750	4100	-14
	CD	3930	3200	-19	2900	2500	-14

Контрольные образцы крафт-лайнера, несмотря на разницу в массе 1 м², обладают более высоким уровнем прочностных свойств по сравнению с образцами тест-лайнера. У образцов, обработанных раствором антипиреном, вносятся поправки в величину плотности, т. к. их толщина увеличивается за счет введения химиката.

Проведенный сравнительный анализ выявил существенные различия в реакции тест-лайнера и крафт-лайнера на воздействие пропитывающих веществ. Установлено, что тест-лайнер более чувствительный к процессу увлажнения–сушка, в то время как крафт-лайнер демонстрирует значительно большую стабильность и устойчивость к подобным внешним воздействиям.

В качестве ключевых показателей механической прочности картона-лайнера традиционно рассматриваются сопротивление продавливанию и сопротивление сжатию кольца (RCT_{CD}). Анализ показал, что после пропитки раствором антипирена образцов тест-лайнера величина сопротивления продавливанию увеличилась с 294 кПа до 309 кПа, тогда как у крафт-лайнера наблюдается заметное снижение этого показателя – с 680 кПа в исходном состоянии до 630 кПа после.

Показатели разрывной длинны у всех образцов, подвергнутых обработке антипиреном, снижаются, что предсказуемо, т. к. материал подвергался повторному процессу увлажнения и высушивания.

Исходя из полученных результатов исследования, можно сделать заключение о том, что используемый состав антипирена не оказывает критического влияния на ключевые механические характеристики.

Заключение. Результаты исследования подтверждают высокую эффективность применения антипирена на основе полифосфорной кислоты в ЦБП для повышения огнестойкости картона без ущерба для его основных прочностных характеристик.

Визуально контрольные образцы быстро загорались и достаточно быстро сгорали, с активным распространением огня по поверхности. В отличие от них образцы, обработанные антипиреном, воспламенялись медленнее, формировали плотный обугленный слой и горели локально, без распространения пламени по всей площади. Образование такого «защитного барьера» – ключевой фактор повышения огнестойкости, поскольку он физически изолирует негоревшую часть материала от теплового воздействия и кислорода.

Таким образом, применение фосфорсодержащего антипирена позволяет существенно повысить пожарную безопасность картонных материалов без потери их эксплуатационных свойств.

В рамках последующих этапов научно-исследовательской работы планируется провести комплексный анализ влияния концентрации и расхода антипирена на огнезащитные свойства различных видов картона, представленного на отечественном рынке. В частности, предполагается изучить зависимость ключевых показателей пожарной безопасности, таких как минимальное время воспламенения, скорость распространения пламени, длина обугливания и степень самозатухания, от количества наносимого огнезащитного состава. Это позволит определить оптимальный расход антипирена, при котором достигается максимальный эффект огнестойкости без чрезмерного удорожания и снижения физико-механических характеристик материала.

Дополнительно планируется оценить долговременную стабильность огнезащитных свойств, будет изучено влияние циклического воздействия влаги, температурных колебаний и механического трения на сохранение эффективности антипирена. Это особенно важно для применения картона в условиях повышенной влажности или при транспортировке грузов, когда на материал воздействуют внешние неблагоприятные факторы.

Результаты этих исследований позволят не только подобрать максимально эффективный и экономически обоснованный антипирен, но и составить рекомендации по технологии нанесения его на поверхность картона, что имеет важное практическое значение для целлюлозно-бумажной промышленности.

**Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» и лаборатории пожарно-технической экспертизы строительных и отделочных материалов (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова)*

Список литературы

1. Антипирены для пористых материалов // Научная электронная библиотека CyberLeninka. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antipireny-dlya-poristyh-materialov> (дата обращения: 02.08.2025).
2. Антипирены и их роль в обеспечении огнестойкости строительных материалов // Статья на сайте Stroy-zashita.ru. – URL: <https://stroy-zashita.ru/blog/antipiren> (дата обращения: 03.09.2025).
3. Глазунова, М. Г. Огнебиозащитный состав для целлюлозных материалов строительного назначения / М. Г. Глазунова, Л. В. Замазий, А. А. Леонович // В книге: «Проблемы и

перспективы устойчивого развития промышленности в XXI веке: от теории к практике»: матер. студ. конфер. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 33-36.

4. ГОСТ Р 50810–95. Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация. Введ. 1996-01-01. – М.: Госстандарт России, 1995. – 10 с.
5. Alongi, J. Fire-retardant treatments for cellulose-based materials: a review / J. Alongi, F. Carosio // *Cellulose*. – 2021. – Vol. 28, no 10. – P. 5931-5965. – DOI: 10.1007/s10570-021-03934-9.
6. Bourbigot, S. Flame retardancy of cellulosic materials: strategies and mechanisms / S. Bourbigot, M. Le Bras // *Journal of Fire Sciences*. – 2020. – Vol. 38, no 1. – P. 3-29. – DOI: 10.1177/0734904119885882.
7. Horacek, H. Phosphorus-containing flame retardants for paper / H. Horacek, R. Schwab // *Journal of Fire Sciences*. – 2003. – Vol. 21, no 5. – P. 385-400. – DOI: 10.1177/0734904103021005003.
8. Kandola, B. K. Flame retardant treatments for cellulose and its composites / B. K. Kandola // *Fire and Polymers VI: New Advances in Flame Retardant Materials*. – Washington, DC: American Chemical Society, 2012. – P. 185-205. – (ACS Symposium Series; vol. 1115). – DOI: 10.1021/bk-2012-1115.ch011.
9. Scharrel, B. Phosphorus-based flame retardancy mechanisms – old hat or a starting point for future development? / B. Scharrel // *Materials*. – 2010. – Vol. 3, № 10. – P. 4746-4760. – DOI: 10.3390/ma3104746.
10. Wang N., Liu Y., Liu Y., et al. Properties and mechanisms of different guanidine flame retardant wood pulp paper // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. Vol. 128. P. 224-231. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.007

PROMISING SOLUTIONS FOR CREATING SPECIAL PAPER AND PAPERBOARD

K. I. Balyberdin*, Ya. V. Kazakov, M. E. Romanov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk;

BKT-Service Ltd., Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: konstantinbalyberdin54@gmail.com*

Abstract. The results of a comprehensive study of the effect of a fire retardant based on a water-soluble salt of polyphosphoric acid on the fire resistance and mechanical properties of linerboard are presented. The main objective of the work was to determine the possibility of increasing the fire resistance of cardboard without significantly deteriorating its strength and deformation characteristics. The results showed that, unlike the control samples, which quickly ignited and burned, with the flame actively spreading across the surface, the samples treated with fire retardant ignited more slowly, formed a dense charred layer and burned locally, without the flame spreading over the entire area. The formation of such a “protective barrier” is a key factor in increasing fire resistance, since it physically isolates the non-burning part of the material from heat and oxygen. Analysis of mechanical properties revealed that the ring compression test (RCT) slightly increased for both types of cardboard after flame retardant treatment, while the breaking length decreased slightly relative to the control samples, indicating that operational strength was maintained. Thus, the used fire retardant based on polyphosphoric acid can be recommended for industrial use in the production of fire-resistant cardboard liner without critical losses of mechanical strength, ensuring a balance between fire safety and the functional characteristics of the packaging material.

Keywords: flame retardant, kرافliner, testliner, deformation properties, polyphosphoric acid, interfiber bonding, fire resistance, thermal stability.

References

1. Fire Retardants and Their Role in Ensuring Fire Resistance of Construction Materials // Article on the Stroy-zashita.ru Website. URL: <https://stroy-zashita.ru/blog/antipiren> (accessed: 03.09.2025).
2. Fire Retardants for Porous Materials // Scientific Electronic Library CyberLeninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/antipireny-dlya-poristykh-materialov> (accessed: 02.08.2025).
3. Glazunova, M.G., Zamaziy L.V., Leonovich A.A. Fire-retardant composition for cellulose materials for construction purposes / M.G. Glazunova, L.V. Zamaziy, A.A. Leonovich // In the book: "Problems and Prospects of Sustainable Development of Industry in the 21st Century: From Theory to Practice": Proceedings of the Student Conference. St. Petersburg., 2021. P. 33-36.
4. GOST R 50810-95. Fire safety of textile materials. Fabrics are decorative. Flammability test method and classification. Tikhonovskaya. 1996-01-01. M.: Gosstandart of Russia, 1995. 10 s.
5. Alongi, J. Fire-retardant treatments for cellulose-based materials: a review / J. Alongi, F. Carosio // Cellulose. 2021. Vol. 28, no 10. P. 5931-5965. DOI: 10.1007/s10570-021-03934-9.
6. Bourbigot, S. Flame retardancy of cellulosic materials: strategies and mechanisms / S. Bourbigot, M. Le Bras // Journal of Fire Sciences. 2020. Vol. 38, no 1. P. 3-29. DOI: 10.1177/0734904119885882.
7. Horacek, H. Phosphorus-containing flame retardants for paper / H. Horacek, R. Schwab // Journal of Fire Sciences. 2003. Vol. 21, no 5. P. 385-400. DOI: 10.1177/0734904103021005003.
8. Kandola, B. K. Flame retardant treatments for cellulose and its composites / B. K. Kandola // Fire and Polymers VI: New Advances in Flame Retardant Materials. – Washington, DC: American Chemical Society, 2012. P. 185-205. (ACS Symposium Series; vol. 1115). DOI: 10.1021/bk-2012-1115.ch011.
9. Scharrel, B. Phosphorus-based flame retardancy mechanisms – old hat or a starting point for future development? / B. Scharrel // Materials. 2010. Vol. 3, no 10. P. 4746-4760. DOI: 10.3390/ma3104746.
10. Wang N., Liu Y., Liu Y., et al. Properties and mechanisms of different guanidine flame retardant wood pulp paper // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 128. P. 224-231. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.007.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ В СЕТОЧНОЙ ЧАСТИ ПЛОСКОСЕТОЧНОЙ БДМ

В. Д. Бутусов*, Е. Г. Смирнова

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: butusowvladimir@yandex.ru*

Аннотация. Произведен анализ процесса обезвоживания в сеточной части плоскосеточной бумагоделательной машины до и после установки вакуумного пакета Nivac. Показано влияние оснащения дополнительным оборудованием на процесс обезвоживания в сеточной части, а также на изменение в настройках работы бумагоделательной машины.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, производство бумаги, макулатура, анализ обезвоживания, формование бумажного полотна, обезвоживающий элемент.

Введение. Актуальными задачами производства бумаги и картона являются повышение производительности и стабильности работы бумагоделательных машин и увеличение качества готовой продукции. При формовании и обезвоживании полотна в сеточной части бумагоделательной машины (БДМ) удаляется 95–99 % воды, содержащейся в бумажной массе. В то же время удаление воды в сеточной части БДМ имеет наименьшую стоимость [1]. Таким образом, повышение значения сухости бумажного полотна после прохождения сеточной и прессовой частей – это актуальная задача для многих производств. Главным способом повышения данной величины является модернизация сеточного стола, или оснащение его дополнительными обезвоживающими элементами.

Цель исследования – оценка влияния оснащения сеточного стола трехкамерным вакуумным пакетом конструкции Nivac на динамику обезвоживания в сеточной части и работу бумагоделательной машины.

Материалы и методика исследования

- Измерение массы бумажной суспензии на формующей сетке производилось при помощи микроволнового прибора FiberscanOne от фирмы Kristini. Измерения производятся при помощи микроволнового датчика, располагающегося на конце штанги прибора (Cristini FiberScan One) [2];
- Расчет материального баланса сеточной части осуществлен при помощи специализированного программного обеспечения: программа Dragon, разработанная фирмой Andritz;
- Концентрация бумажной массы в напорном ящике и волокна в регистровых водах определялась согласно ГОСТ Р 50068-92 «Волокнистые полуфабрикаты. Ускоренный метод определения концентрации массы».

В ходе работы был произведен сбор данных с бумагоделательной машины, необрезная ширина которой составляет 2,55 м. Был изучен процесс работы формующей части БДМ, на которой осуществляется выработка бумаги для плоских слоев гофрокартона и бумаги для гофрирования, до и после дополнительного технического оснащения.

Результаты исследования и обсуждение

Оснащение сеточного стола дополнительными обезвоживающими элементами может быть полезно для повышения стабильности работы машины, увеличения производительности и повышения качества готовой продукции. Так, в работе [3] показаны изменения в процессе обезвоживания на сеточном столе после его модернизации. Отражено положительное влияние установки «мокрых» отсасывающих ящиков на процесс формования и обезвоживания, благодаря чему была увеличена производительность машины и повышено качество готовой продукции. В данной работе исследовано изменение процесса обезвоживания после установки на сеточном столе БДМ трехкамерного вакуумного пакета Nivac. Пакет Nivac [4] –

обезвоживающий элемент сеточной части бумагоделательной машины, устанавливаемый перед гауч-валом. Представляет из себя трех- или четырехкамерный отсасывающий ящик. Главной конструктивной особенностью вакуумных пакетов конструкции Nivac является последовательное снижение ширины щелей и планок между ними от одной камеры к другой. Разрежение в камерах данного вакуумного пакета последовательно возрастает. Серьезной проблемой при обезвоживании также является обратное увлажнение полотна. Данный эффект обусловлен частичным возвращением влаги, содержащейся в формирующей сетке, обратно в бумажное полотно. Это происходит в промежутках между отсасывающими ящиками. Таким образом, при прекращении действия вакуума на бумажное полотно, силы упругой деформации приводят к тому, что влага переходит из ячеек сетки обратно в бумажное полотно [5]. Целью применения отсасывающих ящиков конструкции Nivac является достижение максимальной сухости бумажного полотна перед гауч-валом благодаря нейтрализации данного эффекта.

На схеме (рис. 1) отображена компоновка сеточного стола до установки трехкамерного пакета Nivac. На схеме (рис. 2) изображена сеточная часть БДМ после укомплектования ее трехкамерным вакуумным пакетом Nivac. Как показано на схеме 2, вакуумный пакет был установлен в конце сеточного стола, перед гауч-валом. Также один из десяти сухих отсасывающих ящиков был выведен из работы.

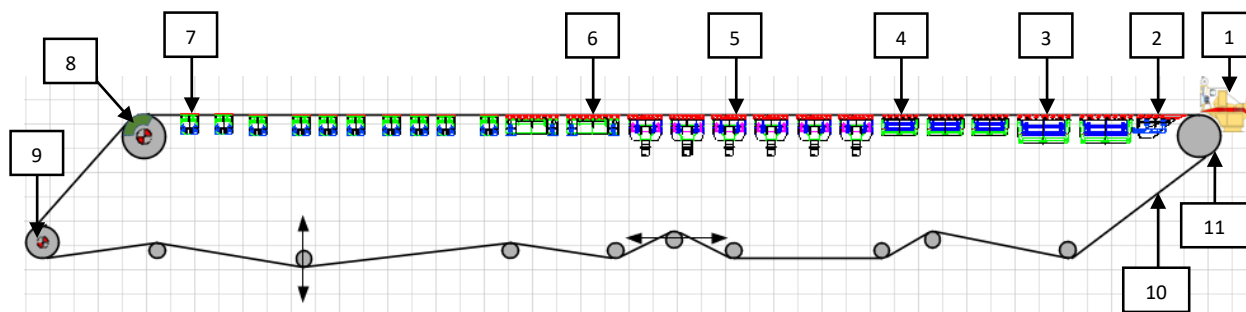


Рисунок 1 – Схема сеточного стола БДМ-N:

1 – напорный ящик; 2 – пакет грудной доски; 3 – пакет гидропланок конструкции Multifoil; 4 – пакет гидропланок конструкции Hydrofoil; 5 – мокрые отсасывающие ящики; 6 – пакеты среднего вакуума; 7 – сухие отсасывающие ящики; 8 – однокамерный гауч-вал; 9 – сеткоповоротный вал; 10 – формирующая сетка; 11 – грудной вал

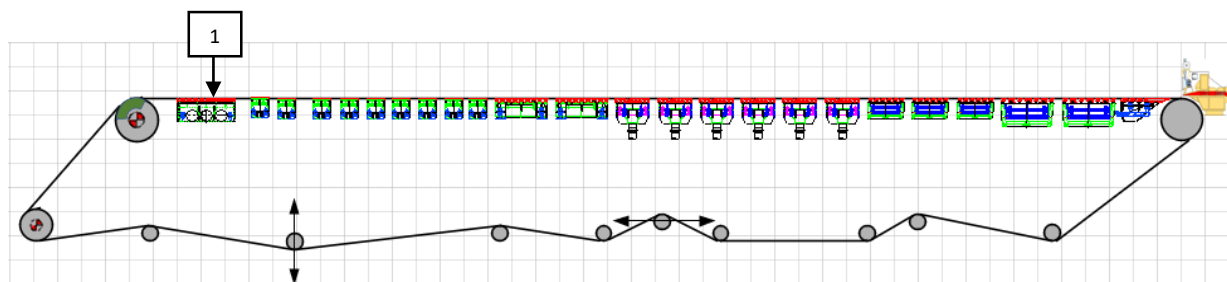


Рисунок 2 – Схема сеточного стола БДМ-N после установки пакета Nivac:

1 – вакуумный пакет конструкции Nivac

В таблице 1 приведена основная информация о режиме работы сеточной части и производственные данные работы бумагоделательной машины. Как видно из таблицы 1, после установки вакуумного пакета Nivac, скорость движения наката машины возросла на 14 м/мин при выработке бумаги той же массы 1 м². Таким образом, производительность машины возросла на 3,4 %. Отмечен прирост сухости после прессовой части с 41% до 44%. В ходе изменения настроек работы машины расположение сухой линии было изменено. Ранее сухая линия располагалась на первом сухом отсасывающем ящике. После установки пакета Nivac и внесения изменений в настройки уровня вакуума в отсасывающих ящиках, расположение сухой линии сместилось на третий сухой отсасывающий ящик. Смещение сухой линии в сторону гауч-вала по направлению движения полотна позволяет снижать нагрузки на привод.

Таблица 1 – Основные параметры работы БДМ-N

Показатель	До установки пакета Hivac	После установки пакета Hivac
Расположение сухой линии	1-й отсасывающий ящик	3-й отсасывающий ящик
Удержание волокна, %	90,0	90,0
Скорость напуска массы, м/мин	382	391
Скорость сетки, м/мин	393	400
Коэффициент напуска	0,974	0,978
Концентрация в напорном ящике, %	0,48	0,56
Концентрация подсеточной воды, %	0,048	0,056
Скорость на накате, м/мин	411	425
Производительность, т/ч	5,66	5,85
Влажность на накате, %	6,8	6,9
Сухость после прессовой части, %	41	44

В ходе работы было выполнено и сопоставлено 2 анализа процесса обезвоживания на сеточном столе БДМ. Измерения выполнены при производстве бумаги с массой 1 м^2 , равной 90 г. На схемах (рис. 3 и рис. 4) отображены точки замеров веса бумажной массы на сеточной части. При выполнении измерений обезвоживания точки замеров были разные, поскольку при монтаже пакета Hivac производилась перестановка обезвоживающих элементов и не было возможности производить измерения после каждого отсасывающего ящика, поскольку ширина датчика прибора FiberScanOne превышала расстояние между элементами сеточного стола.

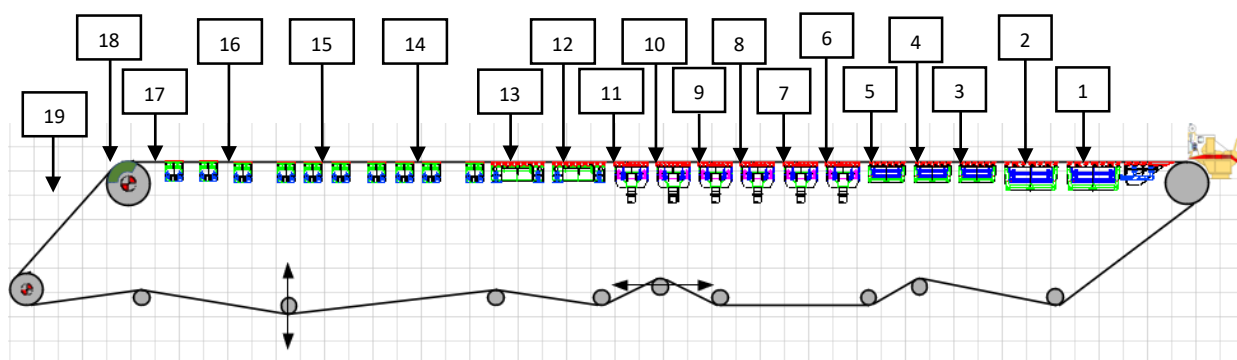


Рисунок 3 – Точки замера веса бумажной массы на сеточном столе БДМ до установки вакуумного пакета Hivac:

1 – пакет грудной доски; 2-3 – пакеты гидропланок Multifoil; 4-6 – пакеты гидропланок Hydrofoil; 7-12 – мокрые отсасывающие ящики; 13 – пакет среднего вакуума Twinvac; 14-18 – сухие отсасывающие ящики; 19 – гауч-вал

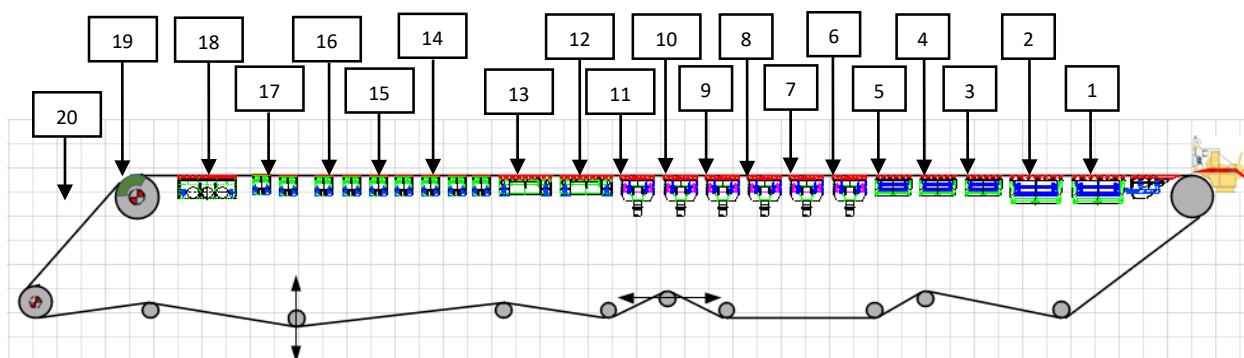


Рисунок 4 – Точки замера веса бумажной массы на сеточном столе БДМ-Н поле установки вакуумного пакета Нівас:

1 – пакет грудной доски; 2-3 – пакеты гидропланок Multifoil; 4-6 – пакеты гидропланок Hydrofoil; 7-12 – мокрые отсасывающие ящики; 13 – пакет среднего вакуума Twinvac; 14-18 – сухие отсасывающие ящики; 19 – вакуумный пакет Нівас; 20 – гауч-вал

На диаграммах (рис. 5 и рис. 6) показано значение сухости после элементов сеточного стола БДМ до и после установки пакета Нівас.



Рисунок 5 – Значение сухости бумажного полотна на обезвоживающих элементах, замеренное до установки пакета Нівас

Как показано на диаграммах (рис. 5 и рис. 6), после установки вакуумного пакета Нівас значение сухости перед гауч-валом возросло на 1,2 % (с 21,6 до 22,8 %, соответственно). Также на 1 % возросло значение сухости после прохождения сеточного стола (с 24,2 % до 25,2 %, соответственно).

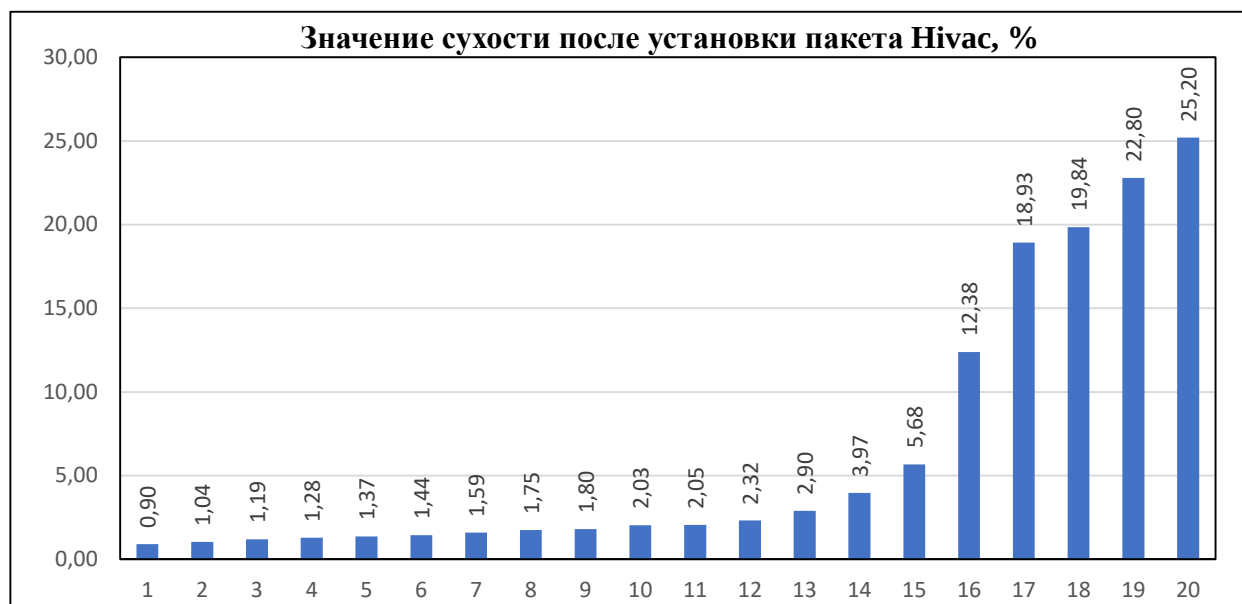


Рисунок 6 – Значение сухости бумажного полотна на обезвоживающих элементах, замеренное после установки пакета Hivac

Таблица 2 – Значение обезвоживания по зонам сеточного стола до и после установки вакуумного пакета Hivac

Обезвоживающий элемент	Зона обезвоживания	Обезвоживание, %	
		до установки вакуумного пакета	после установки вакуумного пакета
Пакет грудной доски	Регистровая часть	38,60	39,70
Multifoil 1 – Hydrofoil 3	Регистровая часть	25,37	23,49
VacuumFoil 1 – VacuumFoil 6	Зона низкого вакуума	12,17	14,21
Twipvac – отсасывающий ящик 1	Зона среднего вакуума	17,60	9,49
Отсасывающий ящик 2 – гауч-вал	Зона высокого вакуума	4,54	10,90

После установки пакета Hivac были произведены изменения в настройках уровня вакуума на обезвоживающих элементах таким образом, чтобы в зоне среднего вакуума удалялось меньше воды. Нагрузка по обезвоживанию на отсасывающие ящики была повышена. Как показано в таблице 2, после установки пакета Hivac удалось повысить обезвоживание в зоне высокого вакуума с 4,54 % до 10,90 %.

Заключение

1. Показана эффективность применения вакуумного пакета конструкции Hivac на позиции в конце сеточного стола после отсасывающих ящиков перед гауч-валом.

2. После установки трехкамерного пакета Hivac значение сухости после прохождения сеточной части возросло на 1 % – с 24,2 % до 25,2 % соответственно. Данные изменения в работе сеточной части позволили повысить производительность БДМ на 3,4 %.

3. В результате изменения настроек работы отсасывающих ящиков удалось снизить долю воды, удаляемой в зоне среднего вакуума, перенаправив ее в зону высокого вакуума. Это позволило сместить сухую линию с первого на третий сухой отсасывающий ящик, что позволило снизить нагрузку на привод.

Список литературы

1. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 2. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства бумаги и картона. – Санкт-Петербург: Политехника, 2005. – 423 с.
2. Cristini FiberScan One – Microwave Consistency Meter // Cristini Group Paper Machine Clothing, Department of physics of the microwave, University of Florence. – URL: <https://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/Cristini%20pptA.pdf> (дата обращения: 18.06.2025).
3. Савина, Т. Е. Анализ обезвоживающей способности сеточного стола бумагоделательной машины до и после модернизации / Т. Е. Савина, А. Я. Агеев, А. И. Парти, А. К. Жвирблите // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1996. – № 4-5. – С. 149-152.
4. Bajpai, P. Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Raw Material and Pulp Making. 3rd ed. Elsevier, 2018. 668 p. ISBN 978-0-12-814238-7.
5. Шульман, Г. З. Теория и конструкция бумагоделательных машин. Часть I: текст лекций / Г. З. Шульман, А. В. Тверитина / Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – Санкт-Петербург, 2023. – 83 с.

ANALYSIS OF THE DEWATERING PROCESS IN THE DEWATERING PART OF A FLAT-WIRE PAPER MACHINE

V. D. Butusow*, E. G. Smirnova

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: butusowvladimir@yandex.ru*

Abstract. An analysis of the dewatering process in the wire part of a flat-wire papermaking machine was carried out before and after installing the Hivac suction box. The effect of equipping with additional equipment on the dewatering process in the wire part, as well as on changes in the settings of the paper-making machine, is shown.

Keywords: paper machine, paper production from waste paper, dewatering analysis, wire part of paper machine, forming of paper web, dewatering element.

References

1. Tekhnologiya cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3t. T. 2 Proizvodstvo bumagi i kartona. CH. 1. Tekhnologiya proizvodstva bumagi i kartona. SPb.: Politehnika, 2005. 423 s.
2. Cristini FiberScan One – Microwave Consistency Meter // Cristini Group Paper Machine Clothing, Department of physics of the microwave, University of Florence. URL: <https://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/Cristini%20pptA.pdf> (accessed: 18.06.2025).
3. Savina, T.E. Analiz obezvozhivayushchej sposobnosti setochnogo stola bumagodelatel'noj mashiny do i posle modernizacii / T.E. Savina, A.Ya. Ageev, A.I. Parti, A.R. ZHvirblite // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 1996. No 4-5. S. 149-152.
4. Bajpai, P. Biermann's Handbook of Pulp and Paper: Raw Material and Pulp Making. 3rd ed. Elsevier, 2018. 668 p. ISBN 978-0-12-814238-7.
5. SHul'man, G.Z. Teoriya i konstrukciya bumagodelatel'nyh mashin. CHast' I: tekst lekcij / G.Z. SHul'man, A.V. Tveritina / Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet promyshlennyh tekhnologij i dizajna. Sankt-Peterburg, 2023. 83 s.

ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРОСТРОЕНИЯ БИОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ФОТОДЕСТРУКЦИЮ

И. Ю. Васильев

Московский политехнический университет, Москва, Россия

E-mail: iljanaras@ya.ru

Аннотация. Научная статья посвящена изучению механизма фотодеструкции новых перспективных биокomпозиционных материалов на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда. Установлено, что механизм фотодеструкции полимерных композиций полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом, осуществляется за счет наличия в составе последнего прооксидантной добавки, после чего происходит разрушение низкомолекулярной фракции полиэтилена с последующей ее фрагментацией, а для матрицы полилактида фотодеструкция протекает по радикальному типу. Таким образом, разработанные биокomпозиционные материалы представляют собой актуальное направление по созданию упаковочных материалов из них, способных к ускоренному процессу фотодеструкции.

Ключевые слова: полилактид, полиэтилен, прооксидантная добавка, компаунд, полимерные композиции, фотодеструкция.

Актуальность создания полимерных биокomпозиционных материалов обусловлена экологическими вызовами, возникающими перед научным сообществом не только в России, но и в мире, связанными с неконтролируемым возникновением полимерных отходов, а также побочных продуктов разложения – микропластика. Биокomпозиты – это высокомолекулярные соединения, содержащие биоразлагаемый компонент: модификаторы природного происхождения, исходная биоразлагаемая полимерная матрица или оба из вышеперечисленных компонента [1].

Наряду с часто используемыми для создания биокomпозитов синтетическими полимерами (полиэтилен, полипропилен), а также природными (полисахариды), увеличивается научный интерес к применению нового класса высокомолекулярных полимеров, в частности полилактида. Это алифатический полиэфир, который синтезируют из мономеров лактида. Физико-химические свойства полилактида сопоставимы с полипропиленом, физико-механические – с полиэтилентерефталатом, а наличие биоразлагаемой полимерной матрицы позиционирует его как перспективный биоразлагаемый полимерный материал [2, 3].

Еще одним набирающим актуальность направлением по созданию полимерных композитов, способных к деструкции, является использование прооксидантных добавок, которые применяют в смесях с термопластами для придания синтетической матрице полимера функции фотодеструкции, чаще всего для этого используют синтетические полиолефины [4].

Новые полимерные композиционные материалы на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда с прооксидантной добавкой – это сложные гетерофазные системы, свойства которых мало изучены. Взаимодействие компонентов при переработке через расплав, определение эксплуатационных и физико-химических свойств полимерных композиций на их основе, а также определение факторов, воздействующих на деструкцию вышеуказанных полимерных смесей, является актуальной задачей.

Цель работы – определить влияние рецептурно-технологических параметров биокomпозиционных материалов на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда на механизм их фотодеструкции.

В качестве матричного полимера для изготовления биокomпозиционных материалов в работе использовали алифатический полиэфир – полилактид (ПЛА) марки 524 производства

Китай. В качестве наполнителей использовали полиэтилен низкой плотности марки 115030-070 производства компании ПАО «Сибур» (Россия), а также суперконцентрат – прооксидантную добавку в виде стеаратов переходных металлов марки «А-Len» (Россия).

На первом этапе работы изучили формирование структуры полимерных композиций на основе полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом при содержании последнего 20 мас. %, полученных экструзионной переработкой. Методом сканирующей электронной микроскопии установили формирование гетерогенной структуры с границей раздела фаз между полилактидом и термопластичным полиэтиленовым компаундом, что связано со снижением сегментальной подвижности макромолекулярной цепи полиэтилена и замедлением процесса кристаллизации, а для полилактида осуществляется увеличение степени кристалличности вследствие его перекристаллизации.

В работе использовали следующие методы испытаний:

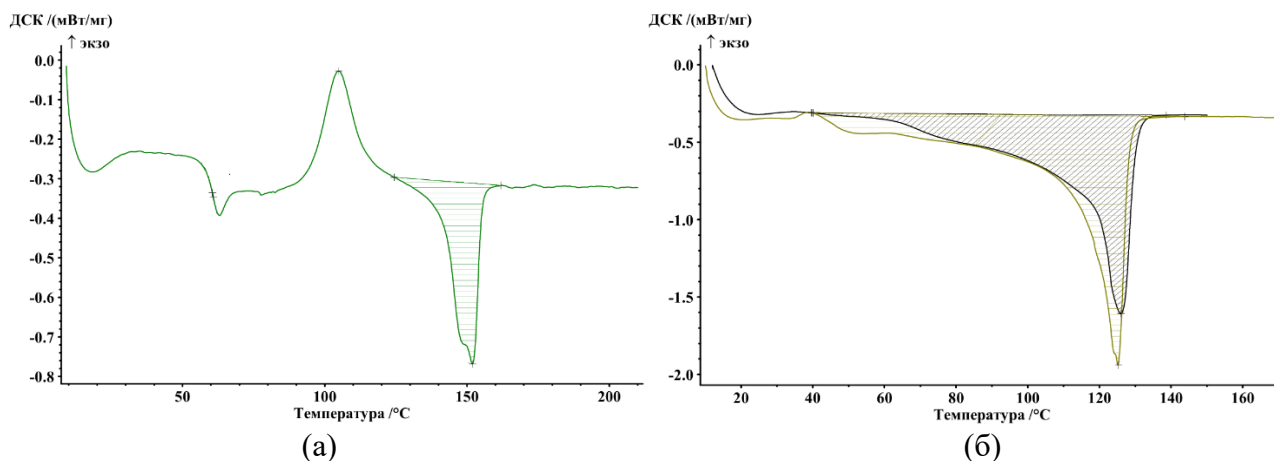
Воздействие ультрафиолетового излучения на образцы определяли с помощью УФ-камеры, внутри которой размещены две PRK-4 кварцевые (ртутные) лампы, обеспечивающие излучение с длиной волны $\lambda = 254$ нм. Изолированные от внешнего источника излучения образцы полимерных композиций размером 150×150 мм размещали на расстоянии 300 мм от УФ-ламп и экспонировали в течение 150 часов.

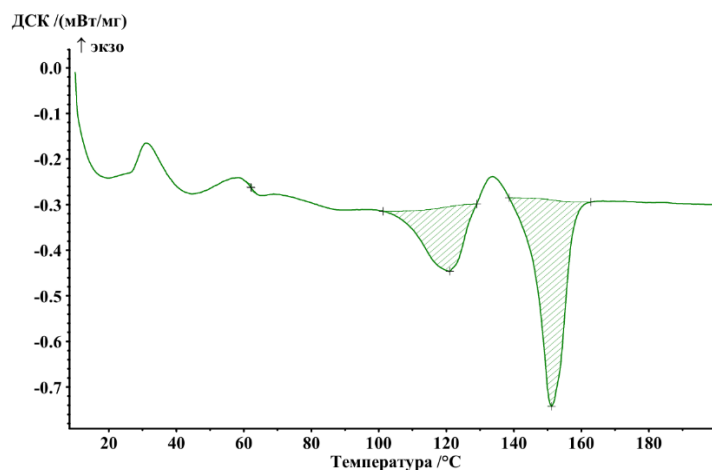
Изменение структурно-морфологических свойств образцов при УФ-облучении, предварительно подвергнутых золотому напылению, исследовали, используя сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), на микроскопе JCM-6000 PLUS (JEOL, Akishima, Tokyo, Japan), с детектором вторичных электронов, при ускоряющем напряжении 10 и 15 кВ.

Изменение теплофизических свойств образцов после 150 часов УФ-облучения определяли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии на калориметре DSC 204 F1 NETZSCH (Germany) в интервале температур от 20 до 200 °С со скоростью сканирования 10 град/мин и навеске образца 10±1 мг в токе инертного газа – аргона. Исследуя теплофизические свойства, определяли энтальпию плавления – ΔH_m (Дж/г), температуру плавления – T_m (°С), температуру стеклования – T_g (°С). Для определения степени кристалличности ($\chi_{кр}$, %) полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда, а также полимерных композиций на их основе использовали энтальпию плавления полностью кристаллического ПЭ (ΔH_m) = 293 Дж/г, а также полилактида ПЛА (ΔH_m) = 93,7 Дж/г согласно ISO 11357-1:2016 «Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Общие принципы».

Результаты определения теплофизических свойств после 150 часов УФ-облучения полимерных композиций на основе полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом, представлены на рисунке 1.

После 150 часов экспонирования при УФ-излучении теплофизические свойства полимерных композиций на основе исходных компонентов полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда, а также полимерных композиций ПЛА/ТПК (рис. 1) изменяются.





(в)

Рисунок 1 – Теплофизические свойства ПЛА (а), ТПК (б), ПЛА/ТПК20 (в) после 150 часов экспонирования при УФ-излучении

Для пленки на основе полилактида, в сравнении с исходной (табл.1), на термограмме появляется пик холодной кристаллизации при 105 °С, а энтальпия плавления увеличивается более чем в 3,5 раза. При этом температура плавления снижается на 5 °С. Увеличение энтальпии плавления при УФ-излучении обусловлено частичным разрушением аморфной фазы полилактида, а наличие метастабильной кристаллической структуры при УФ-излучении, вероятно, способствует продолжению кристаллизации за счет разрыва напряженных проходных цепей, в связи с чем и увеличивается его степень кристалличности.

Для пленки на основе термопластичного полиэтиленового компаунда (рис. 1б) энтальпия плавления снижается на 12 %. Разница в температуре плавления до и после УФ-излучения не превышает 1 °С. Удельная энергия эндотермического процесса полимерной композиции ПЛА/ТПК20 (рис. 1в), в сравнении с исходной, также увеличивается (табл. 1). Так, для полиэтилена низкой плотности энтальпия плавления увеличивается в два раза, а для полилактида – в 1,7 раза. При этом температура плавления для фазы полиэтилена увеличивается на 3 °С, для фазы полилактида снижается на 2 °С.

Таблица 1 – Теплофизические свойства полимерных композиций

Экспонирование	Образец	T_m , °С	ΔH_m , Дж/г	$\chi_{кр}$, %
0 часов	ПЛА	157	8.7	9.3
	ТПК	118	109	37.0
	ПЛА/ТПК20	153/118	14.5/5.9	15.5/2.0
150 часов	ПЛА	152	30	32
	ТПК	117	96	32.8
	ПЛА/ТПК20	151/121	23.9/12.0	25.5/4.1

Изменения структуры биокomпозиционных материалов на основе полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом, после 150 часов УФ-облучения представлены на рисунке 2.

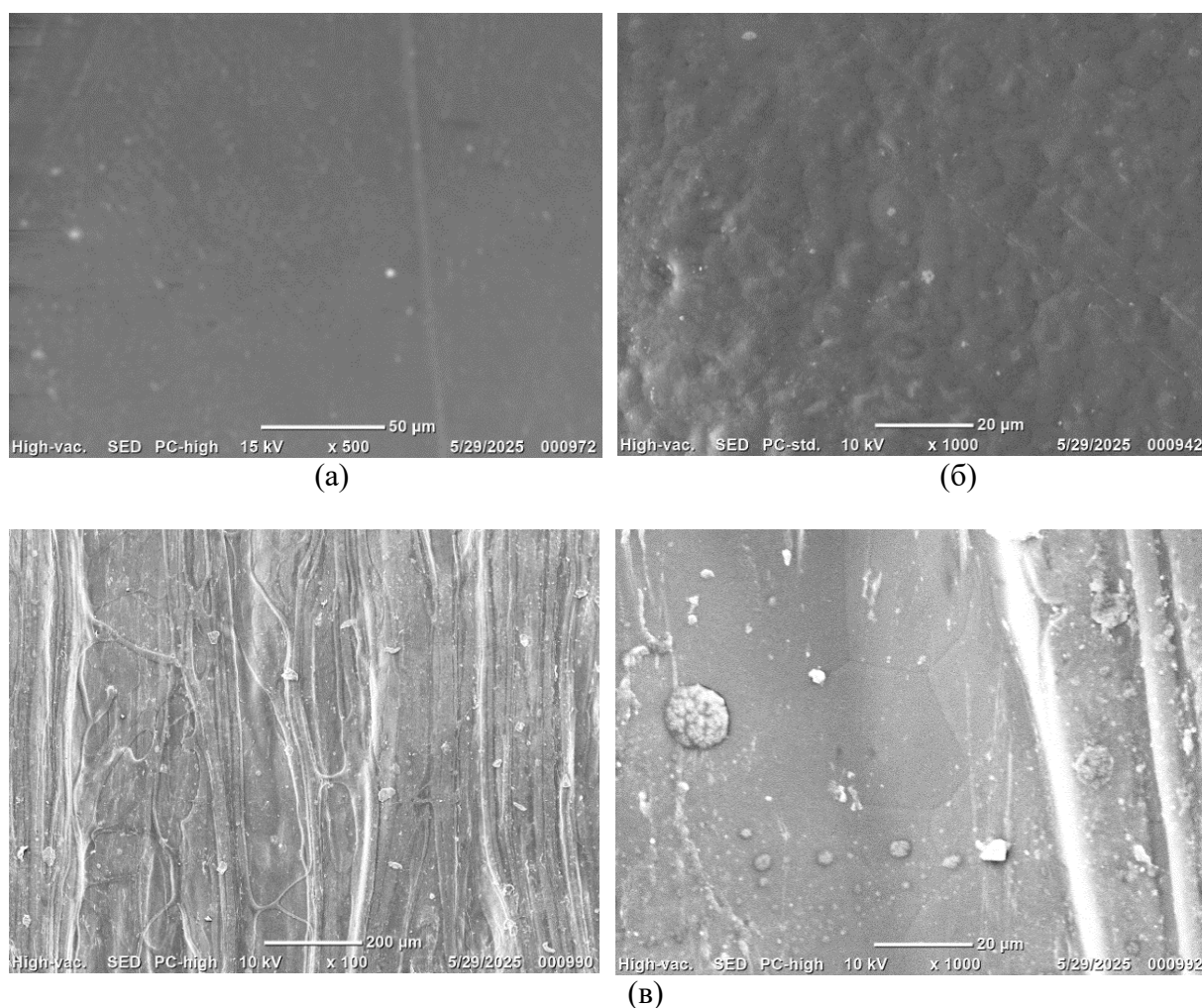


Рисунок 2 – Морфология поверхности полимерных композиций:
ПЛА (а), ТПК (б), ПЛА/ТПК (в)

После облучения УФ-излучением в течение 150 часов поверхность полимерной композиции полилактида не изменилась, что свидетельствует об отсутствии видимых признаков фотодеструкции в течение всего времени эксперимента (рис. 2а). По прошествии 150 часов при УФ-излучении на поверхности полимерной композиции термопластичного полиэтиленового компаунда образовались широкие сквозные трещины, количество дефектов увеличилось, а сферолитная структура стала менее заметной, что является результатом фотодеструкции (рис. 2б).

После 150 часов экспонирования в УФ-камере, на поверхности полимерной композиции полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом, образуются микротрещины (рис. 2в), что свидетельствует о фотодеструкции. При чем, вероятнее всего, по фазе термопластичного полиэтиленового компаунда.

Таким образом, разработанные биокомпозиционные материалы на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда представляют собой актуальное направление по созданию упаковочных материалов из них, способных к ускоренному процессу фотодеструкции после их утилизации.

Список литературы

1. The Influence of Metal Sludge on the Oxidative Destruction of Low-Density Polyethylene / M. Y. Guivan [и др.] // Polymer Science – Series D. 2024. No 17(2). S. 502-506.
2. Stefanovich M.A., Gubachev V.A., Tolstov A.M. The modelling of extrusion melt processes for polymer composites // International Journal of Applied Science and Technology Integral. 2022. No2.

3. Состав полимерной матрицы биоразлагаемой упаковки / М. В. Рымовская [и др.] // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 2. – С. 195-209.
4. Экологичная упаковка будущего: полимолочная кислота и шунгит для устойчивого хранения продуктов / Т. Е. Тарасова [и др.] // Наукоемкие технологии как драйвер развития аграрных производств и пищевых систем: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 105-летию со дня основания ФГБОУ ВО МГАВМиБ-МВА имени К.И. Скрябина. – 2024. – С. 149-152.

INFLUENCE OF BIOCOMPOSITES FORMULATION ON THEIR PHOTODESTRUCTION

I. Yu. Vasilyev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

E-mail: iljanaras@ya.ru

Abstract. The scientific article is devoted to the study of the mechanism of photodestruction of new promising biocomposite materials based on polylactide and thermoplastic polyethylene compound. It has been established that the mechanism of photodegradation of polymeric compositions of polylactide filled with a thermoplastic polyethylene compound is carried out due to the presence of a pro-oxidant additive in the composition of the latter, after which the low-molecular fraction of polyethylene is destroyed with its subsequent fragmentation, and for the matrix of polylactide photodegradation proceeds according to the radical type. Thus, the developed biocomposite materials are an urgent direction for the creation of packaging materials from them capable of an accelerated photodegradation process.

Keywords: polylactide, polyethylene, pro-oxidant additive, compound, extrusion, polymer compositions.

References

1. The Influence of Metal Sludge on the Oxidative Destruction of Low-Density Polyethylene / M. Y. Guivan [и др.] // Polymer Science – Series D. 2024. No 17(2). S. 502-506.
2. Stefanovich M.A., Gubachev V.A., Tolstov A.M. The modelling of extrusion melt processes for polymer composites // International Journal of Applied Science and Technology Integral. 2022. №2.
3. Composition of the polymer matrix of biodegradable packaging / M.V. Rymovskaya [et al.] // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technology, Biotechnology, Geoecology. 2022. No 2. S. 195-209.
4. Environmentally friendly packaging of the future: polylactic acid and shungite for sustainable storage of products /T.E. Tarasova [et al.] //High-tech technologies as a driver for the development of agricultural production and food systems: Collection of scientific works of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 105th anniversary of the founding of the MGAVMiB-MVA named after K.I. Skripplis. 2024. S. 149-152.

БИОКОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА, НАПОЛНЕННОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНЫМ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМ КОМПАУНДОМ

И. Ю. Васильев

Московский политехнический университет, Москва, Россия

E-mail: iljanaras@ya.ru

Аннотация. Научная статья посвящена созданию новых перспективных биокomпозиционных материалов на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда. Для их производства в работе применяли традиционно используемый для переработки термопластов метод экструзии. Для определения взаимодействия матрицы полилактида с термопластичным полиэтиленовым компаундом при их переработке через расплав использовали сканирующую электронную микроскопию и дифференциальную сканирующую калориметрию. Для полимерных композиций на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда при переработке через расплав формируется гетерогенная структура, вызванная их фазовым разделением. Этим опосредовано увеличение степени кристалличности полилактида вследствие более плотного упорядочивания его надмолекулярной структуры, а для фазы полиэтилена – образование более дефектных мелких кристаллов, что обусловлено снижением сегментальной подвижности макромолекул полиэтилена и затруднением процесса кристаллизации. Таким образом, разработанные биокomпозиционные материалы на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда являются актуальными для производства упаковочных материалов из них, но требуют дальнейшего исследования.

Ключевые слова: полилактид, полиэтилен, прооксидантная добавка, компаунд, экструзия, полимерные композиции.

В упаковочной индустрии используют широкий ассортимент полимерных материалов для изготовления упаковки различной конфигурации и размеров. Для этого применяют полимеры с высокой биологической устойчивостью к воздействию микроорганизмов, грибов и водорослей. Большая часть упаковки предназначена для одноразового срока эксплуатации, в частности, одноразовая полимерная тара и потребительская упаковка. После использования вышеуказанные полимерные изделия утилизируют на полигоны, которые загрязняют окружающую среду и влияют на снижение экологической обстановки. Учитывая существующую проблему, необходимо создавать научно обоснованные подходы для ее решения. В связи с этим одним из актуальных и практико-ориентированных подходов является создание полимерных биокomпозиционных материалов [1].

Существуют несколько направлений в области создания биоразлагаемых полимерных материалов: синтез биоразлагаемых полиэфиров гидроксикарбоновых кислот, например, полилактид (ПЛА), полибутадиенадипаттерефталат (ПБАТ), поликапролактон (ПКЛ). Введение в структуру синтетических термопластов молекул, содержащих в своем составе функциональные группы, способствующие ускоренному фото- и оксо-разложению полимеров, например, D₂W, переходные стеараты металлов и/или амфифильные полимерные металлокомплексы, прооксидантные добавки. Получение композиций на основе крупнотоннажных синтетических полимеров, модифицированных наполнителями природного происхождения, например, полиэтилен/крахмал, полиэтилен/целлюлоза и их производные. Получение композиций на основе полимеров, синтезируемых из растительного сырья и наполненных синтетическими термопластами, например, полилактид/полиэтилен [2-4].

Из вышеперечисленных направлений последний является наиболее актуальным и перспективным. Это связано с возможностью снижения зависимости от полимеров, получаемых из нефти, увеличивая применение полимеров из возобновляемых источников

сырья, применение традиционно используемого оборудования для производства и переработки полимерных материалов, а также возможность направленного нивелирования эксплуатационными свойствами, которые необходимо учитывать при производстве полимерной тары и упаковки.

Несмотря на то, что полилактид является биоразлагаемым полимером, важно отметить, что кинетика его биоразлагаемости протекает при определенных условиях (высокая температура, pH и влажность среды). В связи с этим полилактид, так же, как и другие полимеры, модифицируют добавками различного происхождения, при этом не всегда удается достичь заданных свойств ввиду низкой их технологической совместимости [5].

Цель работы – определить влияние рецептуростроения и экструзионной переработки на формирование структуры биокomпозиционных материалов основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда.

В качестве матричного полимера для изготовления биокomпозиционных материалов в работе использовали алифатический полиэфир – полилактид (ПЛА) марки 524 производства Китай. В качестве наполнителей использовали полиэтилен низкой плотности марки 115030-070 производства компании ПАО «Сибур» (Россия), а также суперконцентрат – прооксидантную добавку в виде стеаратов переходных металлов марки «А-Len» (Россия). В таблице 1 приведены характеристики исходных компонентов.

Таблица 1 – Характеристики исходных компонентов

Наименование компонента	Показатель текучести расплава (ПТР), г/10мин	Модуль упругости E, МПа	Относительное удлинение при разрыве ϵ , %	Плотность d, г/см ³
ПЛА	8,7	1600	4,2	1,24
ПЭНП	7,0	600	400	0,97

Изготовление биокomпозиционных материалов осуществляли в две стадии. На первой полиэтилен низкой плотности смешивали с суперконцентратом, варьируя содержание компонентов ПЭНП/суперконцентрат – 90:10 мас. %. После этого смесевую композицию загружали в зону питания двухшнекового экструдера, пластицировали и на выходе из формующего элемента получали стренгу круглого сечения, которую охлаждали и гранулировали, получая термопластичный полиэтиленовый компаунд (ТПК) размером 2-4 мм. Температурные режимы переработки смесевой композиции ПЭНП/суперконцентрат представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Температурные режимы получения полимерных композиций

Наименование полимерных композиций	Температурные режимы зон плоскощелевого экструдера, °C				
	1 зона	2 зона	3 зона	4 зона	5 зона
ПЭНП/суперконцентрат (ТПК)	110	120	125	135	140
ПЛА	165	168	170	175	180
ПЛА/ТПК	165	168	170	175	180

На второй стадии гранулы полилактида смешивали с термопластичным полиэтиленовым компаундом в разных концентрациях, составы которых представлены в таблице 3. Смесевые композиции ПЛА/ТПК загружали в зону питания плоскощелевого экструдера, пластицировали и на выходе получали полимерные пленочные биокomпозиты,

охлаждали и сматывали их в рулоны (табл. 2). Схема получения биокomпозиционных материалов представлена на рисунке 1.

Таблица 3 – Наименование полимерных композиций

Наименование полимерных композиций	Концентрация, мас. %	
	ПЛА	ТПК
ПЛА	100	-
ТПК	-	100
ПЛА/ТПК5	95	5
ПЛА/ТПК10	90	10
ПЛА/ТПК15	85	15
ПЛА/ТПК20	80	20

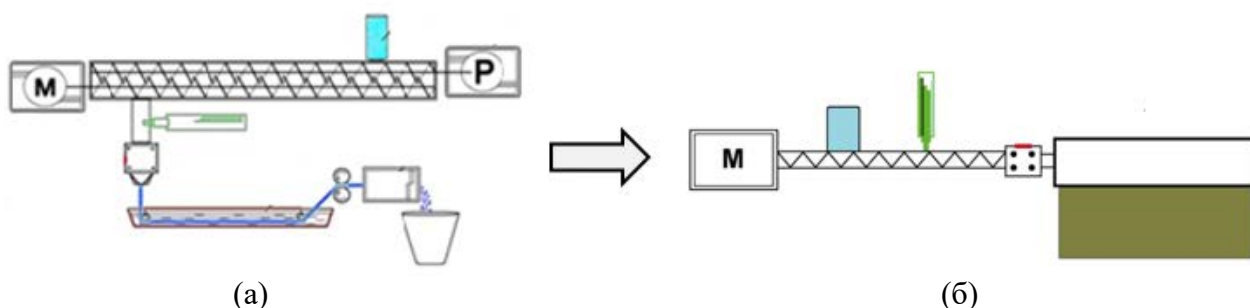


Рисунок 1 – Схема получения полимерных композиций, экструдер: *а* – двухшнековый; *б* – плоскощелевой

В работе использовали следующие методы испытаний:

Структурно-морфологические свойства образцов, предварительно подвергнутых золотому напылению, исследовали, используя сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), на микроскопе JCM-6000 PLUS (JEOL, Akishima, Tokyo, Japan), с детектором вторичных электронов, при ускоряющем напряжении 10 и 15 кВ.

Теплофизические свойства образцов определяли с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии, на калориметре DSC 204 F1 NETZSCH (Germany) в интервале температур от 20 до 200 °С со скоростью сканирования 10 град/мин и навеске образца 10±1 мг в токе инертного газа – аргона. Исследуя теплофизические свойства, определяли энтальпию плавления – ΔH_m (Дж/г), температуру плавления – T_m (°С), температуру стеклования – T_g (°С). Для определения степени кристалличности ($\chi_{кр}$, %) полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда, а также полимерных композиций на их основе использовали энтальпию плавления полностью кристаллического ПЭ (ΔH_m) = 293 Дж/г, а также полилактида ПЛА (ΔH_m) = 93,7 Дж/г согласно ISO 11357-1:2016 «Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Общие принципы».

Результаты определения формирования структуры биокomпозиционных материалов на основе полилактида, наполненного термопластичным полиэтиленовым компаундом, представлены на рисунке 2.

Экструдированная пленка на основе полилактида (рис. 2а) характеризуется монолитной поверхностью с видимыми ориентационными тяжами, характерными для фибриллярной структуры полимерных материалов, которую возможно получить при медленной вытяжке в процессе ее отлива. На некоторых участках СЭМ-изображения присутствует минимальное количество дефектов, предположительно связанных с процессом ее изготовления. Для термопластичного полиэтиленового компаунда формируется сферолитная морфология поверхности (средний размер по изображению ~ 7 мкм).

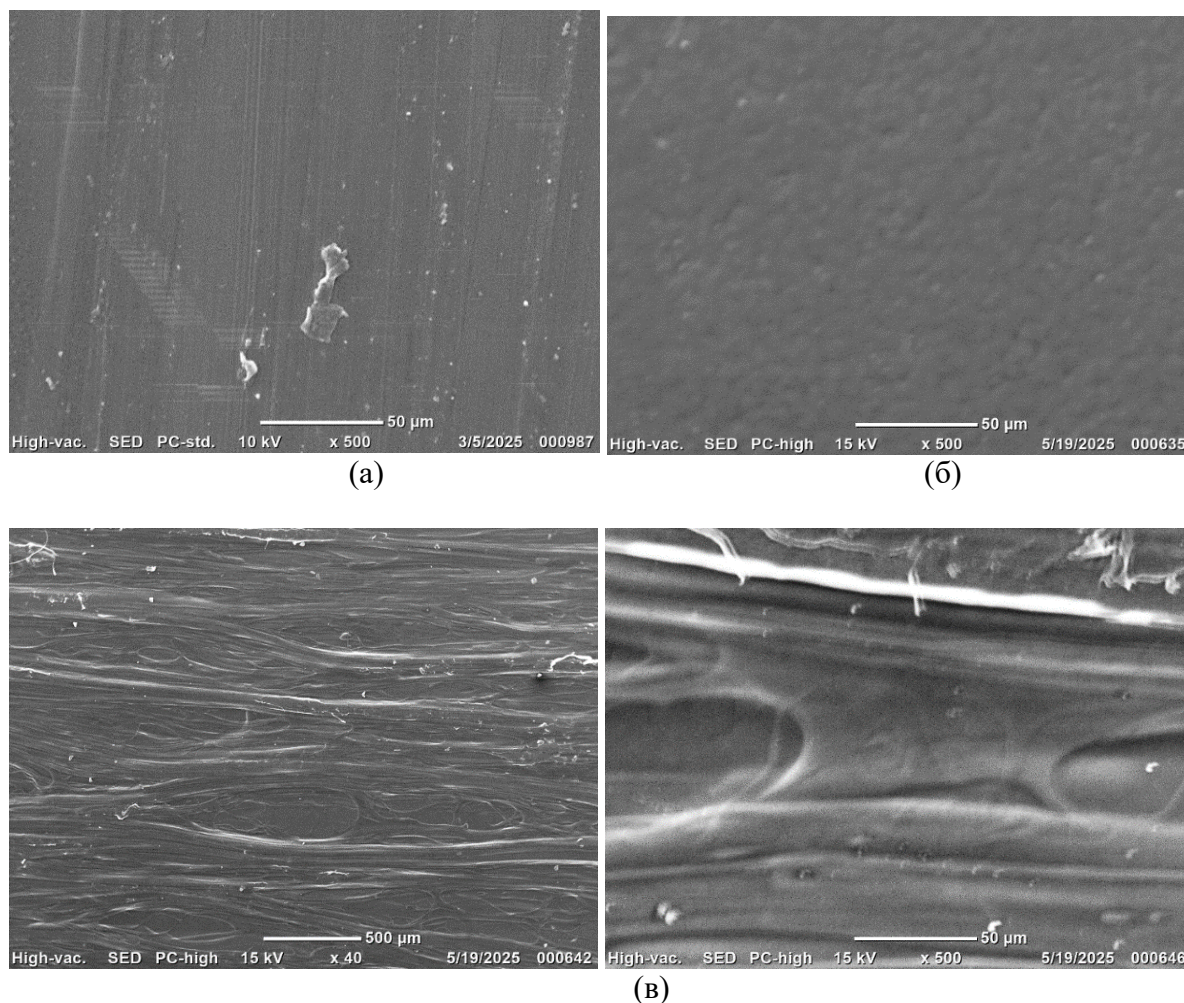


Рисунок 2 – Морфология поверхности полимерных композиций:
ПЛА (а), ТПК (б), ПЛА/ТПК (в)

Для полимерной композиции на основе полилактида, наполненной термопластичным полиэтиленовым компаундом, формируется структурно неоднородная композиция. При большем увеличении заметны домены полиэтилена, что связано с фазовым разделением полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда.

Результаты определения теплофизических свойств полимерных композиций представлены на рисунке 3.

На термограмме полилактида (рис. 3а) присутствуют два пика: первый соответствует температуре стеклования и составляет 65°C , второй – позволяет идентифицировать наличие кристаллической фазы с температурой плавления 157°C . На рисунке 3б видно наличие характерного эндотермического пика плавления с температурой 118°C , который соответствует температуре плавления полиэтилена, входящего в состав термопластичного компаунда. На термограмме также присутствует менее интенсивный эндотермический пик, идентифицируемый при температуре 60°C , что позволяет связать его появление на термограмме с наличием низкомолекулярных веществ в составе полиэтилена. На термограмме полимерной композиции ПЛА/ТПК, в которой доля последнего составляет 20 мас. % (рис. 3в), присутствуют два эндотермических пика, соответствующие температуре плавления термопластичного полиэтиленового компаунда – 115°C и полилактида – 153°C .

При введении термопластичного полиэтиленового компаунда в матрицу полилактида в количестве 20 мас. % наблюдается увеличение энтальпии плавления и кристалличности фазы полилактида (табл. 4). Это связано с процессом перекристаллизации, в результате которого осуществляется более плотное упорядочивание надмолекулярной структуры полилактида,

обусловленное наличием кристаллической фазы полиэтилена в составе полимерной композиции.

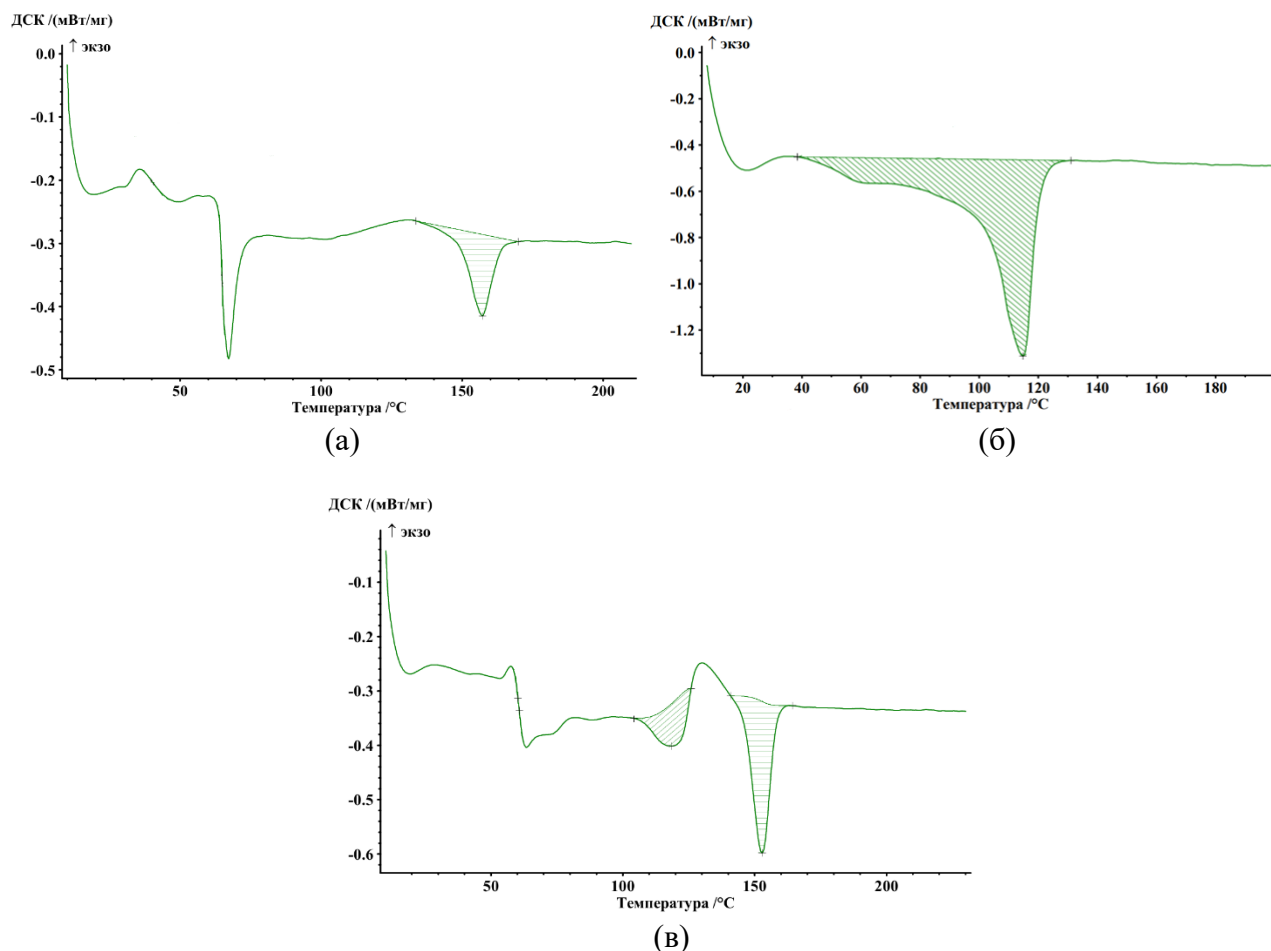


Рисунок 3 – Термограммы плавления: ПЛА (а), ТПК (б) и ПЛА/ТПК20 (в)

Таблица 4 – Теплофизические свойства полимерных композиций

Образец	T_m , °C	ΔH_m , Дж/г	D, %
ПЛА	157	8,7	9,3
ТПК	118	109	37,0
ПЛА/ТПК20	153/115	14,5/5,9	15,5/2,0

Изменение эндотермического пика плавления полиэтилена в диапазон более низкой температуры 115 °C свидетельствует об образовании более дефектных мелких кристаллов, что обусловлено снижением сегментальной подвижности макромолекул полиэтилена и затруднением процесса кристаллизации.

Таким образом, создание биокomпозиционных материалов на основе полилактида и термопластичного полиэтиленового компаунда является перспективной технологией для изготовления упаковочных материалов из них, но требует дальнейших исследований.

Список литературы

1. Повернов, П. А. Влияние модифицирующих добавок на структуру и свойства биоразлагаемых смесей на основе поли-3-гидроксibuтирата и бутадиен-нитрильного каучука / П. А. Повернов, Л. С. Шибряева, С. М. Аншин // Тонкие химические технологии. – 2024. – № 19 (6). – С. 517-527.

2. El-Taweel S.H., Al-Hamdi A. Starch as a successful biodegradable nucleating agent in biodegradable PHBV/PHO blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024;149(4):1351-1364.
3. Васильев, И. Ю. Биокomпозиционные материалы на основе полиэтилена и амфифильного полимерного металлокомплекса железа / И. Ю. Васильев // Тонкие химические технологии. – 2023. – № 18 (2). – С. 123-134.
4. Студеникина, Л. Н. Композитные материалы на основе наполненного полисахаридами полиэтилена: получение, применение, утилизация / Л. Н. Студеникина, А. В. Протасов, А. А. Мельников, Т. Р. Поваляева, А. А. Леонова // Инженерные технологии. – 2025. – № 1 (9). – С. 126-133.
5. Абушахманова, З. Р. Исследование закономерностей формирования структуры и характера взаимодействия полиэтилена и поликапролактона в смесях / З. Р. Абушахманова, Е. Е. Масталыгина, П. В. Пантюхов, А. А. Ольхов, С. Д. Бровина, М. Ю. Гуйван, А. А. Попов // Журнал физической химии. – 2024. – № 98 (7). – С. 3-12.

BIOCOMPOSITES BASED ON POLYLACTIDE FILLED WITH THERMOPLASTIC POLYETHYLENE COMPOUND

I. Yu. Vasilyev, *Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation*

E-mail: iljanaras@ya.ru

Abstract. The scientific article is devoted to the creation of new promising biocomposite materials based on polylactide and a thermoplastic polyethylene compound. For their production, the extrusion method traditionally used for the processing of thermoplastics was used. Scanning electron microscopy and differential scanning calorimetry were used to determine the interaction of the polylactide matrix with the thermoplastic polyethylene compound when processed through the melt. For polymeric compositions based on polylactide and a thermoplastic polyethylene compound, when processed through a melt, a heterogeneous structure is formed caused by their phase separation. This mediates an increase in the degree of crystallinity of polylactide due to a denser ordering of its supramolecular structure, and for the polyethylene phase - the formation of more defective small crystals, which is due to a decrease in the segmental mobility of polyethylene macromolecules and difficulty in the crystallization process. Thus, the developed biocomposite materials based on polylactide and thermoplastic polyethylene compound require further research but are relevant to producing packaging materials from them.

Keywords: polylactide, polyethylene, pro-oxidant additive, compound, extrusion, polymer compositions.

References

1. Povernov, P.A. Influence of Modifying Additives on the Structure and Properties of Biodegradable Blends Based on Poly-3-hydroxybutyrate and Butadiene-Nitrile Rubber / P.A. Povernov, L.S. Shibryaeva, S.M. Anshin // *Fine Chemical Technologies*. 2024;19(6):517-527. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-517-527>.
2. El-Taweel S.H., Al-Hamdi A. Starch as a successful biodegradable nucleating agent in biodegradable PHBV/PHO blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024;149(4):1351-1364.
3. Vasiliev, I.Yu. Biocomposite materials based on polyethylene and an amphiphilic iron polymer metal complex / I.Yu.Vasiliev // *Fine Chemical Technologies*. 2023;18(2):123-134.
4. Studenikina, L.N. Composite materials based on polysaccharide-filled polyethylene: production, application, disposal / L.N. Studenikina, A.V. Protasov, A.A. Melnikov, T.R. Povalyayeva, A.A. Leonova // *Engineering Technologies*. 2025;1(9):126-133.
5. Abushakhmanova, Z.R., Mastalygina E.E., Pantyukhov P.V., Olkhov A.A., Brovina S.D., Guyvan M.Yu., Popov A.A. Investigation of regularities in the formation of structure and nature of interaction of polyethylene and polycaprolactone in blends / Z.R. Abushakhmanova, E.E. Mastalygina, P.V. Pantyukhov, A.A. Olkhov, S.D. Brovina, M.Yu. Guyvan, A.A. Popov // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2024;98(7):3-12.

ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК В ТЕХНОЛОГИИ ЭКСТРУЗИОННОГО ЛАМИНИРОВАНИЯ

И. Ю. Васильев

Московский политехнический университет, Москва, Россия

E-mail: iljanaras@ya.ru

Аннотация. Научная статья посвящена изучению механизма повышения адгезионной прочности полимерных пленок в технологии экструзионного ламинирования. В качестве субстрата использовали пленки из двухосноориентированного полипропилена, полиэтилентерефталата и полиамида, на которые наносили расплав полиэтилена, предварительно подвергнув его воздействию ультразвуковых колебаний. Модификация расплава полиэтилена ультразвуком влияет на повышение адгезионной прочности при взаимодействии с вышеуказанными многослойными пленками и обусловлена возникновением функциональных групп с полярной структурой, в частности карбонильной и карбоксильной, что подтверждается ИК-спектроскопией, а также снижением молекулярной массы и молекулярно-массового распределения полиэтилена, что влияет на повышение гибкости и подвижности его макромолекул и снижение вероятности образования слабых и дефектных граничащих слоев полиэтилена. Таким образом, модификация расплава полиэтилена воздействием ультразвуковых колебаний позволяет осуществить экструзионное ламинирование с увеличением адгезионной прочности контактирующих полимерных слоев и является перспективной технологией по производству многослойных полимерных пленок.

Ключевые слова: полиэтилен, ультразвуковое воздействие, многослойные пленки, экструзия, экструзионное ламинирование, адгезия.

Для производства многослойных пленочных материалов применяют различные технологические процессы, среди которых основными являются соэкструзия (плоскощелевая и рукавная), а также экструзионное ламинирование. Вне зависимости от способа производства многослойных пленочных материалов одним из основных параметров, который необходимо учитывать при их изготовлении, является требуемая адгезионная прочность между контактирующими слоями полимерных материалов. Для этого используют дорогостоящие адгезивы, что влияет на повышение себестоимости готовых изделий и является недостатком при их производстве [1].

При экструзионном ламинировании повышение адгезионной прочности достигают путем предварительной обработки ламинирующей поверхности коронным разрядом, грунтованием или озонированием, но при соэкструзии вышеуказанные подходы применить невозможно [2]. В связи с этим для обеспечения достаточного уровня адгезионной прочности между слоями пленки, несущими функциональную нагрузку, используют дополнительные соединительные слои [3], что влияет на технологические сложности при их производстве. В связи с чем, актуальным направлением исследования является разработка новых методов и технологических приемов, которые позволят повысить (усилить) адгезионную прочность между полимерными пленками при производстве многослойных, минимизируя или вовсе отказавшись от необходимости применения дорогостоящих адгезивов и тем самым сократив затраты на их производство.

Цель работы – разработка технологии повышения адгезионной прочности многослойных полимерных пленок при модификации расплава полиэтилена воздействием ультразвуковых колебаний в процессе экструзионного ламинирования.

В качестве объектов исследования в работе использовали полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) марки 115030-070 производства компании ПАО «Казаньоргсинтез» (Россия). В качестве субстрата, на который наносили расплав полиэтилена, использовали полиамид (ПА)

марки ПА-6 120/321 ГОСТ 6-06-С9-93 производства ПО «Химволокно», г. Гродно, Белоруссия, а также пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) и двухосноориентированного полипропилена (БОПП).

Для изготовления образцов многослойных пленок использовали следующее оборудование:

Установку для получения гранул полиэтилена, предварительно обработанных воздействием ультразвуковых колебаний, которая представляет собой двухшнековый экструдер, оснащенный узлом ультразвуковой обработки (УЗ) и гранулятором. Диаметр шнеков экструдера 12 мм. Ультразвуковой волновод вводили непосредственно в расплав полиэтилена. Узел для обработки расплава полиэтилена ультразвуком представляет магнитострикционный электроакустический преобразователь, оснащенный титановым волноводом. Генератор ультразвуковой частоты позволяет проводить обработку ультразвуком при мощности до 0,75 и 1,5 кВт. Частота колебаний составляла 22,4 кГц, максимальная амплитуда колебаний до 6 и 10 мкм (рис. 1).

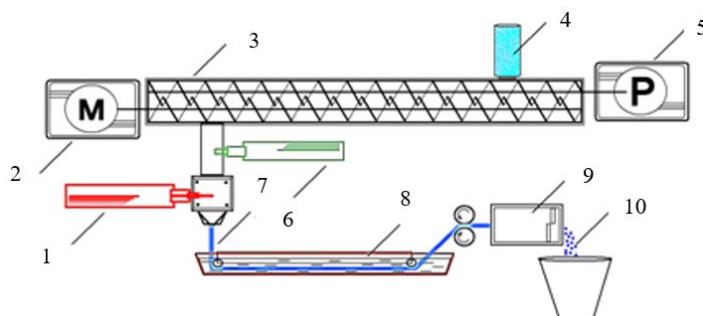


Рисунок 1 – Схема установки для получения гранул полиэтилена, обработанных ультразвуком:

1 – ультразвуковая приставка; 2 – двигатель; 3 – двухшнековый экструдер; 4 – загрузочный бункер; 5 – редуктор; синхронизированный с двигателем; 6 – датчик давления; 7 – стренга; 8 – охлаждающая ванна; 9 – гранулятор; 10 – гранулы композита

Экструзионно-ламинаторная установка на основе двух одношнековых экструдеров с независимым приводом каждого из них, объединенных в каскад (рис. 2). Диаметры шнеков 16 и 24 мм. Установка оснащена плоскощелевой головкой и узлом для обработки расплава полиэтилена ультразвуком. Титановый волновод погружен непосредственно в расплав полиэтилена. Экструзионное ламинирование проводили при температуре расплава полиэтилена 270 °С.

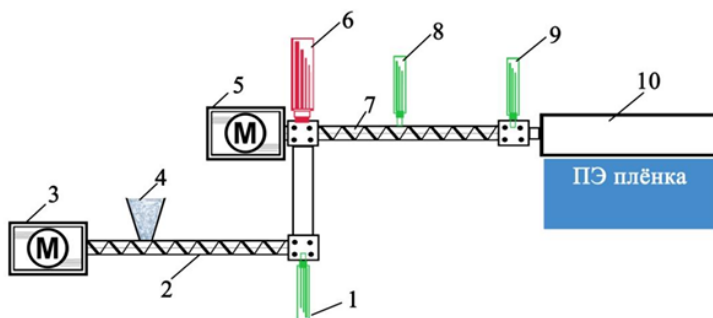


Рисунок 2 – Схема экструзионно-ламинаторной установки для получения многослойных пленок:

1, 8, 9 – датчики давления; 2, 7 – экструдеры; 3, 5 – приводы шнеков; 4 – загрузочный бункер; 6 – узел ультразвуковой обработки; 10 – плоскощелевая головка

В работе использовали следующие методы испытаний:

Влияние воздействия ультразвуковых колебаний на расплав полиэтилена при производстве образцов многослойных пленок методом экструзионного ламинирования

определяли на адгезионную прочность методом сопротивления расслаиванию в соответствии с ГОСТ 28966.1-91 и 28966.2-91 «Клеи полимерные». Расслаивание осуществляли на разрывной машине РМ-50 производства «МашПласт» (Россия). Для поддержания постоянного угла 90° между расслаиваемыми слоями разрывную машину модернизировали, сконструировав и применив специальное приспособление в виде цилиндра, вращающегося вокруг оси.

Изменение молекулярной массы (ММ) и молекулярно-массового распределения (ММР) полиэтилена, расплав которого подвергали воздействию ультразвуковых колебаний, определяли на гель-хроматографе GPCV 2000 марки Alliance фирмы WATERS (США). Колонка – STYRAGEL HT6E TOLUENE 7.8 на 300 мм, растворитель – трихлорбензол, концентрация растворов 1 мг/1 мл, поток раствора 1 мл/1 мин. Температура карусели и зоны анализа составляла 140°C .

Наличие и/или изменение функциональных групп при обработке расплава полиэтилена воздействием ультразвуковых колебаний определяли, используя Фурье-ИК спектроскопию на приборе ФСМ-1201 методом МНПВО (на просвет).

В соответствии с адсорбционной теорией адгезии наличие функциональных групп с полярной структурой в поверхностном слое полимерных пленочных материалов способствует увеличению их смачивания и, как следствие, приводит к повышению адгезии при взаимодействии контактирующих поверхностей. Определили влияние ультразвукового воздействия при модифицировании расплава полиэтилена на наличие и/или изменение содержания функциональных групп на поверхности полиэтиленовой пленки методом Фурье-ИК спектроскопии. Сравнительную характеристику осуществляли по отношению амплитуд характерных пиков полос поглощения к амплитуде пиков внутреннего стандарта.

Так, для полиэтилена внутренним стандартом является область поглощения 1460 см^{-1} (колебания связи CH_2 -). Наиболее выраженные и многократно воспроизводимые изменения отношения амплитуд пиков спектра поглощения к амплитуде пика внутреннего стандарта полиэтилена обнаружены для области колебаний 1600 см^{-1} (карбоксильная группа $-\text{COO}-$) и $1740\text{--}1720\text{ см}^{-1}$ (область поглощения карбонильной $>\text{C}=\text{O}$ группы). Характерные ИК спектры, полученные в ходе исследования, представлены на рисунке 3. Результаты анализа спектров представлены в таблице 1.

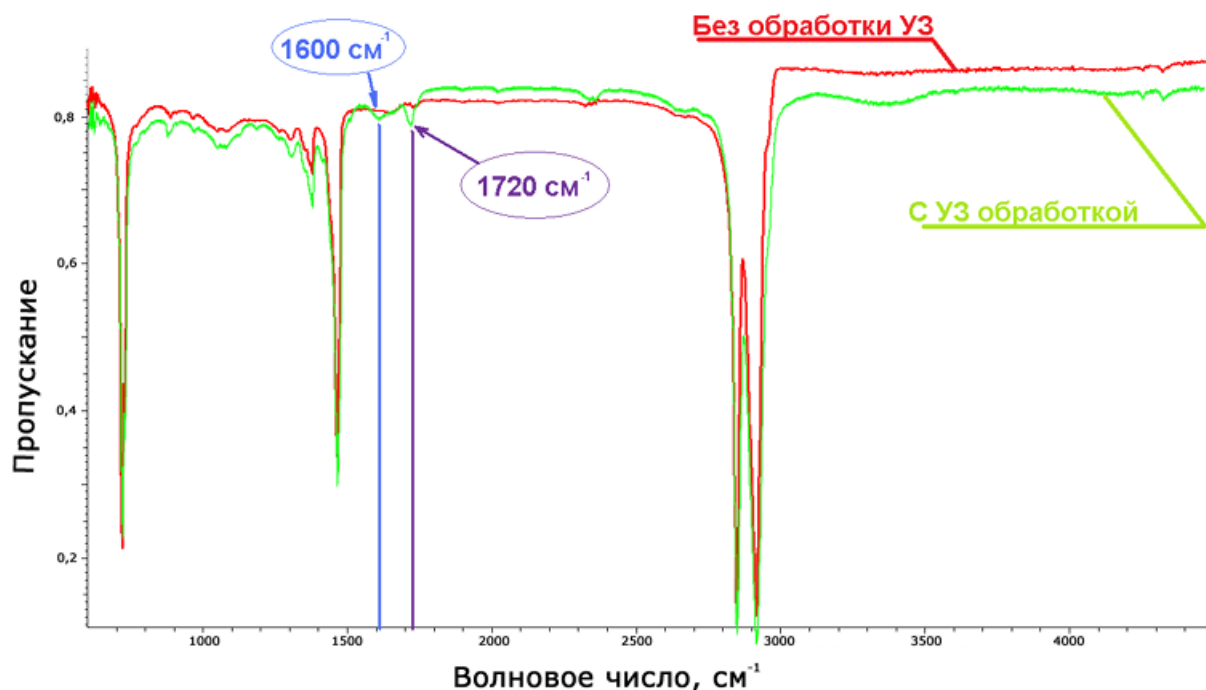


Рисунок 3 – ИК спектры исходной (без обработки УЗ) и модифицированной УЗ расплава полиэтиленовой пленки

Таблица 1 – Отношение амплитуд пиков полос поглощения ИК-спектров полиэтиленовой пленки

Наименование пленочного материала	Отношение амплитуд пиков полос поглощения	
	D_{1600}/D_{1460}	D_{1720}/D_{1460}
ПЭНП исходный	0,070	0,031
ПЭНП, обработанный УЗ	0,120	0,050

Анализируя данные, представленные в таблице 1, видно, что воздействие ультразвуковых колебаний при обработке расплава полиэтилена влияет на повышение содержания кислородосодержащих групп на поверхности полиэтиленовой пленки. По-видимому, воздействие ультразвуковых колебаний на расплав полиэтилена приводит к увеличению его полярности, в связи с чем увеличивается смачиваемость и одновременно энергия взаимодействия контактирующих поверхностей.

Также на повышение адгезионного взаимодействия полимерных пленок влияет их молекулярная масса (ММ) и молекулярно-массовое распределение (ММР). Используя гель-проникающую хроматографию, определили влияние воздействия ультразвуковых колебаний на вышеуказанные параметры при обработке расплава полиэтилена. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Молекулярно-массовое распределение ПЭНП

Наименование пленочного материала	Температура экструзионной переработки 270 °С		
	M_n	M_w	Полидисперсность
ПЭНП исходный	44000	177000	4.1
ПЭНП, обработанный УЗ	41000	161000	4.0

Анализируя экспериментальные данные, представленные в таблице 2, видно, что значения полидисперсности полиэтиленовой пленки, расплав которой модифицировали ультразвуковыми колебаниями, по сравнению с исходной, характеризуются практически одинаковыми значениями. При этом для пленки полиэтилена, обработанной ультразвуком, происходит снижение молекулярной массы, что обусловлено деструкцией высокомолекулярной фракции полиэтилена и влияет на сужение молекулярно-массового распределения (в среднем на 9 %).

Результаты, полученные при анализе ИК спектроскопии и гель-проникающей хроматографии, позволили составить возможную схему протекающих в расплаве процессов под действием ультразвука (рис. 4).

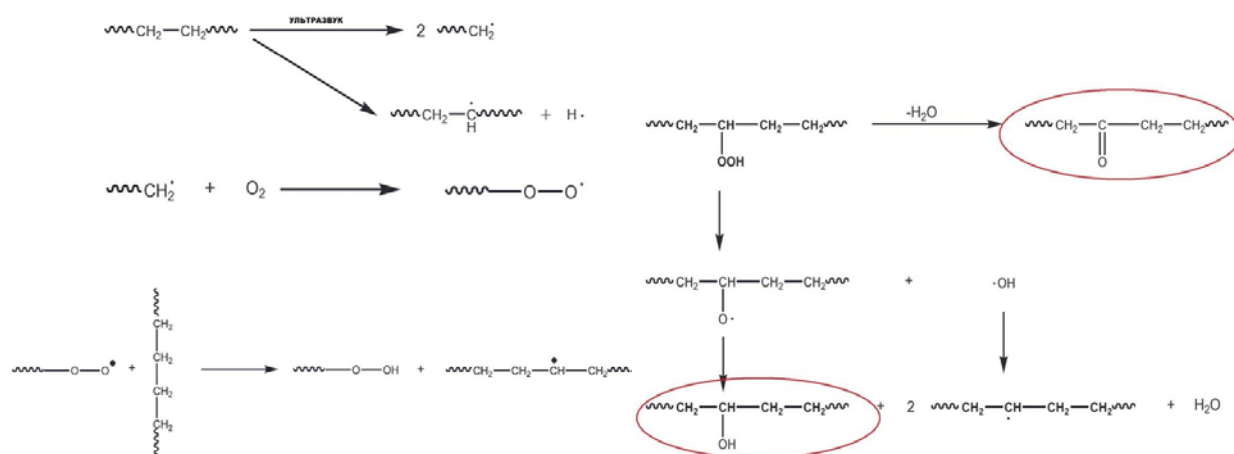


Рисунок 4 – Схема воздействия ультразвуковых колебаний на расплав полиэтилена при экструзии

Механизм действия ультразвука на расплав полиэтилена (рис. 4) при экструзии способствует усилению адгезионной прочности между слоями пленок, что обусловлено повышением гибкости и подвижности макромолекул полиэтилена. Также на повышение адгезионной прочности влияет снижение вероятности образования слабых и дефектных граничащих слоев полиэтилена и протекание химических реакций в его расплаве – инициирование ультразвуком взаимодействия образующихся макрорадикалов с низкомолекулярной фракцией полиэтилена.

Для определения адгезионной прочности полученных образцов многослойных пленок при обработке расплава полиэтилена ультразвуком определили сопротивление расслаиванию, что является наиболее важным качественным показателем адгезионной прочности многослойных пленок при их эксплуатации (рис. 5).

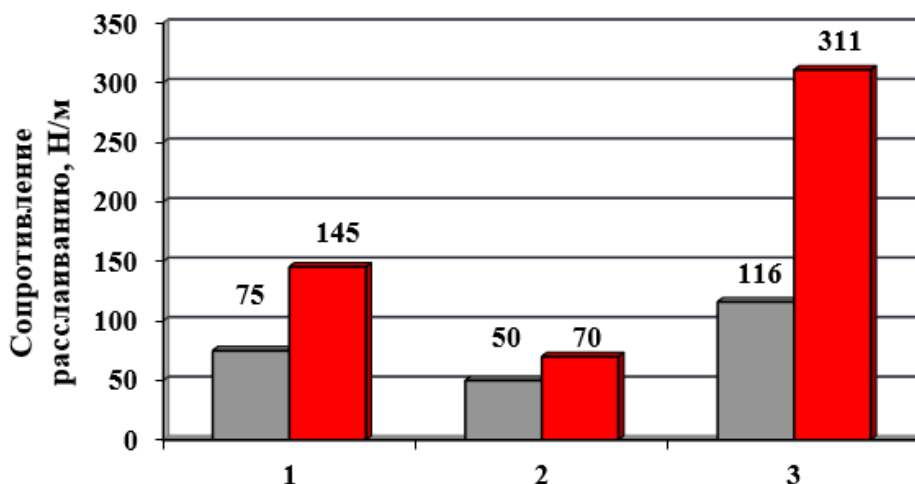


Рисунок 5 – Сопротивление расслаиванию образцов многослойных пленок, полученных экструзионным ламинированием с обработкой расплава полиэтилена УЗ (красным) и без обработки УЗ (серым):

1 – ПЭНП, нанесенный на БОПП пленку; 2 – ПЭНП, нанесенный на ПЭТ пленку;
3 – ПЭНП, нанесенный на ПА пленку

Полученные результаты (рис. 5) позволяют сделать вывод, что обработка расплава полиэтилена ультразвуком приводит к увеличению адгезионной прочности многослойных пленок при их получении экструзионным ламинированием, в отличие от многослойных пленок, для которых ультразвук не применяли. Так, для многослойной пленки, сочетающей слои из ПЭНП/БОПП, расплав которой модифицировали ультразвуком, сопротивление расслаиванию в 2 раза выше, чем для исходной. Для многослойной пленки ПЭНП/ПЭТ разница составляет 28 %, для ПЭНП/ПА – 63 %. Слой полиэтилена, полученный с применением ультразвуковой обработки расплава, обладает большей адгезионной способностью, чем слой, полученный аналогичным способом из того же материала, но без ультразвуковой обработки. По всей вероятности, повышение уровня содержания окисленных групп в полиэтилене является одной из причин увеличения сопротивления расслаиванию многослойных пленок, полученных методом экструзионного ламинирования с обработкой ультразвуком расплава полиэтилена.

Таким образом, модификация расплава полиэтилена воздействием ультразвуковых колебаний позволяет осуществить экструзионное ламинирование при температуре, не превышающей 270 °С, обеспечивая высокую адгезионную прочность полимерных пленок без использования дополнительных адгезивов и применения традиционно используемого оборудования и является перспективной технологией для производства многослойных полимерных пленок.

Список литературы

1. Загидуллин, А. И. Межслойная адгезия в многослойных полимерных пленочных материалах при изготовлении методом соэкструзии / А. И. Загидуллин, Р. М. Гарипов, А. И. Хасанов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2020. – № 12. – С. 18-22.
2. Васильев, И. Ю. Исследование поверхностных свойств биокomпозиционных материалов, модифицированных обработкой в плазме коронного разряда / И. Ю. Васильев, В. В. Ананьев // Вестник ВГУИТ. – 2023. – Т. 85, № 2. – С. 205-215.
3. Plyusnin N.I., Usachev P.A., Pavlov V.V. Effect of thickness and annealing of the si(001)2×1-cu wetting layer on the morphology of layered nanofilms based on fe, co, and cu and their ferromagnetic properties. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15. no S3.1. P. 131-136.

IMPROVING ADHESION STRENGTH OF MULTILAYER FILMS IN EXTRUSION LAMINATION TECHNOLOGY

I. Yu. Vasilyev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

E-mail: iljanaras@ya.ru

Abstract. The scientific article is devoted to the study of the mechanism of increasing the adhesive strength of polymer films in extrusion lamination technology. As a substrate, films of biaxially oriented polypropylene, polyethylene terephthalate and polyamide were used, on which a polyethylene melt was applied, having previously exposed it to ultrasonic vibrations. Modification of the polyethylene melt by ultrasound affects the increase in the adhesive strength of the above multilayer films and is due to the occurrence of functional groups with a polar structure, in particular carbonyl and carboxyl, as confirmed by IR spectroscopy, as well as a decrease in the molecular weight and molecular weight distribution of polyethylene, which affects the increase in flexibility and mobility of its macromolecules and a decrease in the likelihood of formation of weak and defective boundary layers of polyethylene. Thus, modification of the polyethylene melt by ultrasonic vibrations allows extrusion lamination to increase the adhesive strength of the contacting polymer layers and is a promising technology for the production of multilayer polymer films.

Keywords: polyethylene, ultrasonic exposure, multilayer films, extrusion, extrusion lamination, adhesion.

References

1. Zagidullin, A.I. Interlaminar Adhesion In Multilayer Film Polymer Materials When Producing By Coextrusion Method / A.I. Zagidullin, R.M. Garipov, A.I. Khasanov // Adhesives. Sealants. Technology. 2020. No 12. S. 18-22.
2. Vasiliev, I.Yu. Investigation of surface properties of biocomposite materials modified by corona plasma treatment / I.Yu. Vasiliev, V.V. Ananiev // Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. Vol. 85. no. 2. Pp. 205-215.
3. Plyusnin N.I., Usachev P.A., Pavlov V.V. Effect of thickness and annealing of the si(001)2×1-cu wetting layer on the morphology of layered nanofilms based on fe, co, and cu and their ferromagnetic properties. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15. no S3.1. P. 131-136.

ТЕНДЕНЦИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЦИКЛА РЕГЕНЕРАЦИИ ЩЕЛОКА В СУЛЬФАТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В. Г. Казаков, Е. Н. Громова*, В. С. Максимов

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: gromova.gturp@mail.ru*

Аннотация. В сульфатном производстве целлюлозы регенерация щелока играет ключевую роль в экономии ресурсов и снижении экологической нагрузки. Современные тенденции модернизации этого цикла направлены на повышение его энергоэффективности, сокращение выбросов и оптимизацию технологических процессов. В статье рассматриваются перспективные технологии и их влияние на эффективность регенерации щелока, а также анализируется опыт ведущих предприятий отрасли.

Ключевые слова: энергоэффективность, черный щелок, сульфатное производство, регенерация, электролиз.

В последние годы мировая целлюлозно-бумажная промышленность сталкивается с беспрецедентным давлением в части ужесточения экологических норм, что предусматривает необходимость снижения углеродного следа отрасли.

В условиях растущей конкуренции и роста экологических требований модернизация систем регенерации варочного раствора становится критически важной для поддержания конкурентоспособности предприятий ЦБП, при этом экономическая эффективность выступает основным драйвером внедрения инновационных решений в данном направлении.

На современных целлюлозных заводах черный щелок традиционно перерабатывается в регенеративном процессе [1], где отработавший щелочной раствор концентрируется до 65–75 % (мас.) в выпарной батарее, а затем сжигается в содорегенерационном котле с выработкой тепловой энергии в виде пара, при этом соли натрия превращаются в карбонат натрия и сульфид натрия. Но для небольших предприятий такой процесс восстановления черного щелока неэкономичен; вместо этого щелок перерабатывается с использованием стандартных технологий очистки промышленных сточных вод, таких как аэробные и/или анаэробные системы.

В настоящее время разрабатывается способ кислотно-щелочной переработки черного сульфатного щелока [2], суть которого заключается в том, чтобы сначала органические соединения осаждаются из щелока путем подкисления серной кислотой, затем полученный раствор нейтрализуют щелочью (например, гидроксидом калия) до нейтральных значений pH (≥ 7), после чего выпаривают. Кристаллизация солей проводится до достижения концентрации 100–500 г воды на 100 г сухого вещества. Жидкую фазу (маточный раствор) после корректировки состава направляют на абсорбцию сероводорода, а затем возвращают в процесс варки целлюлозы для приготовления технологической щепы с сульфидностью 30 %.

Однако этот способ имеет ряд недостатков: нейтрализация каустической соды приводит к образованию твердого сульфата натрия в процессе выпаривания. Данный побочный продукт имеет низкую рыночную стоимость, что делает необходимым его регенерацию для повторного использования, добавляя в процесс дополнительную энергоемкую стадию. Применение гидроксида калия (KOH) для нейтрализации, хотя и не влияет на качество конечной продукции, значительно повышает коррозионную активность раствора. Кроме того, большой расход этого дорогостоящего реагента и увеличение объемов материальных потоков ведут к существенному росту капитальных и эксплуатационных расходов.

Еще одним способом переработки черного щелока является технология газификации, позволяющая производить синтез-газ [3, 4]. В процессе газификации в газификатор подается черный щелок с содержанием твердых веществ 65–75 % и ограниченное количество воздуха

таким образом, что ряд реакций приводит к превращению черного щелока в CO , H_2 , CH_4 и карбонат натрия при высоких температурах [3, 4]. Синтез-газ из биомассы затем может быть использован в качестве основного материала для синтеза метанола и диметилового эфира (ДМЭ) или в качестве топлива для сжигания в цикле газовой турбины для выработки электроэнергии. Если в качестве окислителя используется кислород, то теплотворная способность синтез-газа составляет 12,8–13,8 МДж/м³. Образовавшийся карбонат натрия путем подщелачивания гашеной известью преобразуют в гидроксид натрия.

Технологии газификации делятся на два основных класса: низкотемпературная и высокотемпературная. Низкотемпературные газификаторы работают при температурах 600–850 °С, что ниже температуры плавления неорганических веществ, а установки высокотемпературной газификации обычно работают в диапазоне 900–1000 °С.

Наиболее эффективной на сегодняшний день считается термическая система Chemrec (рис. 1), в которой происходит разложение черного щелока при давлении 32 бар и температуре 950–1000 °С, при этом в качестве газифицирующего агента используется кислород.

В результате высокотемпературной газификации образуется расплав минеральной части черного щелока. Органическая часть газифицируется до синтез-газа, содержащего окись углерода, водород и метан.

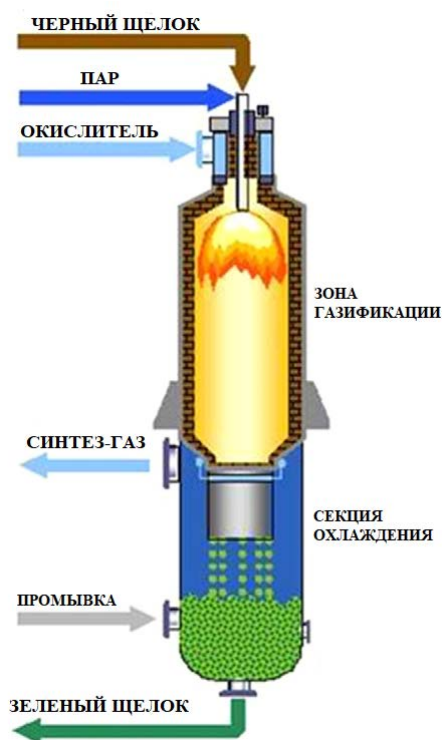


Рисунок 1 – Газогенератор Chemrec с секцией охлаждения

Представляет интерес каталитическая гидротермальная газификация черного щелока — это новая технология производства синтез-газа, обогащенного метаном, в качестве альтернативы традиционной системы рекуперации. Этот процесс также известен как сверхкритическое окисление воды (СКВО). В отличие от других процессов газификации, черный щелок из варочного котла непосредственно вводится в газификатор при сверхкритических условиях (600 °С, 300 бар).

Процесс каталитической гидротермальной газификации состоит из трех стадий: фазы нагрева, отделения солей и непосредственно газификации. Во время фазы нагрева более крупные молекулы черного щелока гидролизуются с образованием конифериловых спиртов. Целлюлоза, присутствующая в лигнине, быстро разлагается в воде при температуре около 250 °С, а минеральная часть щелока выпадает в осадок и возвращается в технологический цикл. В каталитическом реакторе происходит синтез CH_4 за счет разложения карбоновой

кислоты, спиртов и альдегидов. Для интенсификации процесса и управления селективностью продукции используются гомогенные (например, карбонаты щелочных металлов) или гетерогенные (например, на основе никеля или рутения) катализаторы, которые помогают увеличить выход целевых газов (например, метана или водорода) и снизить образование смол и твердого остатка.

Необходимо отметить, что при всех описанных выше способах регенерации черного сульфатного щелока предполагается предварительная концентрация раствора до содержания сухих веществ от 65 до 75 %, что требует значительных затрат энергии на выпарку.

В настоящей статье авторы более подробно рассмотрят процесс электролиза черного сульфатного щелока, как один из перспективных способов регенерации щелочи.

Электролиз черного щелока обладает большим потенциалом применения по следующим причинам [5]:

- традиционный процесс восстановления черного щелока на целлюлозных заводах способствует образованию большого количества вредных выбросов, которые оказывают значительное воздействие на окружающую среду, тогда как в ходе электролиза побочными продуктами являются водород и сера, которая может использоваться в цикле производства серной кислоты;

- общая энергетическая эффективность процесса электролиза черного щелока выше, чем у традиционной схемы, за счет исключения из технологии выпарки содорегенерационного котла и известерегенерационной печи;

- обработка черного щелока электролизом приводит к образованию твердой биомассы, включая лигнин и другие органические осадки, которые можно использовать в качестве биотоплива.

Электролизные реакторы применяются в различных отраслях промышленности. В процессе электролиза вода (с добавлением электролита) подается в реактор и разлагается на водород и кислород в катодной и анодной камерах соответственно. Для обработки черного щелока используется электролизный реактор, разделенный на камеры катион-обменной мембраной, которая пропускает только катионы (Na^+), но препятствует смешиванию анолита и католита и переносу органических веществ в катодное пространство. В результате, помимо водорода, в качестве основного продукта в катодной камере образуется гидроксид натрия, а лигнин полностью осаждается в анодной камере. Как правило, процесс осуществляют при повышенной температуре (60–90 °C) для снижения вязкости щелока и увеличения электропроводности. Оптимальная плотность тока подбирается для максимизации скорости разложения органики и минимизации энергозатрат.

Обработанный анолит (обедненный органическими веществами и обогащенный H_2SO_4 за счет переноса ионов H^+) выводится из анодной камеры и направляется на нейтрализацию. Регенерированный католит (раствор NaOH) выводится из катодной камеры и возвращается в процесс варки целлюлозы. Образующиеся газы (O_2 , H_2 , CO_2) отводятся и, при необходимости, утилизируются.

Важными факторами, влияющими на эффективность электролиза, являются выбор материала электродов и тип катион-обменной мембраны.

От материала, из которого выполняется анод, зависит эффективность окисления органики, поэтому для электродов используются стойкие к коррозии и высокоактивные материалы: оксидные покрытия на основе титана (DSA-аноды) – RuO_2 , IrO_2 , PbO_2 или аноды из магнетита (Fe_3O_4).

Требование химической и термической стабильности для катион-обменной мембраны в процессе электролиза черного щелока является абсолютно ключевым для его работоспособности. В катодной камере происходит генерация щелочи, и ее концентрация может достигать 20 % и более. Высокая концентрация OH^- -ионов вызывает сильное набухание и гидролиз многих полимерных материалов, разрушая их структуру. Катион-обменная мембрана работает благодаря отрицательно заряженным функциональным группам (например, $-\text{SO}_3^-$), которые притягивают и пропускают катионы (Na^+). Окислители или щелочь

могут отрывать или видоизменять эти группы, безвозвратно снижая ионообменную емкость мембраны и ее способность проводить ионы. Если мембрана разрушается, она начинает хуже пропускать ионы Na^+ , что ведет к росту электрического сопротивления ячейки. Для поддержания той же силы тока приходится повышать напряжение, что приводит к колоссальному росту энергопотребления.

Один из главных недостатков электролиза – большие затраты электроэнергии и, как следствие, увеличение себестоимости потребления электроэнергии на производстве. Однако по сравнению с газификацией и сжиганием в СРК, обработка черного щелока электролизом имеет следующие преимущества:

1. Отсутствие необходимости концентрирования жидкого черного щелока позволяет исключить огромные энергозатраты на выпарку.
2. В процессе регенерации NaOH не расходуется известь, что исключает энергоемкий цикл регенерации извести.
3. Снижение выбросов CO_2 и других вредных газов.
4. Крупнотоннажное производство лигнина, который потенциально может быть использован в качестве биотоплива.

Таким образом, проведенный анализ современных тенденций модернизации цикла регенерации щелока в сульфатном производстве целлюлозы позволяет утверждать, что ключевым вектором развития является переход к ресурсо- и энергоэффективной, экологически безопасной модели производства. Основные усилия сосредоточены на внедрении технологий, позволяющих значительно снизить удельное потребление топлива и электроэнергии, минимизировать выбросы загрязняющих веществ и повысить общую надежность целлюлозного производства.

Список литературы

1. Казаков, В. Г. Выпаривание растворов целлюлозного производства / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – 192 с.
2. Патент РФ 2687986. МПК D21C 11/00. Способ регенерации натриевых солей из раствора черного щелока при производстве сульфатной целлюлозы / О. В. Федорова, В. Г. Казаков, П. В. Луканин; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна». Заявлено 30.08.2018; опубл. 17.05.2019, Бюл. № 14. – 6 с.
3. Софронова, Е. Д. Современные технологии в целлюлозной промышленности / Е. Д. Софронова, В. А. Липин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – № 223. – С. 267-284.
4. Луканин, П. В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий / П. В. Луканин // Известия высших учебных заведений Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 3-11.
5. Непенин, Ю. Н. Производство сульфатной целлюлозы / Ю. Н. Непенин. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 601 с.

TRENDS IN MODERNIZATION OF THE LYE REGENERATION CYCLE IN SULFATE PULP PRODUCTION

V. G. Kazakov, E. N. Gromova*, V. S. Maksimov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: gromova.gturp@mail.ru*

Abstract. In sulfate pulp production, liquor regeneration plays a key role in saving resources and reducing environmental stress. Current trends in the modernization of this cycle are aimed at

increasing its energy efficiency, reducing emissions and optimizing technological processes. The article discusses promising technologies and their impact on the efficiency of liquor regeneration, as well as analyzes the experience of leading enterprises in the industry.

References

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРПЕСЧАНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ МАКУЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. В. Зайцев, В. К. Дубовый*

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: dubovy2004@mail.ru*

Аннотация. Переработка макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б сопровождается накоплением отходов. Они представляют собой группы веществ различного происхождения. Массовые количества отходов и требования к их утилизации на полигонах имеют большие финансовые издержки для предприятий. Переработка отходов стала актуальной проблемой переработки макулатуры. В исследовании показано влияние содержания отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит на их свойства. Полимерпесчаные плиты – это композиция песка и полимеров, которые используются в качестве связующего. В исследовании рассмотрена возможность использования отходов макулатуры, которая представляет из себя смесь волокон вторичной переработки целлюлозы, как природного полимера и синтетических полимеров. Эта масса отходов подвергается переработке в полимерпесчаные плиты. Основой технологического решения является использование отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б в качестве связующего.

Ключевые слова: макулатура, отходы макулатуры, полимерпесчаные плиты, связующее, минеральный наполнитель, соотношение компонентов, прочность при статическом изгибе, ударная вязкость, водопоглощение, истираемость.

Полимерпесчаные плиты – это композиция песка и полимеров, которые используются в качестве связующего [1]. Отходы макулатуры представляют собой многокомпонентную смесь, большая доля в которой приходится на природные и синтетические полимеры, которые обладают связующей способностью. В ОАО «Караваево» ежедневно перерабатывается около 100 т макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б и образуется примерно 20 т в сутки влажных отходов [2].

Для оценки возможности использования отходов макулатуры в качестве связующего была проведена оценка компонентного состава отходов макулатуры ОАО «Караваево» (результаты исследования приведены на рисунке 1).

Из данных, представленных на рисунке 1, следует, что 51 % отходов макулатуры составляют синтетические полимеры, а 20 % – волокна вторичной переработки древесной целлюлозы как природного полимера. Элементный состав отходов макулатуры представлен в исследовании [3].

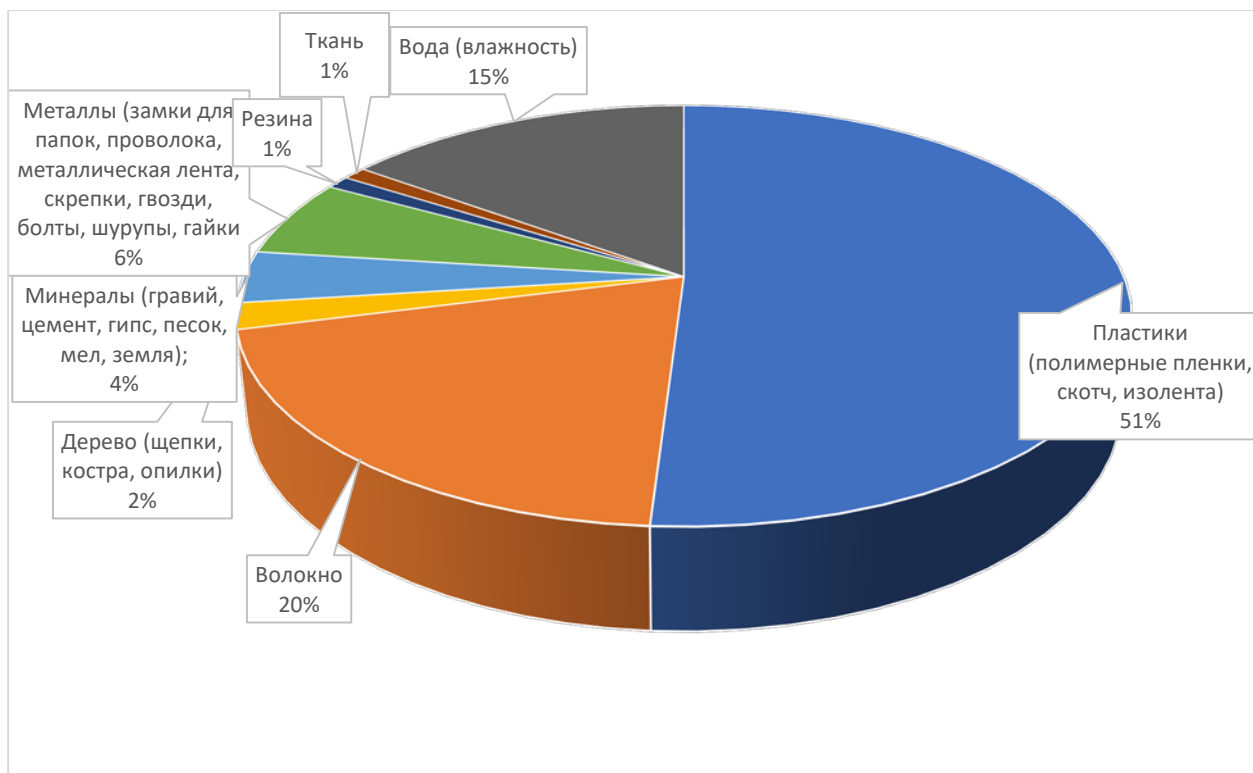


Рисунок 1 – Компонентный состав отходов макулатуры

Для исследования качественных характеристик полимерпесчаных плит с использованием отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б, как эффективного связующего, были определены количественные параметры потребительских свойств при заданных геометрических размерах образцов полимерпесчаных плит, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Необходимые количественные параметры полимерпесчаных плит (ГОСТ Б.В. 2.7. – 139:2007)

Свойство	Значение
Истираемость	Не более 0,1 г/см²
Водопоглощение	Не более 2,0 %
Предел прочности при статическом изгибе	Не менее 7,5 МПа
Предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость)	Не менее 3,3 кДж/м ²
Плотность	1600 - 2600 кг/м³
Размер плитки	330 x 330 x 15 мм

Для получения исследуемых образцов плит использовалась технологическая установка ОАО «Каравеево». Были изготовлены образцы плит размером 330x330x15 мм, с различной композицией – в соотношениях 90/10–100, состоящей из песка и отходов макулатуры. Характеристика компонентов: песок карьерный просеянный – влажность 2–5 %, фракция 1,5–2 мм. Отходы макулатурно-бумажного производства (дробленая и высушенная смесь различных полимеров и макулатурного волокна): влажность 3 %, фракция 10 мм. С целью получения более наглядной картины влияния связующего (макулатурные отходы) на

физико-механические свойства полимерпесчаных плит были изготовлены и испытаны плиты с композицией, где присутствовал дробленый (до 10 мм) полипропилен белого цвета с соотношением компонентов: песок/макулатурные отходы/полипропилен – 50/45/5 и 50/40/10. Все образцы изготавливались при одном и том же температурном режиме: 4 зоны нагрева по порядку: 1 зона (прогрев) – 170 °С, 2 зона (доведение до нужной температуры) – 190 °С; 3, 4 зона (расплав и прессование) – 220 °С. Результаты исследований полученных образцов полимерпесчаных плит представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические результаты исследований образцов полимерпесчаных плит

№ образца	Композиция песок/отходы/полимер, %	Прочность при статическом изгибе, F, МПа	Ударная вязкость, Q, кДж/м ²	Водопоглощение, G, %	Истираемость, E, г/см ²	Плотность, кг/м ³
1	90/10	5,1	2,4	2,5	0,30	2750
2	80/20	6,0	2,6	2,3	0,25	2600
3	70/30	7,1	2,8	2,1	0,20	2450
4	60/40	7,3	3,0	1,9	0,15	2300
5	50/50	7,5	3,3	1,7	0,10	2150
6	40/60	7,8	3,5	1,4	0,09	2000
7	30/70	8,0	3,7	1,1	0,08	1900
9	20/80	8,4	3,9	0,9	0,08	1800
10	10/90	8,9	4,2	0,8	0,07	1700
11	100	10,0	4,5	0,7	0,07	1600
12	50/45/5	10,6	4,9	0,8	0,09	2150
13	50/40/10	11,1	5,4	0,7	0,08	2100

Ударная вязкость плит в пределах снижения доли песка 90–10 % повышается на 118 %. Установленные пределы ударной вязкости характеризуют плиты как материал эффективно поглощающий ударную энергию. Величина ударной вязкости при соотношении «песок/отходы» в композиции 50/50 и 40/60 соответствует значениям 3,3 и 3,5 кДж/м², которые являются минимально достаточными при эксплуатации полимерпесчаных плит.

Показатель водопоглощения в пределах снижения доли песка 90–10 % снижается на 40 %. Установленные пределы водопоглощения характеризуют плиты как гидрофобный материал. Поэтому водопоглощение в пределах соотношения «песок/отходы» в композициях 50/50 и 40/60, соответствующему значениям водопоглощения 1,7 и 1,4 %, принимается в качестве минимально достаточной эксплуатационной характеристики.

Полученные результаты исследований композиций полимерпесчаных плит 50/50 и 40/60 на истираемость соответствуют значениям 0,10 и 0,09 г/см².

Таким образом, испытание экспериментальных образцов плит по основным физико-механическим свойствам подтвердило высокое качество полимерпесчаных плит, изготовленных на основе макулатурных отходов в ОАО «Каравачево», на созданной опытно-промышленной установке. Результаты исследования позволили установить интервал полимерно-песчаного состава и интервалы основных показателей качества плит, отвечающие условию минимальной достаточности для эффективного использования ресурсов макулатурных отходов и длительной эксплуатационной пригодности полимерпесчаных плит, таблица 3.

Таблица 3 – Интервалы эффективного использования полимерпесчаных плит

Интервал: «песок/отходы», %	Интервал F, МПа	Интервал Q, КДж/м ²	Интервал G, %	Интервал E, г/см ²
50/50 – 40/60	7,5 – 7,8	3,3 – 3,5	1,7 – 1,4	0,10 – 0,09

С целью определения значимости влияния полимеров на физико-механические свойства полимерпесчаных плит были изготовлены и исследованы образцы плит с добавлением в композицию чистого полимера – фракционированного полипропилена (размер частиц 10 мм). Результаты исследований представлены на рисунке 2.

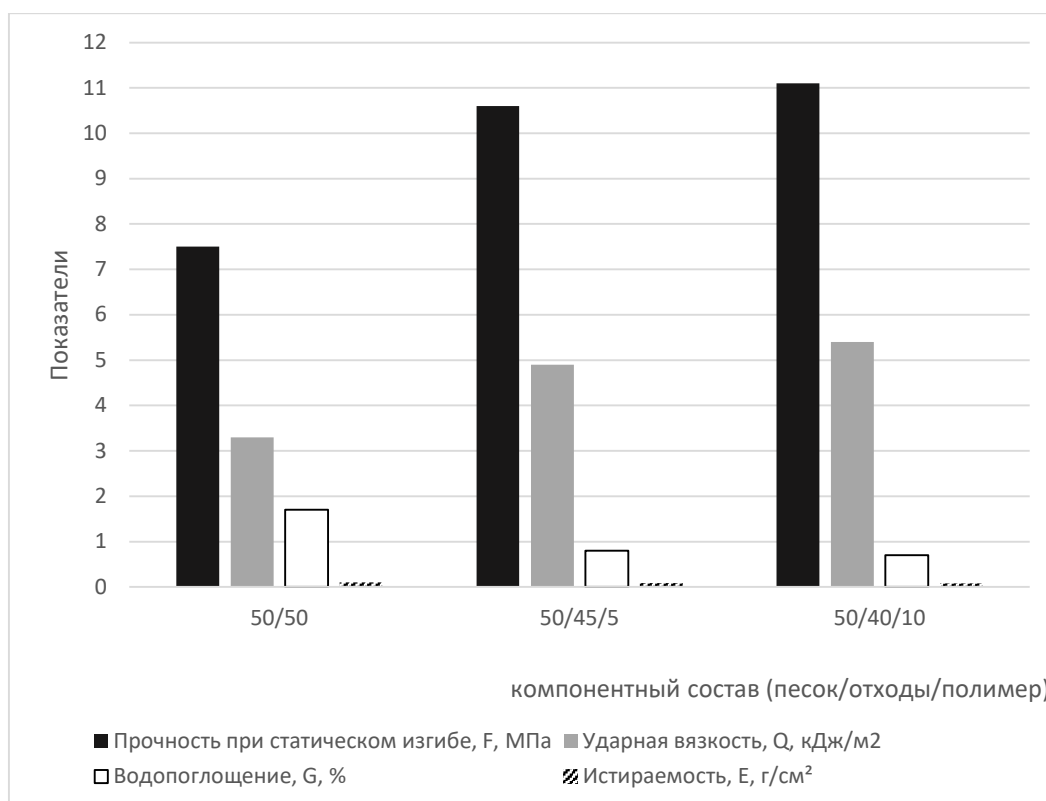


Рисунок 2 – Зависимость потребительских свойств полимерпесчаных плит от добавок ситого полимера

С увеличением в композиции полимерпесчаных плит содержания полипропилена, предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость при 10 % содержании его составляют 11,1 МПа и 5,4 кДж/м². При этом показатели водопоглощения уменьшаются и составляют, соответственно, 0,7 % и 0,08 г/см².

Выводы:

1. Установлено, что использование в композиции полимерпесчаных плит отходов макулатуры, как связующего, дает возможность получить широкий спектр материалов для городских и дачных ландшафтов с заданными физико-механическими свойствами.
2. Доказано существенное влияние макулатурных отходов бумажного производства в композиции полимерпесчаных плит на их потребительские свойства.
3. Определено, что с увеличением содержания отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость возрастают, при этом водопоглощение и истираемость плит уменьшаются.
4. Установлено минимальное содержание отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит с заданными физико-механическими свойствами, которое составляет 50 %.

5. Определено, что добавка полипропилена в количестве 10 % способствует улучшению качественных характеристик полимерпесчаных плит.

Список литературы

1. Khan, A. A., Ghafoor, K. Innovative Techniques for the Production of Polymer Sand Slabs Materials Today: Proceedings 50. 2022. P. 986-992.
2. Звягина, А. И. Вторичные сырьевые ресурсы и технологии их использования для производства строительных материалов / А. И. Звягина // Экология производства. – 2007. – № 4. – С. 50-51.
3. Зайцев, А.В. Исследование количества и качества отходов макулатуры в производстве тарного картона / А. В. Зайцев, В. К. Дубовый, И. Н. Ковернинский, Е. И. Симонова, Е. Ю. Демьянцева // Химия растительного сырья. – 2025. – № 2. – С. 383-390.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING POLYMER-PESCH PLATES BASED ON PAPER MANUFACTURING WASTE

A. V. Zaitsev, V. K. Dubovyi*

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: dubovy2004@mail.ru*

Abstract. The recycling of MS-5B and MS-6B paper waste is accompanied by the accumulation of waste. This waste consists of a group of substances of various origins. The large amounts of waste and the requirements for its disposal at landfills have significant financial costs for enterprises. The recycling of waste has become an urgent issue in the recycling of paper waste. The study examines the impact of the content of paper waste in the composition of polymer-sand panels on their properties. Polymer-sand panels are a combination of sand and polymers that are used as binders. The study considers the possibility of using waste paper, which is a mixture of recycled cellulose fibers as a natural polymer and synthetic polymers. This waste is processed into polymer-sand boards. The technological solution is based on the use of waste paper MC-5B and MC-6B as a binder.

Keywords: waste paper, waste paper products, polymer-sand boards, binder, mineral filler, component ratio, static bending strength, impact strength, water absorption, and abrasion resistance.

References

1. Khan, A. A., Ghafoor, K. Innovative Techniques for the Production of Polymer Sand Slabs Materials Today: Proceedings 50, 2022, P. 986-992. (In Russian)
2. Zvyagina, A.I. Secondary raw materials and technologies for their use in the production of building materials / A.I. Zvyagina // Ecology of Production. 2007. no. 4. Pp. 50-51. (In Russian)
3. Zaitsev A.V., Dubovy V.K., Koverninsky I.N., Simonova E.I., Demyantseva E.Y. Study of the quantity and quality of waste paper in the production of containerboard / A.V. Zaitsev, V.K. Dubovy, I.N. Koverninsky, E.I. Simonova, E.Y. Demyantseva // Chemistry of plant raw materials. 2025. no. 2. P. 383-390.

ЗАГОТОВКА БАЛАНСОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ КАНАТНЫМИ УСТАНОВКАМИ В ХОДЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

А. С. Королько, Н. С. Королько*

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: kns89lta@mail.ru*

Аннотация. При производстве лесохозяйственных мероприятий, таких как расчистка квартальных просек, расчистка или создание мелиоративных канав и прочее, образуется достаточное количество разносортной древесины. Ввиду труднодоступности территорий, на которых производится рубка, ее трелевка классическими системами машин невозможна. Вовлечение в оборот древесины, заготовленной в процессе производства, лесохозяйственных мероприятий, позволит снизить затраты на их осуществление. Одним из способов трелевки такой древесины может стать использование канатных установок с поворотами трасс, оснащенных автономной шарнирно-сочлененной кареткой, разрабатываемой кафедрой технологии лесозаготовительных производств ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет».

Ключевые слова: канатные установки, гидромелиорация, балансовая древесина, шарнирно-сочлененная каретка.

Проведение противопожарных мероприятий по прочистке и разрубке квартальных просек предусмотрено лесохозяйственным регламентом субъекта РФ [1]. Арендаторами лесных участков и государственными учреждениями в ходе выполнения государственного задания выполняется рубка древесно-кустарниковой растительности в границах квартальных просек и мелиоративной сети. Фактически квартальная сеть и мелиоративная сеть является лесосекой, длина которой кратно превышает ее ширину. Проведение данных лесохозяйственных мероприятий является убыточным для предприятия. Уменьшения затрат возможно достичь вовлечением вырубаемой древесины в товарный оборот.

Необходимость ремонта мелиоративной сети является типичной проблемой лесничеств [2]. Вырубаемые в процессе расчистки объемы древесины, превышают объемы, получаемые при расчистке квартальных просек и минерализованных полос, поскольку такие мероприятия для канав выполняются гораздо реже. Регулярные работы по расчистке мелиоративной сети закончились в 70-х годах XX века, а расчистка квартальных просек производится в среднем раз в 10–15 лет. Захламление и заиливание канав приводит к подтоплению и заболачиванию лесных территорий. Произрастающая в таких условиях древесина низкого качества, в основном лиственных пород, представляет из себя в основном балансовую древесину. Применение высокопроизводительной тяжелой техники при трелевке древесины в данном случае невозможно. Решением может стать применение канатных установок, позволяющих производить повороты трелевочной трассы, повторяющей конфигурацию трасс мелиорации.

Для оценки потенциала объемов древесины, вовлекаемой в товарный оборот в процессе проведения лесохозяйственных мероприятий, возможно произвести анализ объемов таких работ, в соответствии с Государственным заданием на 2025 год в Санкт-Петербурге. Ежегодный объем работ по расчистке квартальных просек в Курортном лесничестве составляет 36 км. При этом объем вырубаемой древесины составляет 500–600 куб. м. Что является достаточно низким средним показателем по плотности, однако отдельные квартальные просеки после прохождения штормовых ветров могут содержать до 100 куб. м древесины на 1,6 км при ширине просеки в 4 метра.

Приоритетной стоит задача проведения работ по гидромелиорации на территории городских лесов. Общая протяженность мелиоративной сети в Приморском участковом лесничестве Курортного лесничества Санкт-Петербурга составляет 162 км. 90 % канав находятся в неудовлетворительном состоянии, что приводит к заболачиванию низинных участков леса. При производстве работ по расчистке мелиоративной сети в 2025 году было вырублено 144 куб. м древесины на площади 0,6 га при протяженности канавы 3,0 км. Что соответствует типичному среднему запасу на га. Средний объем хлыста составил 0,51 куб. Ввиду невозможности трелевки колесной техникой по почвенно-грунтовым условиям, а также ввиду невозможности валки древесины в выделах вдоль всей протяженности канавы, заготовленная в ходе работ балансовая древесина лиственных пород была утилизирована на месте методом измельчения бензопилой на фракцию менее 30 см, в соответствии с требованиями для городских лесов. Схема канавы приведена на рисунке 1.

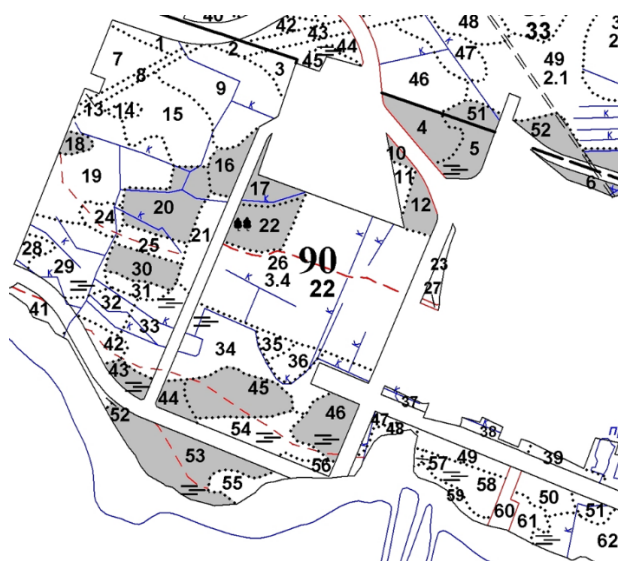


Рисунок 1 – Схема мелиоративных канав

Дальнейшая расчистка канавы от неликвида и разбор заторов производились вручную, бригадой рабочих в составе 11 человек. Процесс расчистки приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Ручная расчистка мелиоративной канавы

В отличие от расчистки придорожных канав или канав сельскохозяйственных полей, расчистка мелиоративных канав в лесу имеет ряд особенностей из-за недоступности. Ручная расчистка на первый взгляд кажется наиболее трудоемкой. Однако расчистка уже существующих канав заключается в уборке древесно-кустарниковой растительности, уборке валежника и расчистке иловых отложений. Мощность тяжелой спецтехники, типа гусеничного экскаватора, в этих условиях является избыточной. Кроме того, для ее работы требуется расчистка рабочей зоны шириной 3–4 м вдоль канавы. Такая рабочая зона будет находиться в лесных выделах вне паспортной зоны ширины канавы. Рубка древостоя в таком случае может быть признана незаконной и повлечь административное или уголовное преследование. В случае правомерного сноса насаждений на всю дополнительную ширину, получаемая древесина также не будет вовлечена в товарный оборот. Таким образом, использование существующей спецтехники делает работы по расчистке систем гидромелиорации более затратными, чем при ручной расчистке.

Трудозатраты на утилизацию порубочных остатков и заготовленной древесины соответствовали расчетным по межотраслевым нормам выработки времени на работы, выполняемые при проведении санитарных рубок и рубок ухода, с учетом доставки рабочих составили 160 чел./ч. [3]. Трудозатраты на расчистку канавы составили 115 чел./час. Ставка платы рабочего 6-го разряда равна 350 р/час.

При стоимости балансовой древесины 2500 руб/куб.м общая сумма древесины, вовлеченной в товарный оборот, могла составить 360 т. р. [4].

Кафедрой технологии лесозаготовительных производств ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет» предложено техническое решение в виде моторизованной шарнирно-сочлененной каретки и поворотного башмака (далее ШСК) [5]. Созданная радиоуправляемая модель на испытательных стендах показала работоспособность концепции (рис. 3).

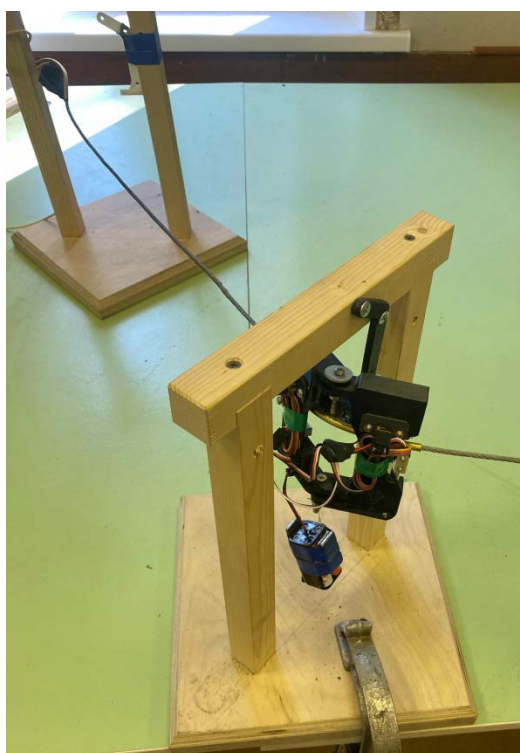


Рисунок 3 – Испытательный стенд с моделью радиоуправляемой ШСК

При применении данного технического решения для трелевки древесины весь ее объем может быть реализован. Трудозатраты на трелевку при производительности каретки, сопоставимой с производительностью зарубежных аналогов [6], с учетом времени на монтаж/демонтаж составит 8 маш./смен. Количество персонала для работы канатной

установки – 2 человека. Таким образом трудозатраты на трелевку ШСК составят 120 чел./час., что ниже трудозатрат на измельчение.

Для увеличения производительности труда при расчистке дна мелиоративных канав также возможно применение ШСК. В таксационных описаниях мелиоративные каналы обозначаются отдельными выделами. Канавы, стоящие на балансе учреждений, имеют паспорт, в которых указывается их длина и ширина, которая обычно равна 2–4 метра. Расчистка профиля канавы с помощью экскаватора требует дополнительной расчистки рабочей зоны, шириной 3–4 метра вдоль всей длины канавы, т. е. проведение рубки насаждений в соседних с канавой выделах. Орган государственной власти при этом может отказать в проведении таких работ. Также применение спецтехники может быть ограничено по почвенно-грунтовым условиям. При этом расчистка дна и профиля канавы производится вручную с помощью бригады рабочих, оснащенных лопатами. Альтернативой может стать использование ШСК после трелевки для расчистки профиля канавы от иловых отложений, схема работы приведена на рисунке 4.

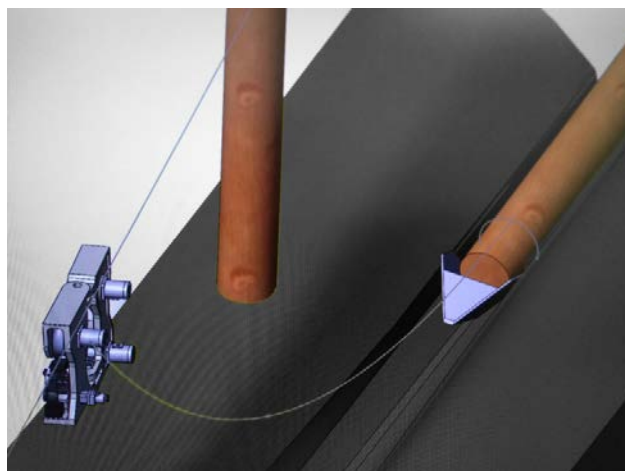


Рисунок 4 – Расчистка канав ШСК

В случае использования ШСК последняя готовящаяся к перемещению пачка древесины складывается в клин на трос в ложе канавы, также могут быть использованы дополнительные приспособления, позволяющие сохранить форму клина. Из торцов сложенных бревен формируется плуг, повторяющий профиль канавы. Протягивая плуг вдоль канавы в прямом и обратном направлении, очищают русла канавы. Поскольку предлагаемая технология использования канатных установок для расчистки мелиоративных канав является альтернативой ручной расчистке, то на существующем этапе разработки технологии оценку влияния подготовки операторов произвести невозможно. Сам процесс трелевки ШСК является простой технологической операцией, освоить управление кареткой сможет любой рабочий. Наиболее сложным этапом является монтаж трассы канатной дороги, однако предлагаемое решение применения моторизованной каретки позволяет упростить процедуру из-за уменьшения числа канатов с трех до одного несущего. Уменьшение количества канатной оснастки должно положительно сказаться на рисках внештатных ситуаций, например, сход каната ролика или барабана. Кроме того, при работе классических легких мобильных канатных установок, типа Larix 3t или Tajfun moz 300, могут возникнуть сбои в синхронизации намотки/размотки барабанов или проблем с укладкой троса в барабан, что может приводить к замятию троса, возникновению переломов и разрыву жил. Устранение такого рода неисправностей производится вручную с помощью одновременно с вращением барабанов, что может привести к серьезным травмам. В предлагаемой моторизованной канатной установке риски такого рода травм минимизированы. Наличие двух опорных роликов в конструкции каретки препятствует ее падению, даже в случае схода одного из роликов.

Применение поворотных трасс хода несущего каната должно стать мощным импульсом использования КТУ, поскольку существенно расширит возможности их применения.

Потенциал предлагаемого технологического решения достаточно велик, однако осуществление детального экономического расчета экономической эффективности возможно только после создания на базе модели промышленного образца и расчета стоимости изделия. Существующее решение требует дальнейшей проработки в направлении уменьшения массы поворотного башмака, определения формы конструктивных особенностей подвеса. Для создания прототипа ШСК необходимо произвести расчет силовых показателей агрегатов и осуществить расчет стоимости изделия, что позволит осуществить экономическую оценку рентабельности при производстве различных работ и оценить надежность изделия. Однако, как следует из приведенных данных, развитие данного направления целесообразно, поскольку позволит увеличить интерес организаций, осуществляющих лесохозяйственные мероприятия к убыточным работам по расчистке мелиоративной сети.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Санкт-Петербурга от 02.03.3035 № 142-р об утверждении Лесохозяйственного регламента Санкт-Петербурга. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312764932> (дата обращения: 02.09.2025).
2. Ведомость проектируемых мероприятий Приморского участкового лесничества Курортного лесничества Санкт-Петербурга.
3. Постановление Министерства труда и социального развития РФ от 19.09.1995 № 53 «Межотраслевые нормы выработки и времени на работы, выполняемые при проведении санитарных рубок и рубок ухода за лесом». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9029609> (дата обращения: 09.09.2025).
4. Санкт-Петербургская международная лесосырьевая биржа. – URL: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results> (дата обращения: 15.09.2025).
5. Патент РФ 207117 RUMПК В61 В 7/00. Каретка канатной трелевочной установки / Ф. В. Свойкин [и др.]; заявитель и патентообладатель Уральский государственный лесотехнический университет. № 2021112780; заявл. 30.04.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл. № 29. – 6 с.
6. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.forsttechnik.at/ru/products/carriage-systems/eliner-el40-2.html>. (дата обращения: 09.09.2025).

HARVESTING OF BALANCEWOOD BY ROPE INSTALLATIONS DURING FORESTRY ACTIVITIES

A. S. Korolko, N. S. Korolko*

St. Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: kns89lta@mail.ru*

Abstract. When carrying out forestry activities, such as clearing quarter-mile clearings, clearing or creating drainage ditches, etc., a sufficient amount of mixed-grade wood is produced. Due to the difficult accessibility of the areas where logging is carried out, it is impossible to use traditional logging systems. By incorporating the wood harvested during forestry activities into the economy, it is possible to reduce the cost of these activities. One of the ways to skid such wood is to use cable installations with track turns equipped with an autonomous articulated carriage developed by the Department of Logging Technology at St. Petersburg State Forestry University.

Keywords: cable installations, hydraulic engineering, balance wood, articulated carriage.

References

1. Decree of the Government of St. Petersburg dated 03/02/3035No.142-onapproval of the Forestry Regulations of St. Petersburg. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312764932> (date of request 02.09.2025).
2. State ment of planned activities of the Primorsky district forestry of the Spa Forestry of St. Petersburg.
3. Resolution No.53 of the Ministry of Laborand Social Development of the Russian Federation dated 09/19/1995 "Intersectoral standards of production and time for work performed during sanitary logging and logging". URL: <https://docs.cntd.ru/document/9029609> (date of request 09.09.2025).
4. St. Petersburg International Timber and Raw Materials Exc hange. URL: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results> (date of request 15.09.2025).
5. Patent of the Russian Federation 207117 RU IPCB61In7/00.Carriage of a ropeskid dingin stallation / F.V. Svoikin [etal.]; applicant and patent holder Ural State Forestry Engineering University. No. 2021112780; application no. 30.04.2021; publ. 13.10.2021, Bul. no. 29. 6 p.
6. [Electronic resours]. URL: <https://www.forsttechnik.at/ru/products/carriage-systems/eliners-el40-2.html> (data of request 09.09.2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА¹

Р. С. Макаров*, О. А. Ерохина, Э. Л. Аким

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: 5076_pt_9x18@mail.ru*

Аннотация. Широкое развитие различных областей промышленности предполагает увеличение спроса на различные упаковочные материалы и требований к ним. В связи с этим весьма актуально проведение исследований по созданию нового композиционного материала с заданным комплексом эксплуатационных свойств. В данной работе изучено влияние водно-глицериновой смеси в соотношении 70 % воды и 30 % глицерина, и 50 % воды и 50 % глицерина на прочностные и деформационные свойства образцов мешочной бумаги и бумаги из беленого волокна, исходных и с полиэтиленовым покрытием. Установлено, что оптимальное количество глицерина в композите на основе бумаги из беленой целлюлозы составляет 6 %, а для мешочной бумаги – 2,5 %, что подтверждается увеличением значений энергии при разрушении у данных образцов по сравнению с исходными. Полученные результаты свидетельствуют о том, что материал находится в высокоэластичном состоянии.

Ключевые слова: водно-глицериновая смесь, глицерин, бумага из беленого волокна, мешочная бумага.

Известно использование водно-глицериновой смеси (ВГС) в научных и практических исследованиях как пластификатора для древесины и опилок лиственницы [1]. В связи с этим для разработки нового композиционного материала (КМ) с заданным комплексом эксплуатационных свойств представляло научный интерес использовать в качестве пластификатора ВГС.

Целью данной работы является исследование влияния водно-глицериновой смеси на свойства композиционного материала на основе разных образцов: бумаги из беленой целлюлозы и мешочной бумаги, исходной и ламинированной и определение оптимального количества пластификатора в композиции.

Для исследования были использованы следующие образцы:

- бумага мешочная SKI80 (ГК Сегежа), масса 1 м² – 80 г/м²;
- бумага из беленой целлюлозы с водяными знаками (Россия) масса 1 м² – 75 г/м²;
- полиэтилен низкой плотности 11503-070, показатель текучести 7 г/10 мин (ПАО «Сибур-Холдинг», Россия);
- технический глицерин ГОСТ 6259-75.

Ламинирование образцов бумаги проводили на пилотной экструзионно-ламинаторной установке (ПЭЛУ, ООО «МАШПЛАСТ», Россия, 2004). На бумагу с помощью экструдера через щелевую головку наносили расплав полиэтилена (ПЭ). Скорость вращения шнека экструдера составляла 60 об/мин, температура во всех 4 нагревательных зонах экструдера – 220 °С.

Для исследований использовали 2 вида раствора ВГС низкой вязкости:

- 30 % глицерина + 70 % воды вязкостью 8,9 мПа·с;
- 50 % глицерина + 50 % воды вязкостью 11,9 мПа·с.

Обработку образцов ВГС осуществляли разными методами: пропиткой и нанесением на поверхность кистью.

¹ Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» с использованием оборудования Центра коллективного пользования.

Затем образцы сушили в сушильном шкафу Binder ED 115 при температуре 40 °С до постоянной массы.

Исследовали и анализировали:

- деформационно-прочностные характеристики – на горизонтальной разрывной машине для сухих и влажных испытаний, модель 81502TS (PTI, Австрия), в условиях кондиционирования при температуре $T = 22 \pm 2$ °С и относительной влажности $W = 50 \pm 2$ %;
- динамическую вязкость растворов ВГС – на вискозиметре Брукфильда DV-II+PR;
- массу образцов – на аналитических весах Vibra LN-323 RCE.

Удержание ВГС в образцах рассчитывали по формуле:

$$W = \frac{M_{\text{ц}} - M_{\text{а.с.}}}{M_{\text{а.с.}}} \times 100\%,$$

где $M_{\text{ц}}$ – масса образцов после обработки ВГС, г;

$M_{\text{а.с.}}$ – масса абсолютно сухого образца, г.

Влияние глицерина оценивали путем сопоставления физико-механических и прочностных характеристик образцов, обработанных ВГС, с исходными.

Исследования проводили, как минимум, на 3–5 образцах с последующей статистической обработкой данных.

Относительная погрешность измерений не превышала 5 %, а значения границ доверительного интервала при выбранном коэффициенте надежности $\lambda = 0,95$ свидетельствуют о достаточно высокой достоверности измеренных величин.

Взаимодействие глицерина с целлюлозой изучено достаточно детально и лежит в основе промышленного процесса пластификации гидратцеллюлозной пленки – целлофана; в то же время в литературе имеется ряд работ, посвященных взаимодействию глицерина с древесиной [2].

При обработке образцов ВГС происходит следующее: ВГС пропитывает бумагу, обволакивает волокна целлюлозы, пластифицирует их.

На рисунке 1 представлены графики влияния количества глицерина в образцах на величину максимального усилия при разрыве. Максимальное усилие при разрушении у бумаги из беленой целлюлозы (рис. 1, А) уменьшается по мере увеличения прироста массы глицерина, что объясняется пластифицирующим воздействием глицерина на структуру материала. У мешочной бумаги (рис. 1, Б) – максимальное усилие при разрушении сначала несколько увеличивается, до 2,5 % глицерина, а затем уменьшается, что, вероятно, объясняется специфическими свойствами самой мешочной бумаги.

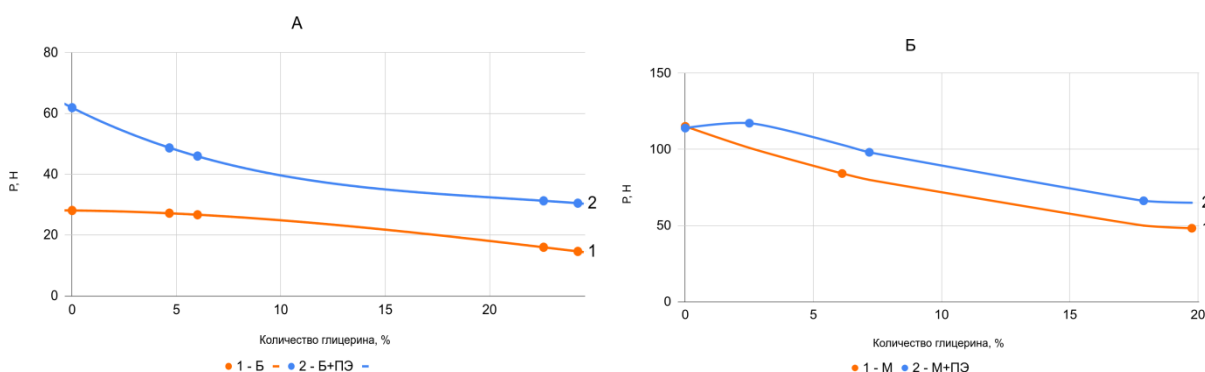


Рисунок 1 – Влияние глицерина на максимальное усилие:
А – для бумаги из беленой целлюлозы; Б – для мешочной бумаги

На рисунке 2 представлен график влияния количества глицерина на модуль эластичности. Модуль эластичности у обоих видов бумаги также уменьшается по мере увеличения прироста массы глицерина [3, 5].

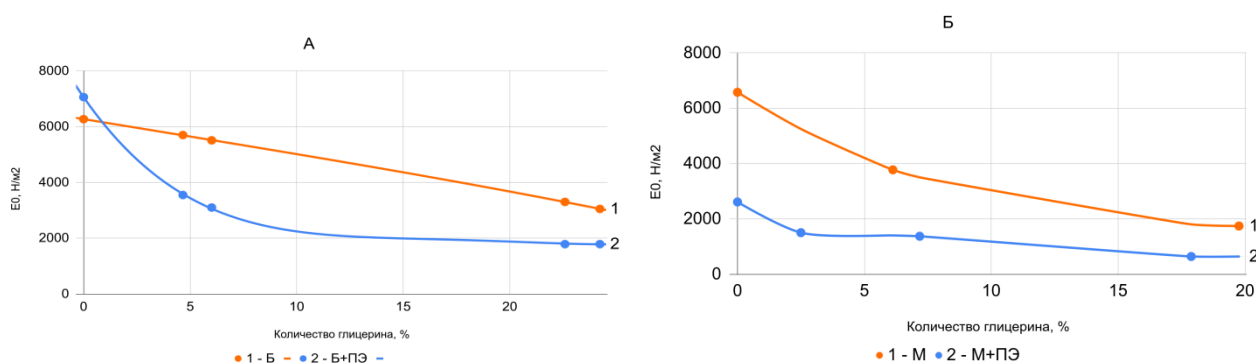


Рисунок 2 – Влияние глицерина на модуль эластичности:
А – для бумаги из беленой целлюлозы; *Б* – для мешочной бумаги

На рисунке 3 представлен график влияния количества глицерина на величину поглощения энергии при растяжении до разрушения. Поглощение энергии у бумаги из беленой целлюлозы по мере увеличения прироста массы глицерина сначала увеличивается до содержания глицерина 6 % за счет образования новых связей [6], а затем снижается, что, вероятно, связано с избытком глицерина в композиции. У образцов из мешочной бумаги с ПЭ аналогичное повышение величины поглощения энергии при растяжении наблюдается при содержании глицерина 2,5 %, что объясняется спецификой структуры этого вида образцов.

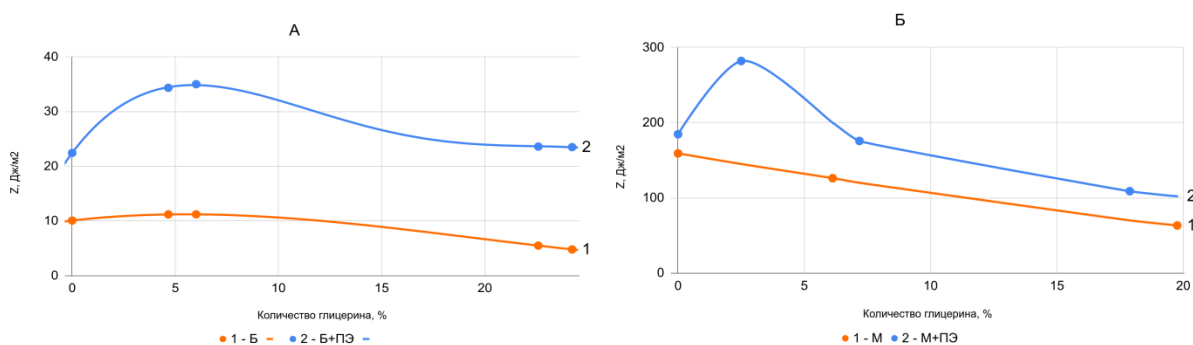


Рисунок 3 – Влияние глицерина на поглощение энергии при растяжении:
А – для бумаги из беленой целлюлозы; *Б* – для мешочной бумаги

Увеличение значений поглощения энергии при разрушении у образцов бумаги из беленой целлюлозы и у композита при 6 % глицерина, а у образцов мешочной бумаги и композита при 2,5 %, по сравнению с исходными образцами, свидетельствует о том, что материал находится в высокоэластическом состоянии [4].

На рисунке 4 представлены диаграммы растяжения образцов КМ на основе бумаги из беленой целлюлозы, исходных и с содержанием глицерина 6 %.

Кривая 1 для образцов бумаги из беленой целлюлозы имеет характерную по форме зависимость нагрузки от деформации для бумаги. Нанесение на бумагу полиэтиленового покрытия (кривая 2) способствует увеличению прочности при разрушении примерно на 20 %, а удлинения на 25–30 %, модуль упругости меняется незначительно, а потенциальная энергия при разрушении возрастает почти вдвое. В момент разрыва образец разрушается как единый материал, что говорит о высокой механической адгезии между слоями бумаги и полиэтилена за счет, возможно, образования в композите взаимопроникающих сеток [4]. Из рисунка 5 (кривые 3 и 4) наглядно видно, что обработка образцов ВГС меняет форму кривой диаграммы растяжения до разрушения, и, по-видимому, механизм разрушения композита – с хрупкого на пластичный.

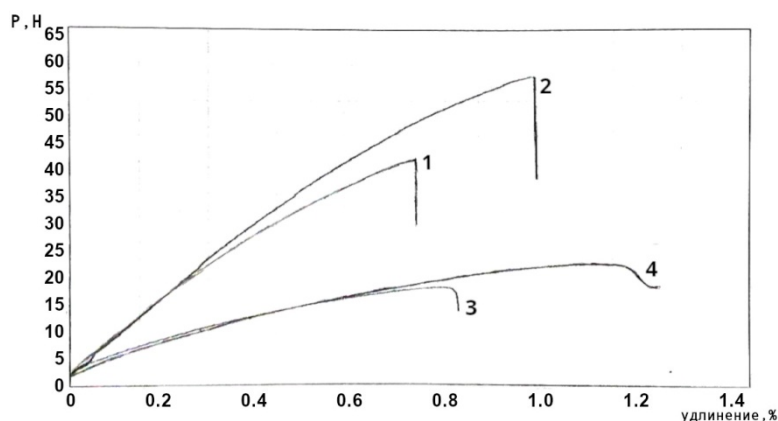


Рисунок 4 – Диаграммы растяжения до разрушения образцов КМ на основе бумаги из беленой целлюлозы при скорости деформирования $V = 5$ мм/мин:
 1 – Б – бумага из беленой целлюлозы; 2 – Б+ПЭ – ламинированная бумага из беленой целлюлозы; 3 – Б+Гл – бумага из беленой целлюлозы, обработанная ВГС; 4 – Б+ПЭ+Гл – ламинированная бумага из беленой целлюлозы, обработанная ВГС

На рисунке 5 представлена диаграмма растяжения исходных образцов КМ на основе мешочной бумаги и образцов КМ с содержанием глицерина 2,5 %.

Диаграммы растяжения образцов на основе мешочной бумаги (рис. 5) аналогичны КМ на основе бумаги из беленой целлюлозы (рис. 4). Однако у образца КМ на основе мешочной бумаги, ламинированной с содержанием глицерина 2,5 % (кривая 4), прочность при разрушении падает незначительно, модуль эластичности снижается примерно вдвое, деформация при разрушении увеличивается почти в два раза. Работа разрыва, соответственно, также существенно возрастает.

Анализ полученных данных позволяет предположить, что обработка образцов бумаги водно-глицериновой смесью происходит следующим образом: ВГС заполняет пустоты в образцах бумаги, обволакивает волокна целлюлозы, пластифицирует их. Вода испаряется при сушке при $T = 40$ °С, а оставшийся в структуре бумаги глицерин обеспечивает сохранение полимерных компонентов в высокоэластическом состоянии, и получается материал, обладающий комплексом прочностных и деформационных свойств.

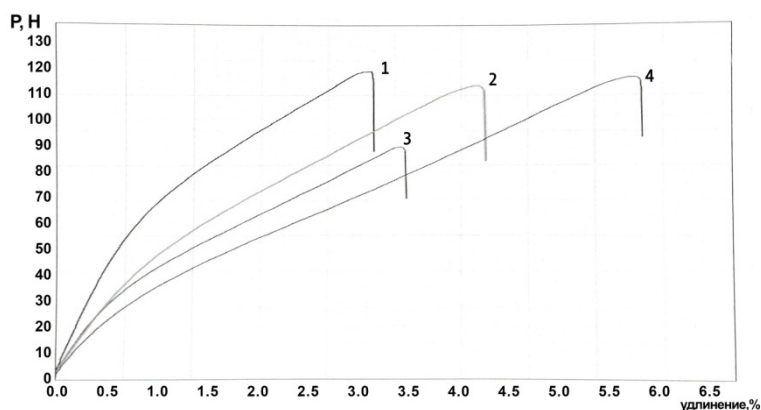


Рисунок 5 – Диаграммы растяжения до разрушения образцов на основе мешочной бумаги при скорости деформирования $V = 5$ мм/мин:
 1 – Б – мешочная бумага; 2 – Б+ПЭ – ламинированная мешочная бумага; 3 – Б+Гл – мешочная бумага, обработанная ВГС; 4 – Б+ПЭ+Гл – ламинированная мешочная бумага, обработанная ВГС

Можно предполагать, что механизм взаимодействия образцов ВГС обусловлен двумя факторами – поверхностной сорбцией и проникновением в поры целлюлозы.

Таким образом, исследование взаимодействия водно-глицериновой смеси и образцов мешочной и бумаги из беленой целлюлозы, исходных и с полиэтиленовым покрытием, показывает возможность направленной модификации свойств композитов за счет пластификации, что открывает новые перспективы по разработке новых видов композиционных материалов и их применения для упаковки.

Выводы:

1. Разработано 2 новых вида композиционного материала – на основе бумаги, обработанной ВГС, и бумаги с полиэтиленовым покрытием, обработанной ВГС.
2. Экспериментально установлено, что необходимым и достаточным количеством глицерина в композите на основе бумаги из беленой целлюлозы является 6 %, на основе мешочной бумаги – 2,5 %.
3. Предложен механизм взаимодействия: в результате обработки образцов водно-глицериновая смесь пропитывает бумагу, заполняя пустоты, обволакивает волокна целлюлозы и пластифицирует ее.
4. У образцов бумаги из беленой целлюлозы и мешочной бумаги, исходной и с полиэтиленовым покрытием, обработанных ВГС, меняется форма кривой диаграммы растяжения до разрушения и механизм разрушения композита – с хрупкого на пластичный.
5. Увеличение поглощающей энергии при растяжении до разрушения у образцов бумаги (Б) и у композита (Б+ПЭ) с глицерином, по сравнению с исходными образцами, свидетельствует о том, что материал находится в высокоэластическом состоянии.
6. Полученные результаты исследований взаимодействия образцов бумаги и ВГС представляют собой биосовместимый композиционный материал.

Список литературы

1. Аким, Э. Л. Исследование взаимодействия водно-глицериновой смеси и опилок лиственницы / Э. Л. Аким, А. А. Пекарец, П. М. Мухина, О. А. Ерохина, О. В. Фёдорова, С. З. Роговина, А. А. Берлин // Химия растительного сырья. – 2023. – Вып. 4. – С. 127-135.
2. Глазков, С. С. Использование глицерина в качестве модификатора и тестирующего агента для древесины / С. С. Глазков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы строительного материаловедения и высокие технологии. – 2008. – № 1. – С. 12-20.
3. Халимова, Л. Х. Исследование влияния предобработки древесных опилок глицерином на их ферментативный гидролиз / Л. Х. Халимова, А. Н. Шакиров, А. Н. Скорняков, Н. И. Петухова, В. В. Зорин // Башкирский химический журнал. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 10-12.
4. Косенко, Е. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы с двухфазной схемой армирования: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 2.6.11 / Е. А. Косенко. – Волгоград: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 2024. – С. 10-12.
5. Ерохина, О. А. Изучение упруго-релаксационных свойств пластифицированной древесины лиственницы и сосны / О. А. Ерохина, А. А. Пекарец, А. Г. Сандмирова, А. Г. Кузнецов, Э. Л. Аким // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В.И. Комарова. – 2021. – С. 92-98.
6. Аким, Э. Л. Синтетические полимеры в бумажной промышленности / Э. Л. Аким. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 248 с.

THE USAGE OF PLASTICIZER FOR THE PRODUCTION OF COMPOSITE PACKAGING MATERIAL

R. S. Makarov*, O. A. Erokhina, E. L. Akim

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: 5076_pm_9x18@mail.ru*

Abstract. The widespread development of various industries implies an increase in demand for various packaging materials and their requirements. In this regard, it is very important to conduct research on the creation of a new packaging material with a given set of operational properties. In this work, the effect of a water-glycerin mixture in a ratio of 70% water to 30% glycerin and 50% water to 50% glycerin on the strength and deformation properties of sack paper and bleached fiber paper samples of the original and polyethylene-coated paper. It was found that the optimal amount of glycerin in a composite material based on bleached cellulose paper is 6%, and for sack paper is 2.5%, which is confirmed by an increase in the values of the fracture work of these samples compared with the original ones. The results obtained indicate that the material is in a rubbery state.

Keywords: water-glycerin mixture, glycerin, bleached fiber paper, sack paper.

References

1. Akim E.L., Pekarets A.A., Mukhina P.M., Erokhina O.A., Fedorova O.V., Rogovina S.Z., Berlin A.A. Issledovanie vzaimodeystviya vodno-glitserinovoy smesi i opilok listvennitsy [Study off the interaction of water-glycerin mixture and larch sawdust]. Khimiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials]. 2023. Issue 4. Pp. 127-135. (In Russian).
2. Glazkov S.S. Ispol'zovanie glitsarina v kachestve modifikatora i testiruyushchego agenta dlya drevesiny [Using glycerin as a wood modifier and tester]. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskie problem stroitel'nogo materialovedeniya i vysokie tekhnologii [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physical and Chemical Problems of Construction Materials Science and High Technologies]. 2008. No. 1. Pp. 12–20. (In Russian).
3. Khalimova L.Kh., Shakirov A.N., Skorniyakov A.N., Petukhova N.I., Zorin V.V. Issledovanie vliyaniya predobrabotki drevesnykh opilok glitserinom na ikh fermentativnyy gidroliz [Study of the influence of pre-treatment of sawdust with glycerin on their enzymatic hydrolysis]. Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal [Bashkir Chemical Journal]. 2012. Vol. 19. No. 4. Pp. 10–12. (In Russian).
4. Kosenko E.A. Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy na osnove epoksidnoy matritsy s dvukhfaznoy skhemoy armirovaniya [Fibrous polymer composite materials based on epoxy matrix with two-phase reinforcement scheme]: avtoref. dis. ... d-r. tekhn. nauk. [author's abstract. dis. ... Dr. of Engineering Sciences: 2.6.11]. Ye.A. Kosenko. – Volgograd: FGBOU VO «Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet». [V: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"]. 2024. Pp. 10–12. (In Russian).
5. Erokhina O.A., Pekarets A.A., Sandimirova A.G., Kuznetsov A.G., Akim E.L. Izuchenie uprugorelaksatsionnykh svoystv plastifitsirovannoy drevesiny listvennitsy i sosny [Study of tightly-relaxed self-plasticized leaf and pine wood]. Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora V.I. Komarova [Problems of mechanics of pulp and paper materials: Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarov]. 2021. Pp. 92–98. (In Russian).
6. Akim E.L. Sinteticheskiye polimery v bumazhnoy promyshlennosti [Synthetic polymers in the paper industry]. Moskva: Lesnaya promyshlennost' [M: Forest Industry]. 1985. 248 p.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДНО-ЩЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ СУЛЬФАТНОЙ БЕЛЕНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

М. С. Мельничук*, О. С. Анисимова, Е. Ю. Демьянцева, В. К. Дубовый
Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: mariya.melnichuk@inproec.com

Аннотация. Рассмотрены современные подходы к получению и очистке сульфатной беленой целлюлозы, предназначенной для химической переработки, с акцентом на влияние водно-щелочной обработки на качество целлюлозного материала. Водно-щелочная обработка эффективно удаляет низкомолекулярные нецеллюлозные загрязнения, включая лигнин, смолы и минеральные вещества, улучшая однородность и пористость волокон, что повышает их реакционную способность в последующих химических процессах. Установлены оптимальные параметры обработки, обеспечивающие баланс между эффективным очищением и сохранением углеводной фракции целлюлозы, увеличивается содержание α -целлюлозы примерно на 10 %. Полученные результаты подтверждают перспективность применения водно-щелочной обработки как этапа предварительной подготовки целлюлозы для производства высокочистых материалов с заданными эксплуатационными свойствами, востребованных в промышленности для синтеза производных целлюлозы, углеродных волокон и других специализированных продуктов.

Ключевые слова: целлюлоза, α -целлюлоза, облагораживание.

Современное мировое производство получения целлюлозы высокой химической чистоты базируется на последовательных технологических стадиях: подготовка сырья, предварительный гидролиз, делигнификация и отбелка, в состав которой входит холодное или горячее облагораживание. Основная технологическая цель процесса облагораживания – добиться максимального сохранения α -целлюлозы при полном удалении сопутствующих компонентов (лигнина, низкомолекулярных фракций, смол и минеральных примесей). Это обеспечивает продукту высокую пригодность для химической переработки.

Целью настоящей работы было изучение воздействия последовательной водно-щелочной обработки на содержание α -целлюлозы, структурные и физико-химические параметры волокнистого полуфабриката. Исследование также включало в себя анализ результатов на различных партиях сырья и оценку перспектив масштабирования данной технологии.

В исследовании использовались образцы беленой сульфатной лиственной и хвойной целлюлозы. Степень полимеризации определялась по вязкости растворов в кадоксене с применением капиллярного вискозиметра с диаметром капилляра 0,73 мм. ИК-спектры регистрировались на ИК-Фурье спектрометре ФСМ 2201, а индекс кристалличности рассчитывался согласно методике [1]. Основные методы обработки включали предварительную водную обработку целлюлозы и щелочную обработку растворами гидроксида натрия при концентрациях 2–10 % и температуре 20–40 °С.

Исследование показало, что последовательная обработка, включающая водный предгидролиз и щелочное воздействие, приводит к значительному улучшению ключевых параметров целлюлозы. Начальная степень полимеризации (1300 для хвойной и 1030 для лиственной целлюлозы) и индекс кристалличности (32 % и 28 % соответственно) были увеличены на 10–15 %. Полученные данные доказывают эффективность предлагаемого водно-щелочного метода в получении целлюлозы высокой чистоты.

Методом ИК-спектроскопии проведен анализ мересеризованных образцов сульфатной беленой хвойной целлюлозы в диапазоне концентраций раствора гидроксида натрия 0–40 %.

В качестве показателя кристалличности были использованы соотношения интенсивностей полос при 1375 и 2900 см⁻¹. Это отношение не зависит от изменений в процессе мерсеризации и поэтому может быть использовано как для целлюлозы Ц I, так и для целлюлозы Ц II, а также для их смеси. Данный метод показал хорошую корреляцию с рентгеноструктурным методом с коэффициентом 0,882 [2].

На рисунке 1 показано изменение степени упорядоченности хвойной целлюлозы при обработке раствором гидроксида натрия.

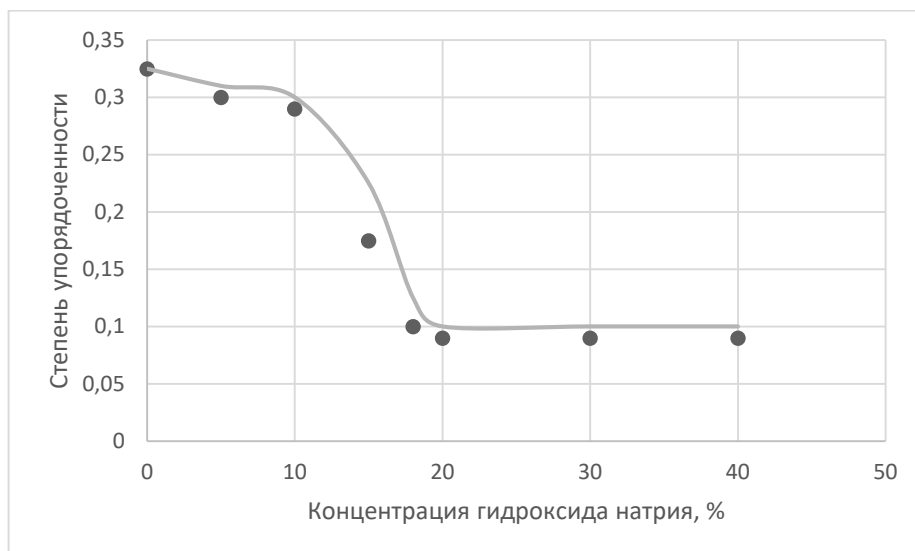


Рисунок 1 – Изменение степени упорядоченности хвойной целлюлозы при обработке раствором гидроксида натрия

Как видно из рисунка, в разбавленных растворах изменение не происходит. Структурная перестройка начинается при определенной концентрации щелочи и полностью завершается при более высоких концентрациях. Значения этих концентраций зависят от вида щелочи, исходной целлюлозы и температуры. Чем ниже температура щелочной обработки, тем меньшая концентрация щелочного раствора необходима для образования щелочной целлюлозы. На рисунке показаны изменения в области упорядоченных и аморфных структурах. Исходный образец содержал Ц I_{уп} – порядка 30 %, Ц I_{неуп} – порядка 23 %. При концентрации щелочи порядка 7 % начинается разрушение неупорядоченных областей Ц I_{неуп}, а при концентрациях около 10 % – упорядоченных областей Ц I_{уп}. Формирование упорядоченных областей мерсеризованной целлюлозы идет при концентрации щелочи в диапазоне 10–12 %. Более однородным мерсеризованный образец становится после обработки раствором щелочи с концентрацией порядка 15 %. При обработках щелочью концентрацией выше 15 % заметных структурных изменений не наблюдается.

Использование водно-щелочной обработки при сравнительно низких температурах позволяет сохранить структуру целлюлозных волокон и снизить термическое разрушение макромолекул, в отличие от высокотемпературной щелочной обработки, которая часто приводит к деполимеризации и снижению вязкости. Это напрямую улучшает механические свойства материала. Вследствие такой обработки прочность на разрыв возросла на 15–25 % по сравнению с исходным материалом. Этот рост обусловлен сохранением высокой степени полимеризации и индекса кристалличности. Однако при концентрациях щелочи свыше 12 % наблюдается резкое набухание волокон, которое разрушает кристаллическую структуру и снижает прочность. Наилучшие прочностные показатели достигаются в диапазоне 8–10 % NaOH, где обеспечивается баланс между очисткой от примесей и сохранением целостности волокна.

Также было выявлено, что модуль упругости волокон повысился на 10–15%, что говорит о возросшей жесткости и стабильности структуры. Щелочь при оптимальных

концентрациях 8–10 % проникает в аморфные области целлюлозы, способствуя перестройке макромолекул и упрочнению водородных связей между фибриллами. Это приводит к уплотнению структуры без разрушения кристаллической части, что и объясняет рост прочности и модуля упругости. При этом удлинение при разрыве осталось на уровне 3–5 %, что свидетельствует о сохранении пластичности и снижении хрупкости материала. Эти характеристики крайне важны для последующего использования целлюлозы в производстве функциональных волокон.

Полученная целлюлоза с повышенным содержанием α -целлюлозы, высокой степенью полимеризации и упорядоченной структурой является идеальным сырьем для синтеза эфиров целлюлозы, в частности, ацетилцеллюлозы. Высокая химическая чистота и сохраненная макромолекулярная цепь обеспечивают более контролируемый и эффективный процесс ацетилирования, что позволяет получать ацетилцеллюлозу с заданными свойствами – повышенной прочностью, термостабильностью и прозрачностью, что критически важно для производства высококачественных пленок, мембран и лаков.

С точки зрения промышленного внедрения, важно отметить, что водно-щелочной метод демонстрирует хорошую совместимость с существующими технологическими линиями целлюлозно-бумажных производств. Использование умеренных температур и концентраций щелочи не требует значительных капиталовложений в модернизацию оборудования, что повышает его экономическую привлекательность. Потенциал использования метода в качестве как самостоятельной, так и интегрированной стадии предоставляет гибкость в проектировании и оптимизации производственных циклов под конкретные задачи.

Таким образом, данный метод обработки можно применять не только как этап в комплексном процессе облагораживания целлюлозы, но и как самостоятельную предварительную обработку. Это открывает возможность целенаправленного получения целлюлозы с улучшенными механическими свойствами для использования в высокотехнологичных материалах.

Список литературы

1. Fiskari, J., Derkacheva, O., Kulomaa, T., Sukhov, D. Quick non-destructive analysis of lignin condensation and precipitation by FTIR. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50(2), 213-217.
2. Януш, О. В. Оптическая спектроскопия полимеров: учебное пособие / О. В. Януш, О. Ю. Деркачева, Т. С. Гусарова; под общ. ред. Е. А. Яшкевич / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2017. – 46 с.

OPTIMIZATION OF WATER-ALKALINE TREATMENT OF SULFATE BLEACHED PULP TO IMPROVE THE QUALITY OF MATERIAL INTENDED FOR CHEMICAL PROCESSING

M. S. Mel'nichuk*, O. S. Anisimova, E. Ju. Dem'janceva, V. K. Dubovyj

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: mariya.melnichuk@inproec.com*

Abstract. The paper examines modern approaches to the production and purification of sulfate bleached pulp intended for chemical processing, with an emphasis on the impact of aqueous alkaline treatment on the quality of the cellulose material. Aqueous alkaline treatment effectively removes low-molecular-weight non-cellulosic impurities, including lignin, resins, and mineral substances, improving fiber uniformity and porosity, which enhances its reactivity in subsequent chemical processes. Optimal treatment parameters have been established, ensuring a balance between effective purification and the preservation of the cellulose carbohydrate fraction, while increasing the alpha-cellulose content by approximately 10%. The obtained results confirm the promise of using aqueous alkaline treatment as a stage for the preliminary preparation of cellulose to produce high-

purity materials with specified performance properties, which are in demand in the industry for the synthesis of cellulose derivatives, carbon fibers, and other specialized products.

Keywords: cellulose, alpha-cellulose, alkaline treatment.

References

1. Fiskari, J., Derkacheva, O., Kulomaa, T., Sukhov, D. Quick non-destructive analysis of lignin condensation and precipitation by FTIR. *Cellulose Chemistry and Technology*, 50(2), 213-217.
2. Janush, O.V. Opticheskaja spektroskopija polimerov: uchebnoe posobie [Optical spectroscopy of polymers] / O.V. Janush, O.Ju. Derkacheva, T.S. Gusarova; pod obshh. red. E.A. Jashkevich / HSTE SPbSUITD. SPb., 2017. 46 p. (In Russian).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ MPC-СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВАРКИ ЩЕПЫ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В. Г. Никешин*, В. И. Сидельников

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: vladik-juk@yandex.ru*

Аннотация. Статья посвящена теоретическим аспектам разработки системы Model Predictive Control (MPC) для управления процессом варки щепы в целлюлозно-бумажном производстве. Рассмотрены основные сложности, связанные с учетом временных задержек, нелинейностей процесса и изменений технологического режима. Описаны этапы сбора, обработки и анализа данных, а также построения математической модели процесса варки. Особое внимание уделено важности культуры производства и взаимодействия между персоналом для успешной реализации MPC-системы. Статья подчеркивает необходимость сочетания технического совершенства и высокой культуры производства для достижения стабильного качества продукции.

Ключевые слова: MPC-система, целлюлозно-бумажное производство, нелинейные системы, SCADA, MES, моделирование, адаптивные алгоритмы, многомерный анализ данных.

Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) является одной из наиболее сложных и технологически насыщенных отраслей промышленности [1-3]. Процесс варки щепы, упрощенная схема которого представлена на рисунке 1, как ключевой этап производства целлюлозы, требует точного управления множеством параметров, таких как температура, давление, концентрация химических реагентов и время варки. Современные скорости производства, достигающие нескольких тонн продукции в час, делают ручное управление этим процессом практически невозможным. В связи с этим разработка MPC-системы (Model Predictive Control) для управления процессом варки щепы становится актуальной задачей, требующей глубокого анализа данных и учета множества факторов.

Одной из основных сложностей при разработке MPC-системы является учет временных задержек, которые возникают на различных этапах производства. Эти задержки могут быть связаны с инерционностью оборудования, временем транспортировки сырья и промежуточных продуктов, а также с задержками в получении данных от датчиков. В условиях высокоскоростного производства даже незначительные задержки могут привести к существенным отклонениям в качестве конечной продукции. Для их математического описания часто применяются модели в виде звеньев чистого запаздывания, которые инкрементируются в общую передаточную функцию объекта управления. Однако в условиях высокоскоростного производства, где время цикла варки может измеряться десятками минут, даже незначительные ошибки в оценке этих задержек (порядка 1-2 минут) могут привести к существенным отклонениям в качестве конечной продукции, таким как недовар или перевар щепы, что напрямую влияет на прочность целлюлозы. Поэтому для эффективного управления процессом варки щепы необходимо не только учитывать эти задержки, но и прогнозировать их влияние на конечный результат [4, 5].

Анализ данных в целлюлозно-бумажном производстве является ключевым этапом разработки MPC-системы. Основными источниками данных являются датчики, установленные на оборудовании, а также системы сбора и обработки информации, такие как SCADA и MES. Данные, получаемые от датчиков, включают в себя информацию о температуре, давлении, уровне заполнения котлов, концентрации химических реагентов и другие параметры, которые непосредственно влияют на процесс варки щепы. Однако для эффективного управления необходимо учитывать не только текущие значения этих параметров, но и их динамику, а также взаимосвязь между ними.

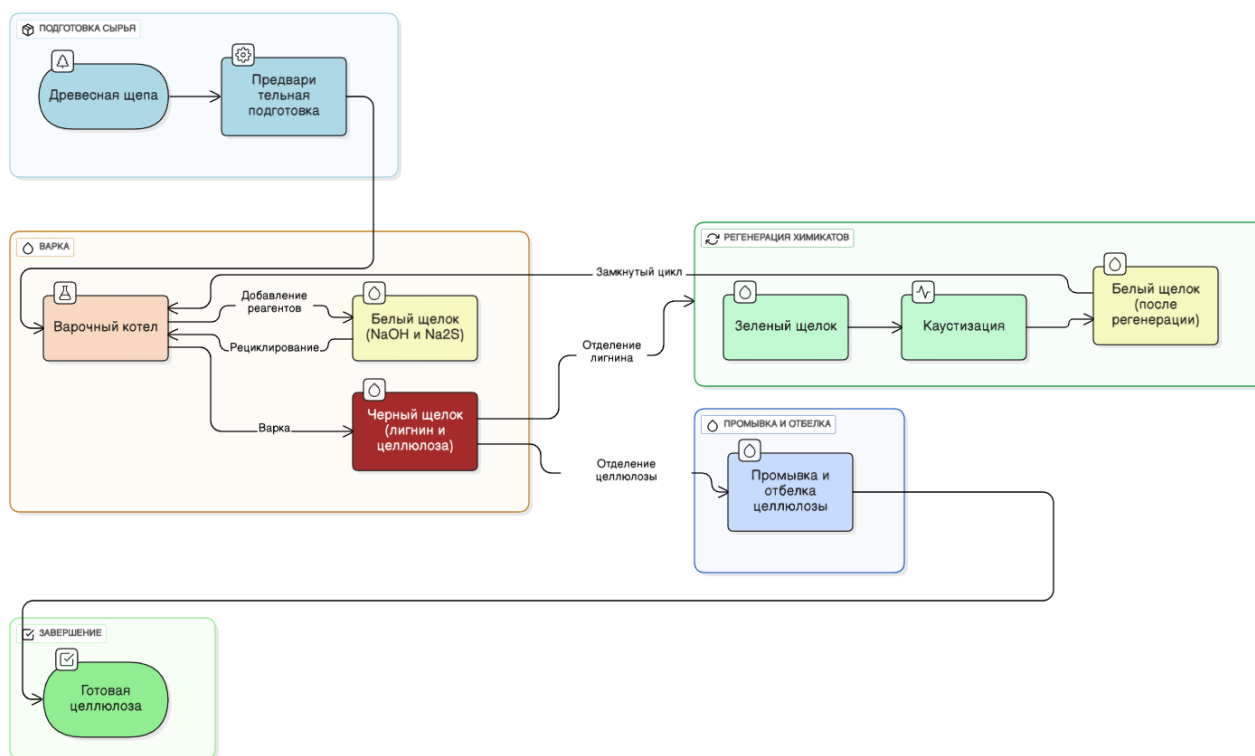


Рисунок 1 – Упрощенная схема процесса варки щепы сульфатным способом

Одной из ключевых задач анализа данных является выявление корреляций между различными параметрами процесса варки [6]. Например, изменение температуры в котле может повлиять на скорость химических реакций, что, в свою очередь, отразится на качестве целлюлозы. Для выявления таких зависимостей необходимо проводить многомерный анализ данных, который позволяет учитывать не только отдельные параметры, но и их комбинации. Это особенно важно в условиях, когда процесс варки щепы подвержен влиянию множества внешних и внутренних факторов, таких как качество сырья, состояние оборудования и изменения в технологическом режиме.

Глубокий анализ данных является краеугольным камнем для построения адекватной предиктивной модели. Помимо выявления линейных корреляций между параметрами с помощью методов, подобных анализу главных компонент (РСА), критически важным становится учет нелинейных и динамических взаимосвязей. Например, зависимость между температурой в котле и концентрацией лигнина в целлюлозе часто носит ярко выраженный нелинейный характер: после достижения определенного температурного порога скорость расщепления лигнина резко возрастает, что описывается степенными или экспоненциальными функциями. Для моделирования таких сложных зависимостей традиционные методы линейной регрессии недостаточны. Здесь на первый план выходят методы нелинейной регрессии, рекуррентные нейронные сети (RNN), способные учитывать временные зависимости, или даже методы, основанные на теории хаоса, позволяющие выявлять детерминированный хаос в колебаниях параметров. Одновременно с этим система сталкивается с необходимостью обработки больших объемов данных в реальном времени. Для этого на этапе предобработки данных, наряду с фильтром Калмана, эффективно применение вейвлет-преобразований для подавления шума и выделения полезных тенденций, а также алгоритмов обнаружения и классификации аномалий (например, с помощью изолированного леса – Isolation Forest), чтобы исключать из анализа выбросы, вызванные сбоями датчиков или кратковременными технологическими срывами. Такой комплексный подход позволяет создать робастную модель, адекватно отражающую реальные производственные условия [6-8].

Для учета временных задержек в MPC-системе необходимо разрабатывать модели, которые способны прогнозировать изменения параметров процесса варки с учетом задержек. Это требует глубокого анализа данных, полученных в ходе эксплуатации оборудования, а

также разработки математических моделей, которые учитывают инерционность системы и временные задержки. Такие модели должны быть способны предсказывать изменения параметров процесса варки на несколько шагов вперед, что позволяет MPC-системе своевременно корректировать управляющие воздействия.

Кроме того, анализ данных должен учитывать возможные изменения в технологическом режиме, которые могут быть вызваны изменением качества сырья или состоянием оборудования. Например, изменение влажности щепы может привести к необходимости корректировки температуры и давления в котле. Для учета таких изменений необходимо разрабатывать адаптивные модели, которые способны обновлять свои параметры в зависимости от текущих условий процесса варки.

Для успешного анализа данных и построения MPC-системы управления процессом варки щепы необходимо последовательно выполнить ряд этапов, которые включают в себя сбор, обработку, моделирование и внедрение системы. Каждый из этих этапов требует глубокого понимания технологического процесса и применения современных методов анализа данных.

На первом этапе необходимо организовать сбор данных с датчиков и систем мониторинга, таких как SCADA и MES. Данные должны включать информацию о температуре, давлении, концентрации химических реагентов, уровне заполнения котлов и других ключевых параметрах. Важно обеспечить высокую частоту сбора данных, чтобы учитывать динамику процесса. Одновременно с этим необходимо провести аудит качества данных, исключив ошибки измерений и пропущенные значения, которые могут исказить результаты анализа.

После сбора данных следует этап предварительной обработки, который включает фильтрацию и нормализацию данных. Фильтрация позволяет устранить «информационный шум» и выделить полезные сигналы. В качестве первичной фильтрации могут применяться такие алгоритмы, как фильтр Калмана, экспоненциальное сглаживание, медианные фильтры. Нормализация обеспечивает приведение данных к единому масштабу, что важно для последующего анализа. На этом этапе также необходимо идентифицировать и устранить временные задержки, связанные с инерционностью оборудования и задержками в передаче данных. Для этого могут применяться методы временного сдвига данных или моделирование задержек с использованием исторических данных.

Следующим шагом является анализ корреляций между параметрами процесса. Для этого применяются методы многомерного анализа, такие как анализ главных компонент (PCA) или методы машинного обучения. Эти методы позволяют выявить скрытые зависимости между параметрами, которые не очевидны при поверхностном анализе. Например, можно установить, как изменение температуры в котле влияет на скорость химических реакций и, соответственно, на качество целлюлозы.

На основе выявленных зависимостей строится математическая модель процесса варки щепы. Эта модель должна учитывать нелинейности процесса, временные задержки и возможные изменения в технологическом режиме. Для моделирования нелинейных систем могут применяться методы нелинейной регрессии, рекуррентные нейронные сети (RNN) или методы, основанные на теории хаоса. Важно, чтобы модель была способна прогнозировать изменения параметров на несколько шагов вперед, что позволит MPC-системе своевременно корректировать управляющие воздействия.

После построения модели необходимо провести ее валидацию на исторических данных. Это позволяет убедиться в точности прогнозов и корректности учета всех факторов. Если модель показывает удовлетворительные результаты, ее можно интегрировать в MPC-систему. Внедрение системы начинается с тестирования в режиме реального времени, но без активного вмешательства в процесс. Это позволяет оценить, как система реагирует на изменения параметров и насколько точно она прогнозирует их динамику.

На заключительном этапе MPC-система переводится в активный режим управления. При этом важно обеспечить постоянный мониторинг ее работы и корректировку параметров модели в случае изменения технологического режима или качества сырья. Для этого могут

применяться адаптивные алгоритмы, которые автоматически обновляют параметры модели на основе текущих данных.

Как видно из всего вышеописанного, разработка и внедрение МРС-системы для управления процессом варки щепы в целлюлозно-бумажном производстве представляет собой сложную и многогранную задачу, требующую не только глубоких технических знаний, но и высокой культуры производства. Несмотря на современные достижения в области анализа данных, машинного обучения и автоматизации, реализация такой системы сталкивается с рядом существенных сложностей, которые необходимо учитывать на всех этапах проекта.

Однако технические сложности – это лишь часть проблемы. Не менее важным аспектом является культура производства, которая включает в себя не только соблюдение технологических стандартов, но и готовность персонала к внедрению новых решений. Успешная реализация МРС-системы требует тесного взаимодействия между инженерами, технологами и операторами, а также их готовности к постоянному обучению и адаптации. Без этого даже самая совершенная система может оказаться неэффективной.

Культура производства также подразумевает ответственность за качество данных и процессов. Это включает в себя регулярный аудит оборудования, своевременное устранение неполадок и постоянный мониторинг ключевых параметров. Только при условии, что все участники процесса понимают важность этих аспектов и строго следуют установленным процедурам, можно добиться стабильного и высокого качества продукции.

Таким образом, разработка и внедрение МРС-системы для управления процессом варки щепы представляет собой синтез технической и организационной задачи. С технической точки зрения успех зависит от корректности идентификации модели, учитывающей временные задержки, нелинейности и адаптирующейся к изменению сырья. С организационной – ключевым становится человеческий фактор. Внедрение системы неизбежно меняет роль оператора: из лица, принимающего сиюминутные решения, он превращается в надзирателя за работой сложного алгоритма, что требует переобучения и изменения мышления. Необходимо формирование кросс-функциональных команд, где технологи, хорошо знающие физику процесса, тесно взаимодействуют с data-сайентистами и инженерами АСУ ТП для совместной интерпретации данных и корректировки моделей. Культура производства в этом контексте подразумевает не только безупречное ведение технологических карт, но и культуру данных: понимание важности качества входных данных, своевременную регистрацию всех внешних возмущений (например, смена партии щепы) и дисциплинированное ведение журналов событий. Только при условии синергии между техническим совершенством алгоритмов, точностью данных и высокой производственной дисциплиной персонала можно реализовать систему, способную обеспечить стабильное качество продукции и эффективное управление процессом в условиях высокой сложности и динамичности целлюлозно-бумажного производства.

Список литературы

1. Костенко, О. В. Целлюлозно-бумажная промышленность в России: основные тенденции и направления инновационного развития / О. В. Костенко // *Фундаментальные исследования*. – 2019. – № 9. – С. 38-43.
2. Миронов, А. Целлюлозно-бумажная промышленность в России. Тенденции, результаты деятельности и их последствия для регионального развития / А. Миронов. – М.: Litres, 2022.
3. Малевская-Малевиц, Е. Д. Анализ структуры целлюлозно-бумажного комплекса Северо-Западного региона / Е. Д. Малевская-Малевиц, В. С. Кудряшов // *Прикладные экономические исследования*. – 2023. – № 3. – С. 40-45. – DOI 10.47576/2949-1908_2023_3_40. – EDN LMSQJL.
4. Викторова, А. П. Влияние внедрения инновационных технологий в целлюлозно-бумажной промышленности / А. П. Викторова // *Молодой ученый*. – 2022. – № 47.1 (442.1). – С. 42-44. – URL: <https://moluch.ru/archive/442/96733/> (дата обращения: 09.05.2025).

5. Никешин, В. Г. Опыт использования MPC-системы в процессах управления / В. Г. Никешин, В. И. Сидельников, А. В. Кокшаров // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2023. – Т. 1. – С. 32-34. – EDN HAFGRV.
6. Баврина, А. П. Современные правила применения корреляционного анализа / А. П. Баврина, И. Б. Борисов // Медицинский альманах. – 2021. – № 3(68). – С. 70-79. – EDN TPSSIX.
7. Salvador García, Sergio Ramírez-Gallego, Julián Luengo, José Manuel Benítez and Francisco Herrera. Big data preprocessing: methods and prospects // Big Data Analytics. 2016. Vol. 1, no 9. URL: <https://bdataanalytics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41044-016-0014-0> (дата обращения: 10.05.2025).
8. Лоскутов, А. Ю. Математические основы хаотических динамических систем: курс лекций / А. Ю. Лоскутов. – Москва, 2015.

THEORETICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT OF MPC-SYSTEM FOR CHIP PULPING PROCESS CONTROL IN PULP AND PAPER PRODUCTION

V. G. Nikeshin*, V. I. Sidelnikov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

*E-mail: vladik-juk@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to theoretical aspects of development of Model Predictive Control (MPC) system for controlling the pulping process in pulp and paper production. The main difficulties related to time delays, nonlinearities of the process and changes in the technological mode are considered. The stages of data collection, processing and analysis, as well as the construction of a mathematical model of the pulping process are described. Special attention is paid to the importance of production culture and staff interaction for successful implementation of an MPC system. The article emphasizes the need to combine technical excellence and high production culture to achieve consistent product quality.

Keywords: MPC system, pulp and paper production, nonlinear systems, SCADA, MES, modeling, adaptive algorithms, multivariate data analysis.

References

1. Kostenko, O.V. Tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost' v Rossii: osnovnye tendentsii i napravleniya innovatsionnogo razvitiya / O.V. Kostenko // Fundamental'nye issledovaniya. 2019. No 9. S. 38-43.
2. Mironov, A. Tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost' v Rossii. Tendentsii, rezul'taty deyatel'nosti i ikh posledstviya dlya regional'nogo razvitiya / A. Mironov. M.: Litres, 2022.
3. Malevskaya-Malevich, E. D. Analiz struktury tsellyulozno-bumazhnogo kompleksa Severo-Zapadnogo regiona / E. D. Malevskaya-Malevich, V. S. Kudryashov // Prikladnye ekonomicheskie issledovaniya. 2023. No 3. S. 40-45, DOI 10.47576/2949-1908_2023_3_40.
4. Viktorova, A.P. Vliyanie vnedreniya innovatsionnykh tekhnologiy v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti / A.P. Viktorova // Molodoy uchenyy. 2022. No 47.1 (442.1). S. 42-44. URL: <https://moluch.ru/archive/442/96733/> (data obrashcheniya: 09.05.2025).
5. Nikeshin, V.G. Opyt ispol'zovaniya MPC-sistemy v protsessakh upravleniya / V.G. Nikeshin, V.I. Sidel'nikov, A.V. Koksharov // Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh. 2023. Vol. 1. S. 32-34.
6. Bavrina, A.P. Sovremennye pravila primeneniya korrelyatsionnogo analiza / A.P. Bavrina, I.B. Borisov // Meditsinskiy al'manakh. 2021. No 3(68). S. 70-79.
7. Salvador García, Sergio Ramírez-Gallego, Julián Luengo, José Manuel Benítez and Francisco Herrera. Big data preprocessing: methods and prospects, Big Data Analytics. 2016. Vol. 1, no 9. URL: <https://bdataanalytics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41044-016-0014-0> (data obrashcheniya: 10.05.2025).
8. Loskutov A.Yu. Matematicheskie osnovy khaoticheskikh dinamicheskikh sistem: kurs lektsiy / A.Yu. Loskutov. Moskva, 2015.

ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СВЯЗЕЙ, ДЕКОНВОЛЮЦИЯ ОБРАЗЦОВ КРАФТ-БУМАГИ, ПРОИЗВЕДЕННОЙ НА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ КОМБИНАТЕ ГРУППЫ «ИЛИМ», г. КОРЯЖМА

И. А. Обухова^{1*}, А. В. Кокшаров², С. Д. Пименов¹, И. Н. Трапезникова³, В. И. Сиклицкий³

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова

²ЦБП группы «ИЛИМ», г. Коряжма

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Россия

*E-mail: iobukhova@inbox.ru

Аннотация. Методами Фурье ИК (инфракрасной) спектроскопии проводился сравнительный анализ поглотительной способности крафт-бумаги, полученной из природной древесины березы (бумага предназначена для производства флутинга) и крафт-бумаги из хвои сосны и ели образцов комбината г. Коряжма.

Определены относительные вклады водородных связей для трех типов Н-связей, вклады линий лигнина и метиленовых линий в инфракрасных спектрах [1], характерных для целлюлозосодержащего растительного древесного сырья.

Ключевые слова: Фурье ИК-спектроскопия, водородные связи, прочность, целлюлоза.

Крафт-бумага – это высокопрочная оберточная бумага, изготовленная из целлюлозы, полученной в результате сульфатной варки древесины. Техническая целлюлоза – естественный полимер, который является основой для широкого спектра материалов, производимых и используемых в настоящее время. Актуальной задачей является установление характерных параметров, влияющих на качество крафт-бумаги, оценка прочностных свойств [1, 4, 5].

Цель исследования состоит в установлении связи особенностей структурной организации макровеществ (на молекулярном и надмолекулярном уровне) с их физическими свойствами. Разработка (создание) неразрушающих методов контроля технологических процессов производства материалов, разработка новых материалов с заданными характеристиками. Исследовался ряд образцов флутинга (бумага для гофрирования), состоящие из смеси НСПЦ (нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы) 90 % березы (с жесткостью 115 единиц Каппа) и 10 % хвойной сульфатной небеленой целлюлозы (с жесткостью 80 единиц Каппа).

Для сравнения были взяты образцы картона, которые состоят из смеси НСПЦ (нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы), – состав: 50 % березы (с жесткостью 115 единиц Каппа) и 50 % хвойной сульфатной небеленой целлюлозы, смеси сосны 20 % и ели 80 % (с жесткостью 80 единиц Каппа) и мешочная бумага (100 % хвоя 20 % сосны, 80 % ели). Плотность образцов картона 100 г/см² (произведен 30.06.2024), бумаги 90 г/см² (произведена 16.11.2024), 80 г/см² (произведена 20.01.2025), мешочной бумаги (плотность и дата производства не указаны).

Целлюлоза служит в качестве армирующего материала клеточной стенки и является основным компонентом натуральных волокон. Известно, что целлюлоза состоит из микрофибрилл, в которых между целлюлозными цепочками имеются водородные связи, образующие прочную кристаллическую структуру. Было опубликовано много работ по определению характеристик водородных связей в целлюлозе с использованием различных методов, среди которых ИК-спектроскопия оказалась одним из наиболее полезных методов [1, 4, 5].

Как известно, ИК-спектроскопия является уникальным инструментом для установления фундаментальных характеристик строения и свойств молекулярных соединений, определяемой их природой и системой внутри и межмолекулярных взаимодействий. Применение инфракрасных спектров для исследования строения основано,

главным образом, на использовании характеристических полос поглощения. ИК-спектр целлюлозы в основном формируется поглощением трех гидроксильных групп, находящихся в составе каждого глюкопиранозного звена [2, 3]. Целлюлоза, как полимер глюкозы, содержит три гидроксильные группы в каждом глюкозном звене. Эти группы участвуют в образовании водородных связей, которые влияют на структуру и свойства целлюлозы. В ИК-спектре целлюлозы можно наблюдать полосы, соответствующие растяжению связи О–Н (валентные колебания) в области около 3300 см^{-1} (связанные ОН, образующие водородные связи) и 3600 см^{-1} (свободные ОН).

На рисунке 1 показан скорректированный по базовой линии спектр инфракрасного поглощения $3700\text{--}2400\text{ см}^{-1}$ для образца картона плотностью 100 г/см^2 . Широкая полоса между 3700 см^{-1} и 3000 см^{-1} в спектрах поглощения обусловлена колебаниями растяжения О–Н и характерна для материалов, содержащих целлюлозу.

Пик около 2900 см^{-1} соответствует растяжению С–Н, которое является эталонной полосой в инфракрасных спектрах углеводов и обычно встречается в бумаге. Полоса растяжения С–Н необходима для начальной идентификации и преобразования инфракрасных спектров.

В качестве модели экспериментального спектра была выбрана сумма 9 функций Гаусса с максимумами, соответствующими длинам характерных меж- и внутримолекулярных связей. Коэффициентом корреляции между экспериментальным и модельным спектром $R^2 > 0,98$. (Инфракрасные спектры были разложены на 9 функций Гаусса с коэффициентом корреляции $R^2 > 0,98$ от общего приближения.)

Опорные линии были отнесены к колебаниям растяжения определенного типа О–Н групп, участвующих в образовании водородных связей. Каждая данная полоса может быть связана с характеристиками водородных связей, и их относительный вклад иллюстрирует целостность связи.

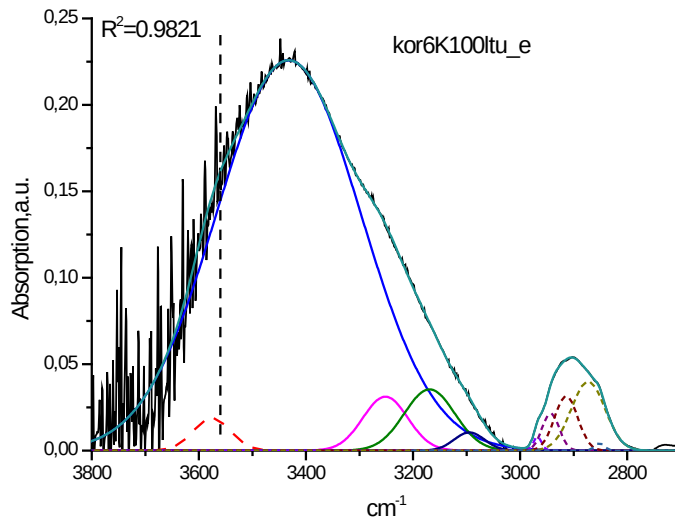


Рисунок 1 – Деконволюция картона 100 г/см^2 , Коряжма

Чтобы иметь возможность сравнивать различные образцы, предполагалось, что сумма всех площадей равна 100 %, затем на основе этого была рассчитана плотность водородных связей (табл. 1). В таблице 1 приведены результаты ИК-спектров измерения образца картона с плотностью 100 г/см^2 с усреднением и погрешностью для трех проб измерений одного образца в интервале 2 месяца выдерживания образца.

Результаты (табл. 1) показывают, что энергия водородных связей, образующихся между О–Н-группами целлюлозы, находится в диапазоне $6\text{--}23\text{ кДж/моль}$.

Таблица 1 – Результаты деконволюции спектров образцов (энергия, длина водородных связей (по формулам Е. Либовицкого [1])) и анализ вклада водородных связей

Название образца	Базовая частота	Частота	Сдвиг	Е, кДж/моль	d, нм	Плотность связей, %	Тип водородной связи
Крафт К-100 г/см ² Коряжма проба 1	3560	3438±4	125±4	6,49±0,36	0,29±0	86±3	внутри молек
		3252±4	309±3	17,74±0,41	0,27±0	2,3±1,0	внутри молек
		3177±6	387±7	20,87±0,86	0,27±0	4,1±0,8	межмолек
Крафт Мешочная бумага 100 % хвоя (20 % сосны, 80 % елка) Коряжма	3560	3429	131	6,73	0,28	76,37	внутри молек
		3237	323	18,95	0,27	10,00	внутри молек
		3155	405	22,38	0,27	2,27	межмолек
Крафт Б-90 г/см ² Коряжма	3560	3437	123	6,09	0,29	64,47	внутри молек
		3247	313	18,46	0,27	18,46	внутри молек
		3149	411	22,59	0,27	1,50	межмолек
Крафт Б-80 г/см ² Коряжма	3560	3436	124	6,17	0,29	59,16	внутри молек
		3252	308	18,21	0,27	21,38	внутри молек
		3149	411	22,59	0,27	1,27	межмолек

Из анализа ИК-спектров видно качественное отличие между образцами бумаги, изготовленной из хвойных пород, и образцов с содержанием древесины березы по характерным дополнительным особенностям метил-метиленовой группы и меньшему вкладу в интегральное поглощение (рис. 2). Причем доля внутримолекулярной связи (3400 см⁻¹) у хвойной пары выше. А вот вклад внутримолекулярной связи (3300 см⁻¹) меньше.

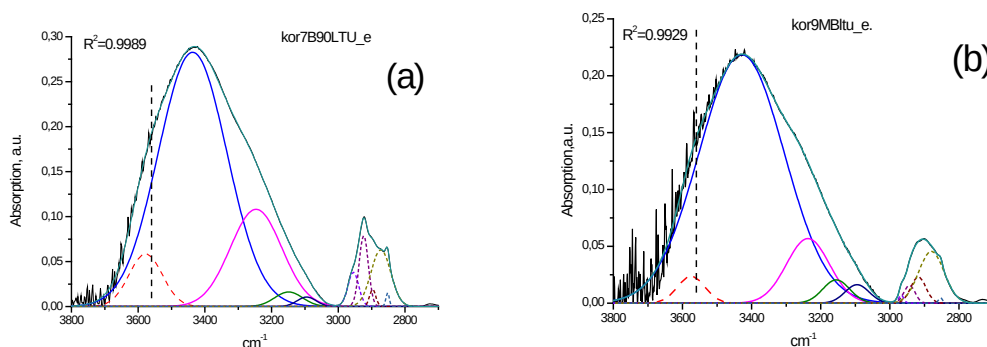


Рисунок 2 – Деконволюция (а) крафт-бумаги (Б-90 г/см², Коряжма) и (б) крафт-мешочная бумага 100 % хвоя (20 % сосны, 80% елка, Коряжма)

Опять же межмолекулярная связь (3200 см^{-1}), связанная с вкладом сильной водородной связи между молекулами целлюлозы в спектр ИК поглощения, у хвойной пары в разы больше, чем у крафт-бумаги с содержанием древесины березы.

Из результатов измерений на ИК-спектрометре трех образцов картона с плотностью 100 г/см^2 с одного и того же листа с целью выявления возможных неточностей измерения следует вывод, что образец не совсем однородный по поглощению, результаты отличаются по величине сигнала (рис. 3 (пробы 2 и 3)). Также измерения показали шум в области воды спустя два месяца после первого измерения образца, т. е. возможны изменения по степени высушивания (рис. 3).

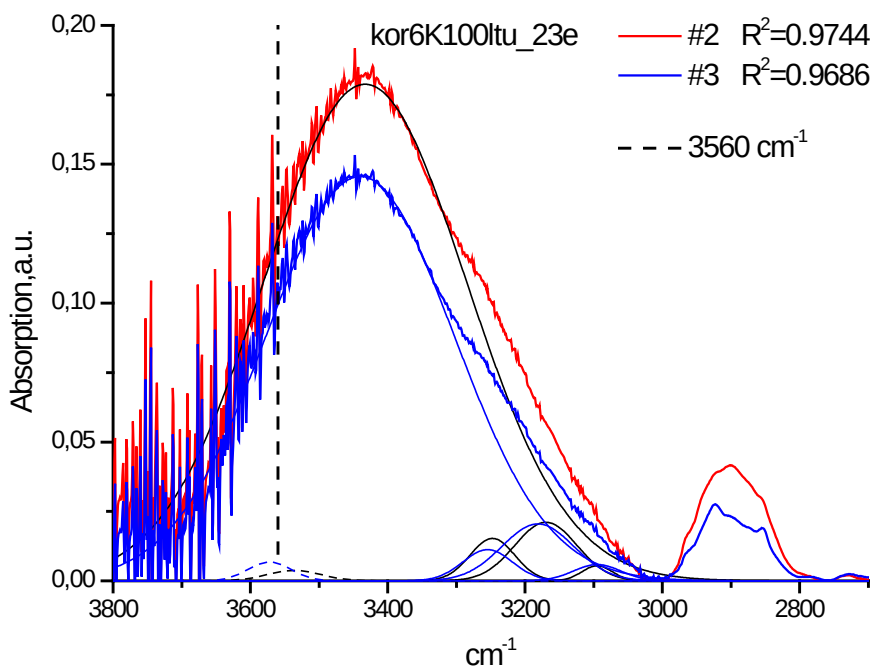


Рисунок 3 – ИК-спектр поглощения образца картона с плотностью 100 г/см^2 (пробы с одного образца – линии 2, 3)

Прерывистой линией отмечена область спектра поглощения молекулами водяного пара (3560 см^{-1}) и пик Гаусса их модели, который мы соотносим с вкладом водяного пара в итоговый спектр.

Из рисунка 3 видно, что положения водородных пиков практически совпадают при повторных пробных измерениях одного образца картона с плотностью 100 г/см^2 . Т. е. определяемый сдвиг (энергия) практически совпадают. Относительная плотность связей может отличаться, но не очень существенно. Также видно, что положение линии воды вариабильно вследствие статистического шума. И дает основной вклад в статистическую ошибку определения параметров модели. В дальнейшем предполагается обезвоживать (сушить) образцы и оценить изменения результатов при уменьшении вклада воды и в зависимости от метода сушки образцов.

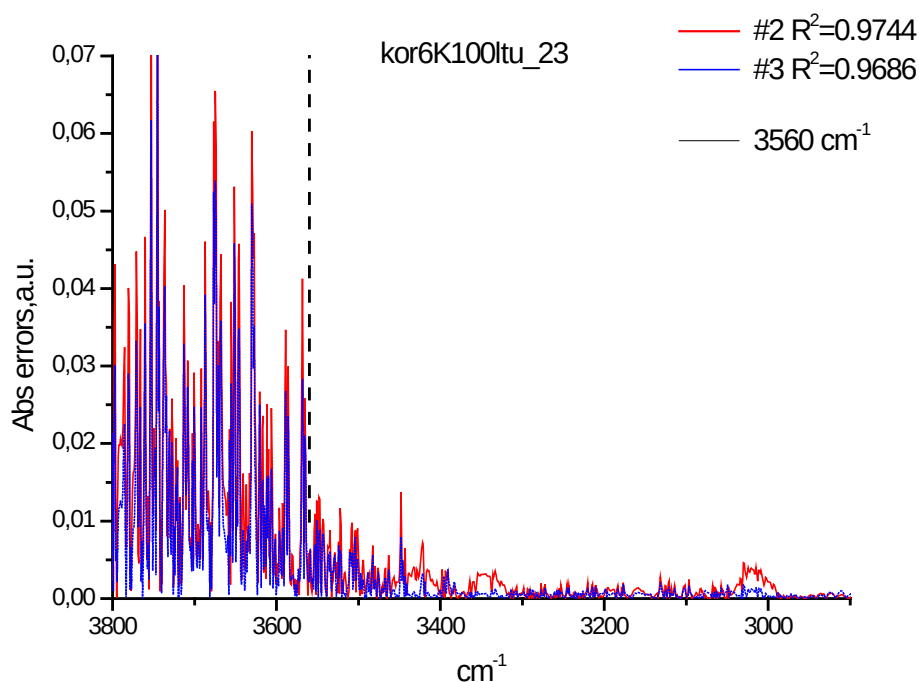


Рисунок 4 – Абсолютные отклонения экспериментальных спектров от расчетной модели для 2 и 3 съемки образца картона плотностью 100 г/см² пробы 2 и 3

На рисунке 4 показаны функции абсолютного отклонения экспериментальных спектров от расчетной модели для 2 и 3 съемки образца картона плотностью 100 г/см² пробы 2 и 3. Видно, что вода дает основной вклад в статистическую ошибку при расчете параметров модели.

Таким образом, исследование ИК-спектров крафт-бумаги представляет интерес с целью прогнозирования свойств продукции ЦБП и улучшения качества продукции с заданными свойствами.

Список литературы

1. Иванов-Омский, В. И. ИК-спектроскопия водородных связей в D-глюкозе / В. И. Иванов-Омский // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40 (18). – С. 29-34.
2. Фенгел, Д. Древесина. Химия. Ультраструктура. Реакции / Д. Фенгел, Г. Вегенер; перевод с англ. А. В. Оболенской и З. П. Ельницкой; под ред. д.т.наук, проф. А. А. Леоновича. – М.: Лесная промышленность, 1988.
3. Ванин, С. И. Древесиноведение / С. И. Ванин. – М.: Гослесбумиздат, 1949.
4. Обухова, И. А., Пименов С. Д., Лобок И.Д. Сезонная береза: результаты инфракрасной спектроскопии // И. А. Обухова, С. Д. Пименов, И. Д. Лобок // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 248. – С. 304-316. – URL: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.304-316>.
5. Иванов-Омский, В. И. и др. Оценка прочности бересты путем количественного исследования водородных связей методом ИК-спектроскопии / В. И. Иванов-Омский и др. // Известия СПбЛТА. – 2023. – Вып. 241. – С.256-265.

**PARAMETERS OF MOLECULAR BONDS, CURVE FITTING OF KRAFT PAPER
SAMPLES PRODUCED AT THE PULP AND PAPER MILL OF ILIM-GROUP,
KORYAZHMA**

I. A. Obukhova^{1*}, A. V. Koksharov², S. D. Pimenov¹, I. N. Trapeznikova³, V. I. Siklitsky³

¹*St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Saint Petersburg*

²*Ilim Group of Companies, Koryazhma*

³*A.F. Ioffe Physical and Technical Institute, Saint Petersburg, Russian Federation*

*E-mail: iobukhova@inbox.ru

Abstract. Kraft paper is a high-strength wrapping paper made from cellulose obtained from the sulfate boiling of wood. Technical cellulose is a natural polymer that is the basis for a wide range of materials currently produced and used. The current task is to establish the characteristic parameters that affect the quality of kraft paper and to assess its strength properties. Using Fourier IR (infrared) spectroscopy, the absorbance of kraft paper obtained from natural birch wood (the paper is intended for the production of fluting), as well as from pine and spruce needles of the Koryazhma plant, was studied. The relative contributions of hydrogen bonds for three types of H-bonds, the contributions of lignin lines, and the contributions of methylene lines in infrared spectra [1] characteristic of cellulose-containing plant wood raw materials have been determined using deconvolution.

Keywords: Fourier IR spectroscopy, hydrogen bonds, strength, cellulose.

References

1. Ivanov-Omskiy, V.I. IK-spektroskopiya vodorodnykh svyazey v D-glyukoze / V.I. Ivanov-Omskiy // Pis'ma v ZhTF. 2014. Vol. 40(18). S.29-34. (In Russian).
2. Fengel, D. Drevesina. Khimiya. Ul'trastruktura. Reaktsii / D.Fengel, G.Vegener; perevod s angl. A.V. Obolenskoy i Z.P. El'nitskoy; pod red. d.t.nauk, prof. A.A. Leonovicha. M.: Lesnaya prom., 1988. (In Russian).
3. Vanin, S.I. Drevesinovedenie / S.I. Vanin. M.: Goslesbumizdat, 1949. (In Russian).
4. Obukhova, I.A. Sezonnaya bereza: rezul'taty infrakrasnoy spektroskopii / I.A. Obukhova, S.D. Pimenov, I.D. Lobok // Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. 2024;(248):304-316. URL: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2024.248.304-316>. (In Russian).
5. Ivanov-Omskiy, V.I. i dr. Otsenka prochnosti beresty putem kolichestvennogo issledovaniya vodorodnykh svyazey metodom IK-spektroskopii / V.I. Ivanov-Omskiy i dr. // Izvestiya SPbLTA. 2023. vyp. 241. S. 256-265. (In Russian).

РАЗРАБОТКА УГЛЕНАПОЛНЕННЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ КАРТОНОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СОРБЦИОННЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Е. В. Орехов^{2*}, А. Г. Митилинеос², Е. Г. Смирнова¹, Ю. Е. Казакевич²

¹Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Аквафор», Санкт-Петербург

*E-mail: zeka@list.ru

Аннотация. Рост численности населения планеты обостряет проблему доступности чистой воды. Одним из перспективных решений является разработка недорогих и эффективных композиционных фильтрующих материалов на основе целлюлозы и порошкообразного активированного угля. Совместными исследованиями компании ООО «Аквафор» и Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД была проведена разработка угленаполненных фильтровальных картонов и изучены их адсорбционные и гидравлические характеристики.

Ключевые слова: композитные материалы, целлюлоза, фильтровальный картон, активированный уголь, адсорбция, фильтрация воды.

Обеспечение качества питьевой и промышленной воды остается одной из наиболее актуальных экологических проблем. Серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения во всем мире представляет загрязнение водных источников широким спектром опасных токсикантов, среди которых следует особо отметить ионы тяжелых металлов, высокотоксичные органические соединения, пестициды, стойкие органические загрязнители и фармацевтические препараты [1]. Традиционные методы очистки зачастую не обеспечивают эффективного удаления следовых количеств опасных токсикантов, что стимулирует разработку более эффективных и экономичных технологий [2]. Одним из наиболее перспективных и универсальных методов считается адсорбционный метод удаления вредных примесей из воды, что обусловлено относительной дешевизной, простотой применения и высокой эффективностью адсорбционных материалов в отношении широкого спектра загрязняющих веществ [3].

Одним из наиболее распространенных и востребованных адсорбентов считается активированный уголь, что объясняется его высокой удельной поверхностью, развитой регулируемой пористой структурой и высокой адсорбционной емкостью [4].

В высокоэффективных процессах разделения, характеризующихся малым временем контакта очищаемой жидкости с адсорбционным материалом, оправдано применение мелкодисперсных порошкообразных или пылеобразных активированных углей, обладающих выдающимися кинетическими характеристиками по адсорбционному извлечению из воды токсичных примесей. Однако их применение в системах очистки воды ограничено рядом практических трудностей, таких как высокое гидравлическое сопротивление при использовании в насадочных колоннах, сложность утилизации отработанного материала и последующей регенерации, склонность к биообрастанию [5, 6].

Для преодоления гидравлических ограничений при фильтрации мелкодисперсный активированный уголь используют в композитных фильтрующих материалах, иммобилизуя его частицы на поверхности или в порах инертных или функциональных носителей. Одним из наиболее перспективных носителей мелкодисперсных активированных углей является целлюлоза. Целлюлоза обладает рядом преимуществ, таких как наличие развитой волокнистой структуры с высокой удельной поверхностью, гидрофильность, нетоксичность, биоразлагаемость, биосовместимость, экологичность, низкая стоимость и широкие возможности по физико-механической обработке и химической модификации [7].

Фильтровальные картоны на основе целлюлозы характеризуются механической прочностью, высокой проницаемостью и низкой стоимостью, что делает целлюлозу оптимальной матрицей для создания композитных адсорбционных материалов [8], наполненных мелкодисперсными адсорбционными и другими функциональными компонентами.

Таким образом, эффективность фильтровальных картонов определяется несколькими взаимосвязанными наборами свойств: адсорбционными характеристиками (например, адсорбционной емкостью, кинетикой извлечения примесей и сродством к определенным загрязнителям), фильтрационными характеристиками (гидравлическая проницаемость и сопротивление фильтрации) и механической прочностью. Важнейшей научной и инженерной задачей является совершенствование структуры композиционных материалов путем оптимизации процессов внесения, распределения в структуре и прочного связывания частиц адсорбционных и других функциональных материалов, например, активированных углей в целлюлозной матрице для максимального повышения функциональных характеристик композитного материала без ущерба для его проницаемости и механической прочности.

В ходе предварительных исследований авторы оценили влияние ряда факторов на физические и химические свойства угленаполненных фильтровальных картонов:

1. Тип целлюлозы (хвойная, лиственная, хлопковая, мерсеризованная, БХТММ и т. д.).
2. Степень помола целлюлозы.
3. Размер фракции активированного угля и активированной угольной пыли.
4. Волокнистые добавки – инертные (полипропиленовые, полиакрилонитрильные, полиэфирные волокна, а также кварцевое и асбестовое волокно) и сорбционно-активные (ионообменные волокна, активированное угольное волокно, кварцевое волокно с иммобилизованными соединениями алюминия).
5. Гранулированные добавки (диатомит, перлит, вермикулит).
6. Водорастворимые добавки (флокулянты, диспергаторы, сульфат алюминия, добавки, корректирующие солевой фон).
7. Технологические параметры отлива картона, прессования и сушки (параметры вакуума, температуры сушки, прижимное давление, созревание картона).
8. Выбор подложки для формования картона (полипропиленовые сетки, спанбонды и мельтблун-полотно).

По результатам предварительных исследований авторами были выбраны оптимальные параметры изготовления угленаполненных фильтровальных картонов для использования в водоочистных системах различной конфигурации. Для иммобилизации пылеобразного активированного угля был использован поливинилацетат, поскольку он не токсичен и отлично удерживает мелкие частицы пыли на поверхности целлюлозы [9].

В данном исследовании изучали влияние содержания пылеобразного активированного угля в угленаполненном фильтровальном картоне на его эксплуатационные и сорбционные свойства.

Адсорбционные свойства разработанных композитных материалов изучали с использованием водных растворов модельных загрязнителей, таких как свободный хлор и краситель метиленовый голубой. Одновременно были проанализированы гидравлические свойства полученных материалов для выяснения взаимосвязи между структурой, свойствами и эксплуатационными характеристиками.

В проведенном исследовании были использовали следующие компоненты:

- сульфатная беленая хвойная целлюлоза марки SES по СТО 80241670-010-2018;
- пылеобразный активированный уголь (ПАУ) с размером частиц 1–10 мкм, полученный дроблением и рассевом активированного угля марки PJA2050W-60 (Филиппины);
- дисперсия поливинилацетата в воде (ПВА), марки Beltex по ТУ 20.52.10-007-98426682-2023;
- полиамидоамин эпихлоргидриновая смола (ПААЭ) марки Fennostrength PA 21.

Сульфатную хвойную целлюлозу марки SES распускали в гидроразбивателе, начальная степень помола 15°ШР. Далее в полученную пульпу при перемешивании вносили пылеобразный активированный уголь, заранее смешанный с дисперсией ПВА и смолу ПААЭ. После внесения всех компонентов перемешивание продолжали в течение 30 секунд.

Для оценки влияния разных стадий формования листа на гидродинамические характеристики картона лабораторные образцы материала изготавливали на листоотливном аппарате Rapid Koethen KWT (табл. 1). Все образцы, кроме № 4, после отливки сушили при температуре 25 °С. После оптимизации параметров получения материала, формование выполняли на исследовательском прототипе листоотливной машины (табл. 2). Во всех случаях формование бумажного листа производилось на подложку.

При работе на листоотливном аппарате Rapid Koethen KWT использовали постоянное соотношение компонентов ПАУ/целлюлоза/ПВА/ПААЭ 60:31:18:0,1. При работе на исследовательском прототипе варьировали массовую долю ПАУ в композите.

Таблица 1 – Полученные на листоотливном аппарате Rapid Koethen KWT образцы угленаполненных фильтровальных картонов

№	Условия	Масса, г/м ²
1	Мягкие условия отлива, отсутствие прессования и вакуумной сушки	274
2	Отсутствие прессования и вакуумной сушки	294
3	Отсутствие вакуумной сушки	277
4	Все стандартные стадии формования листа картона	271

Таблица 2 – Полученные на исследовательском прототипе образцы угленаполненных фильтровальных картонов

№	Масса, г/м ²	Содержание ПАУ, %	СОЕ МГ, мг/г	Степень реализации теоретической емкости, %
5	328	50	192	94
6	339	60	238	98
7	348	67	259	98
8	356	75	286	97

Была проведена оценка гидравлического сопротивления образцов № 1–4 (табл. 1) и выявлено, что на ухудшение проницаемости в наибольшей степени влияет стадия и вакуумная сушка листа (рис. 1).

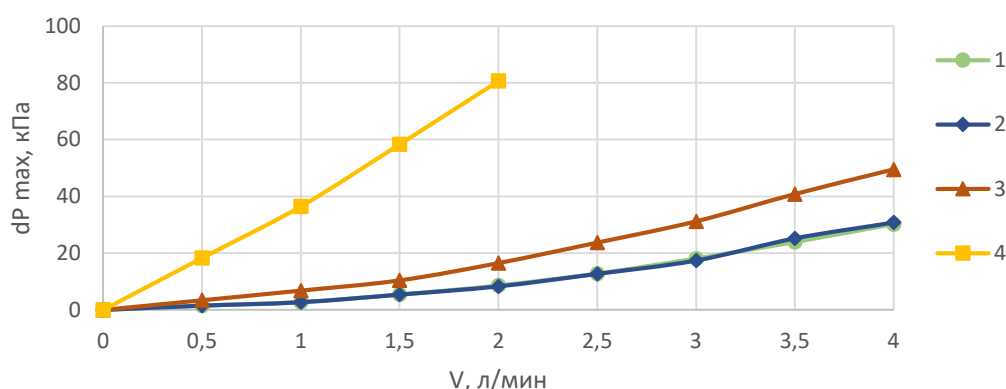


Рисунок 1 – Влияние каждой стадии формования листа картона на гидродинамику: 1 – мягкие условия отлива, отсутствие прессования и вакуумной сушки; 2 – отсутствие прессования и вакуумной сушки; 3 – отсутствие вакуумной сушки; 4 – все стандартные стадии формования листа картона

Был проведен анализ влияния состава полученных фильтровальных картонов на их сорбционные свойства путем измерения величины статической адсорбции красителя метиленового голубого из водного раствора с концентрацией 1500 мг/дм³ за 24 часа (табл. 2), испытаний по удалению хлороформа из водного раствора с концентрацией 300 мкг/дм³ (рис. 2) и по удалению свободного хлора из раствора с концентрацией 2 мг/дм³ (рис. 3).

Отмечено, что удаление хлороформа из воды происходит тем эффективнее, чем выше доля ПАУ в составе фильтровального картона. Данная закономерность не проявляется в должной степени при оценке зависимости степени удаления свободного хлора от доли ПАУ в композите. При этом степень удаления свободного хлора для всех испытанных образцов фильтровальных картонов относительно высока. Отличие сорбционного поведения хлороформа и свободного хлора может говорить либо о разном механизме взаимодействия загрязнителей различной природы с адсорбентом, либо о влиянии неоднородности образцов на результат очистки.

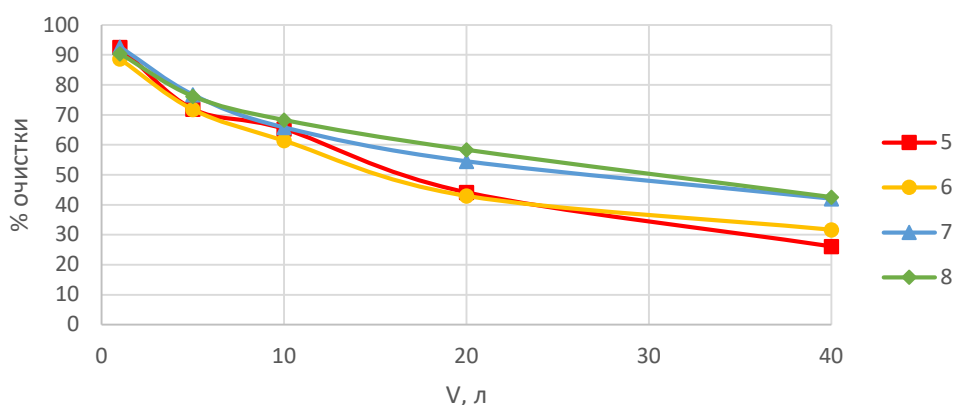


Рисунок 2 – Удаление хлороформа полученными угленаполненными фильтровальными картонами: 5 – содержание ПАУ 50 %; 6 – содержание ПАУ 60 %; 7 – содержание ПАУ 67 %; 8 – содержание ПАУ 75 %

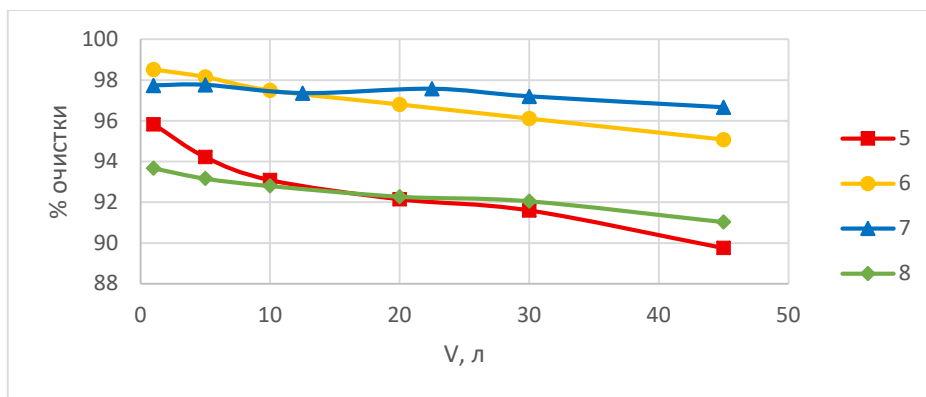


Рисунок 3 – Удаление активного хлора полученными угленаполненными фильтр-картонами: 5 – содержание ПАУ 50 %; 6 – содержание ПАУ 60 %; 7 – содержание ПАУ 67 %; 8 – содержание ПАУ 75 %

Для полученных образцов фильтровальных картонов с различной долей ПАУ также были экспериментально изучены гидравлические характеристики. Отмечено, что при достижении определенного соотношения ПАУ: целлюлоза проницаемость композиционного материала начинает резко снижаться (рис. 4). Такой эффект может быть связан с тем, что высокое содержание удерживаемых в объеме композита частиц мелкодисперсного активированного угля вызывает физическую блокировку путей для протекания воды внутри целлюлозной матрицы композита.

Сравнительный анализ поверхности образцов композитных материалов на сканирующем электронном микроскопе подтверждает это предположение (рис. 5).

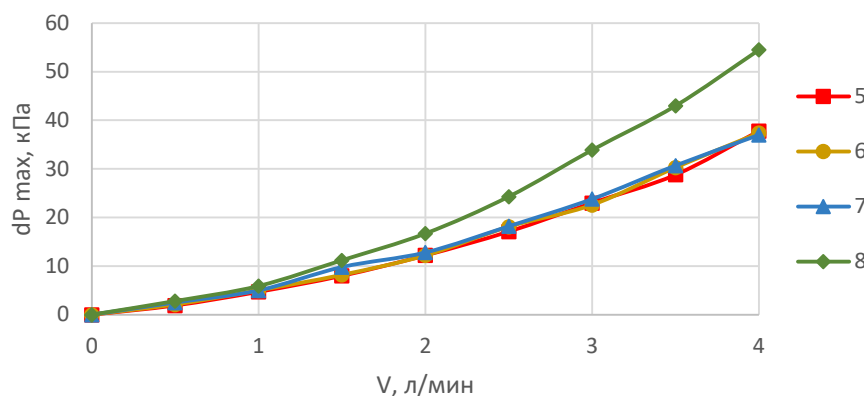


Рисунок 4 – Влияние состава угленаполненного фильтровального картона на гидродинамические свойства: 5 – содержание ПАУ 50 %; 6 – содержание ПАУ 60 %; 7 – содержание ПАУ 67 %; 8 – содержание ПАУ 75 %

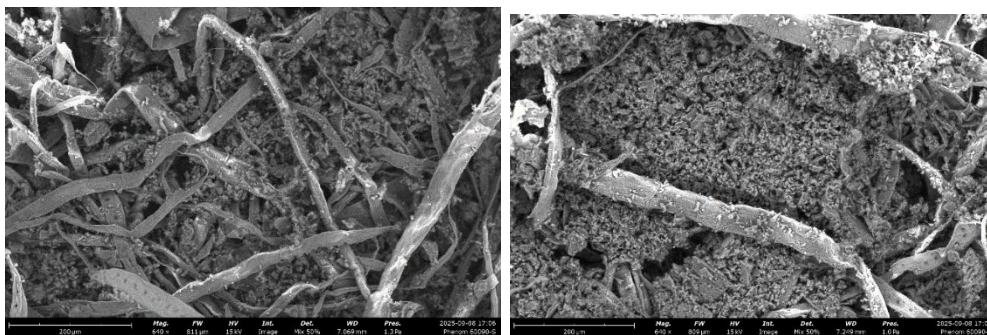


Рисунок 5 – Микрофотографии поверхности полученных угленаполненных фильтровальных картонов: А – содержание ПАУ 50 %, Б – содержание ПАУ 75 %

Выводы:

1. Разработаны составы и способы формирования угленаполненных фильтровальных картонов, содержащих ПАУ.
2. Определены основные параметры процесса формирования угленаполненного фильтровального картона, в наибольшей степени влияющие на уплотнение материала и позволяющие управлять гидравлическими характеристиками конечного продукта.
3. Изучена зависимость сорбционных свойств угленаполненных фильтровальных картонов от содержания ПАУ в них; показатель суточной сорбции метиленового голубого показал прямую зависимость от количества ПАУ. Сорбция хлороформа также зависит от содержания ПАУ в фильтровальном картоне. Однако удаление активного хлора имеет экстремальную зависимость от содержания ПАУ.
4. Проведена оценка влияния угольной пыли на гидродинамические показатели материала. Результаты показали, что оптимальным сочетанием гидродинамических и сорбционных свойств обладают образцы фильтровальных картонов с содержанием ПАУ 60–67 %.

Список литературы

1. Abdelhamid H. N., Mathew A. P. Cellulose-based materials for water remediation: adsorption, catalysis, and antifouling // *Frontiers in Chemical Engineering*. – 2021. – Т. 3. – С. 790314. DOI: 10.3389/fceng.2021.790314.2.
2. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment // *Environmental chemistry letters*. – 2019. – Т. 17. – №. 1. – С. 145-155. DOI: 10.1007/s10311-018-0785-9.

3. Yousef R., Qiblawey H., El-Naas M. H. Adsorption as a process for produced water treatment: A review // *Processes*. – 2020. – T. 8. – №. 12. – C. 1657. DOI: 10.3390/pr8121657.
4. Bansal R. C., Goyal M. Activated carbon adsorption. – CRC press, 2005. 487c.
5. Servais P., Billen G., Bouillot P. Biological colonization of granular activated carbon filters in drinking-water treatment // *Journal of Environmental Engineering*. – 1994. – T. 120. – №. 4. – C. 888-899. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(888).
6. Cherifi H., Bentahar F., Hanini S. Biosorption of phenol by dried biomass // *Desalination and Water Treatment*. – 2014. – T. 52. – №. 7-9. – C. 1699-1704. DOI: 10.1080/19443994.2013.807015.
7. Tapia-Orozco N. et al. Removal strategies for endocrine disrupting chemicals using cellulose-based materials as adsorbents: A review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2016. – T. 4. – №. 3. – C. 3122-3142. DOI: 10.1016/j.jece.2016.06.025.
8. Hubbe M. A., Hasan S. H., Ducoste J. J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: A review. 1. Metals // *BioResources*. – 2011. – T. 6. – №. 2. – C. 2161-2287. DOI: 10.15376/biores.6.2.2161-2287.
9. Dong Y. D. et al. Cellulose/carbon composites and their applications in water treatment—a review // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – T. 405. – C. 126980. DOI: 10.1016/j.ccej.2020.126980.

DEVELOPMENT OF CARBON-FILLED FILTER PAPERS AND STUDY OF THEIR ADSORPTION AND HYDRODYNAMIC PROPERTIES

E. V. Orekhov^{2*}, A. G. Mitilineos², E. G. Smirnova¹, Yu. E. Kazakevich²

¹*Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg*

²*Aquaphor LLC, Saint Petersburg, Russian Federation*

*E-mail: zeka@list.ru

Abstract. The growth of the planet's population exacerbates the problem of availability of clean water. One of the promising solutions is the development of inexpensive and effective composite filter materials based on cellulose and powdered activated carbon. Joint research of the Aquaphor LLC and the Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial and Technical Sciences developed activated carbon-filled filter cardboards and studied their adsorption and hydraulic characteristics.

Keywords: composite materials, cellulose, filter paper, activated carbon, adsorption, water filtration.

References

1. Abdelhamid H. N., Mathew A. P. Cellulose-based materials for water remediation: adsorption, catalysis, and antifouling. *Frontiers in Chemical Engineering*. 2021. Vol. 3. P. 790314.
2. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental chemistry letters*. 2019. Vol. 17. no. 1. P. 145-155.
3. Yousef R., Qiblawey H., El-Naas M. H. Adsorption as a process for produced water treatment: A review. *Processes*. 2020. Vol. 8. no. 12. P. 1657.
4. Bansal R. C., Goyal M. Activated carbon adsorption. CRC press. 2005. 487 p.
5. Servais P., Billen G., Bouillot P. Biological colonization of granular activated carbon filters in drinking-water treatment. *Journal of Environmental Engineering*. 1994. Vol. 120. no. 4. P. 888-899.
6. Cherifi H., Bentahar F., Hanini S. Biosorption of phenol by dried biomass. *Desalination and Water Treatment*. 2014. Vol. 52, no. 7-9. P. 1699-1704.
7. Tapia-Orozco N. et al. Removal strategies for endocrine disrupting chemicals using cellulose-based materials as adsorbents: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016. Vol. 4. no. 3. P. 3122-3142.
8. Hubbe M. A., Hasan S. H., Ducoste J. J. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: A review. 1. Metals. *BioResources*. 2011. Vol. 6. no. 2. P. 2161-2287.
9. Dong Y. D. et al. Cellulose/carbon composites and their applications in water treatment—a review. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 405. P. 126980.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КИСЛОТНОГО ГИДРОЛИЗА НА СОСТАВ И КАЧЕСТВО ГИДРОЛИЗАТОВ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ОСТАТКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

М. М. Ромашева, Е. Ю. Демьянцева, М. А. Селянкин*, Р. А. Смит

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: m.seliankin@gmail.com*

Аннотация. Исследовано влияние параметров кислотного гидролиза и предварительной щелочной обработки на качество микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), получаемой из растительного сырья недревесного происхождения. Рассмотрено воздействие жидкостного модуля гидролиза и концентрации щелочного экстрагента на состав гидролизатов и выход порошкового материала. Установлено, что щелочная экстракция эффективно удаляет водорастворимые вещества и танины, снижая содержание лигнина и повышая качество конечного продукта. Оптимизация процессов позволяет снизить расход кислоты и улучшить характеристики МКЦ, что открывает перспективы для комплексного использования сельскохозяйственных лигноцеллюлозных остатков в малотоннажных производствах.

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, лигноцеллюлозный материал, кислотный гидролиз, предварительная экстракция, пшеничная солома, топинамбур.

Микрокристаллическая целлюлоза является продуктом гидролиза целлюлозы, широко применяемым в фармацевтической, пищевой и лакокрасочной промышленности. Ключевым этапом ее получения является кислотное селективное расщепление 1,4-гликозидных связей целлюлозы. Основной промышленный источник МКЦ – древесная целлюлоза, однако расширение сырьевой базы за счет недревесного лигноцеллюлозного материала обосновано высокой доступностью сельскохозяйственных отходов. В то же время недревесное сырье характеризуется значительной вариабельностью компонентного состава, выраженной сезонностью, а также высоким содержанием экстрактивных веществ и кремния, что требует оптимизации технологических условий, но при этом расширяет ассортимент целевых продуктов за счет извлечения ценных побочных продуктов.

Цель данной работы – изучить влияние параметров предварительной обработки перед гидролизом на качество МКЦ, получаемой из соломы пшеницы и стеблей топинамбура.

Объектом исследования был выбран целлюлозный материал после процесса делигнификации пшеничной соломы – полых сухих стеблей злаковых растений после сбора зерна, обладающий достаточно высокой первичной белизной [1]. Для сравнения был взят целлюлозный материал, полученный из стеблей топинамбура, собранных в ноябре месяце после естественного засыхания. Компонентный состав представлен на рисунке 1.

С применением стандартизированного метода Кюршнера было определено содержание целлюлозы в сырье. Как видно из рисунка 1, содержание целлюлозы сопоставимо с листовыми породами [2]. Количество водорастворимых веществ не превысило 10 %. Содержание кремния в соломе составило 0,03 % а.с.с., что потребует предварительной обработки с целью его удаления и облегчения делигнификации. Предварительная обработка включала щелочную экстракцию растворами NaOH с концентрацией от 0 % до 10 % для удаления водорастворимых веществ и танинов. После этого проводился кислотный гидролиз с использованием надуксусной кислоты при температуре 100 °С в течение 60 мин. Влияние жидкостного модуля гидролиза оценивали по выходу порошкового материала, содержанию лигнина (единицы Каппа) и степени полимеризации целлюлозы.

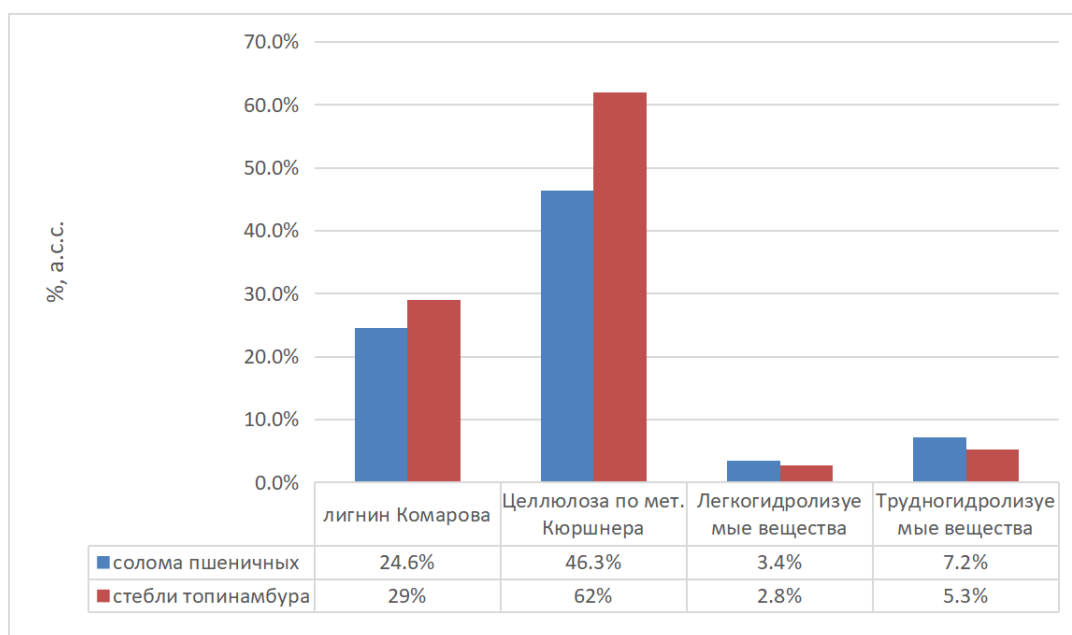


Рисунок 1 – Компонентный состав сырья

Результаты и обсуждение. Результаты показали, что увеличение концентрации щелочи в экстрагенте способствовало выведению конденсированных танинов и лигнина (рис. 2).

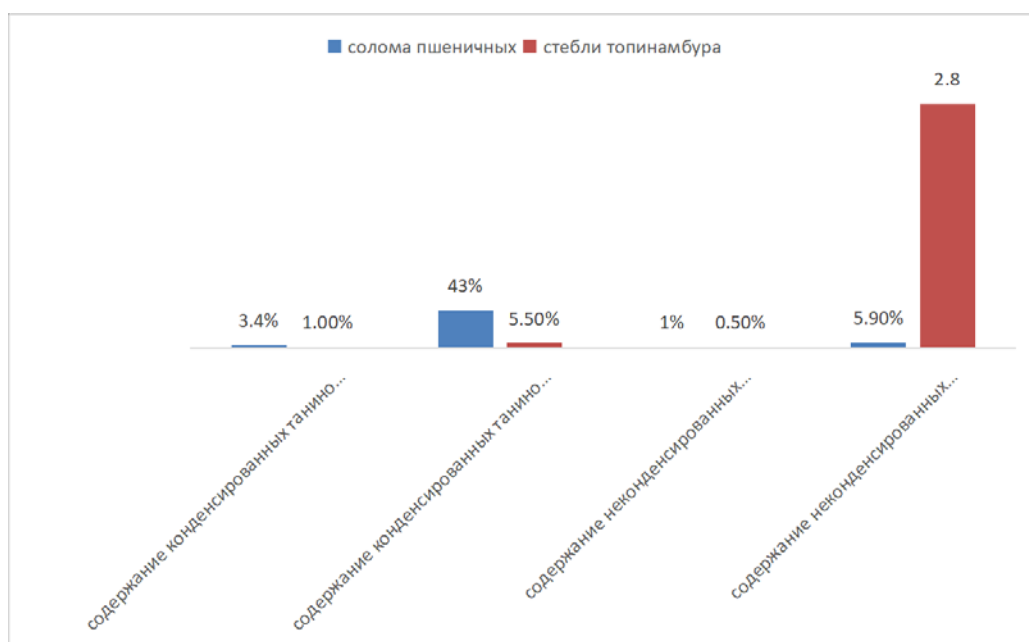


Рисунок 2 – Выход танинов в зависимости от содержания щелочи в экстрагенте

При этом наблюдалось снижение выхода целлюлозного материала, что подтверждает процесс делигнификации. Качество целлюлозного материала улучшалось с ростом концентрации щелочи: содержание лигнина в целлюлозе из соломы составило 50 ед. Каппа, а у целлюлозного материала из стеблей топинамбура – 86 единиц Каппа.

При уменьшении жидкостного модуля гидролиза степень полимеризации порошковой целлюлозы увеличивалась. Получение продукта из целлюлозного материала с влажностью около 55 % без предварительной сушки позволяет предотвратить ороговение и улучшить качество порошка и снизить гидромодуль гидролиза до 1:25. Предварительная щелочная обработка обеспечивала значительное извлечение водорастворимых веществ и танинов, что

позволило уменьшить расход кислоты при гидролизе на окисление компонентов лигноцеллюлозного материала и повысить качество порошкового продукта (рис. 3).

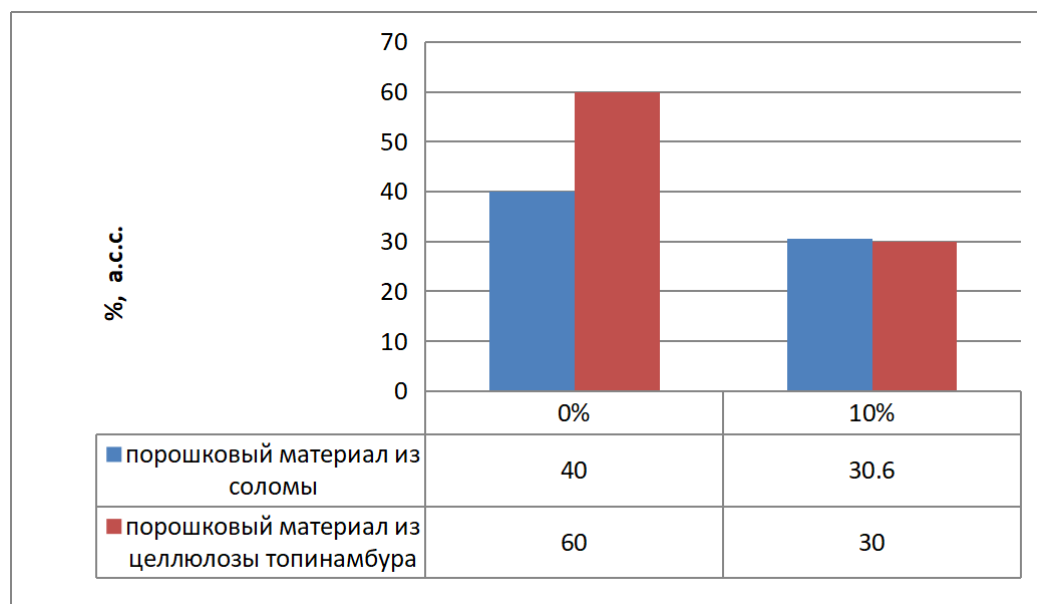


Рисунок 3 – Выход порошкового материала в зависимости от концентрации щелочи предварительной обработки

Предварительно извлеченные экстрактивные вещества, в том числе танины, представляют интерес для использования в производстве экологически безопасных клеевых композиций [3].

Таким образом, оптимизация условий предварительной щелочной экстракции и кислотного гидролиза способствует повышению качества микрокристаллической целлюлозы, получаемой из сельскохозяйственных отходов, и снижению затрат кислоты. Предварительная обработка позволяет одновременно извлекать ценные экстрактивные вещества, расширяя технологические и экономические возможности использования сельскохозяйственных лигноцеллюлозных остатков для производства МКЦ и сопутствующих продуктов.

Список литературы

1. Вураско, А. В. Получение целлюлозы щелочно-окислительно-органо-сольвентным способом / А. В. Вураско, Б. Н. Дриккер, Э. В. Мертин, Г. В. Астратова // Technical sciences. – 2012. – № 11. – С. 586-592.
2. Евстигнеев, Э. И. Определение нецеллюлозных полисахаридов и других компонентов в растительном сырье / Э. И. Евстигнеев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2018. – №. 225. – С. 248-259.
3. Чжао, Ц. Исследование нового натурального клея для древесно-стружечных плит, состоящего из танина и сахарозы / Ц. Чжао, К. Умэмура // J Wood Sci №60, 2012-269–277 (2014). – URL: <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1405-3>.

INFLUENCE OF ACID HYDROLYSIS CONDITIONS ON THE COMPOSITION AND QUALITY OF LIGNOCELLULOSE WASTE HYDROLYSATES

M. M. Romasheva, E. Yu. Demyantseva, M. A. Selyankin*, R. A. Smith

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

*E-mail: m.seliankin@gmail.com

Abstract. The influence of the parameters of acid hydrolysis and pre-alkaline treatment on the quality of microcrystalline cellulose (MCC) obtained from vegetable raw materials of non-wood origin is investigated. The effect of the liquid module of hydrolysis and the concentration of an alkaline extractant on the composition of hydrolysates and the yield of powdered material is considered. It has been found that alkaline extraction effectively removes water-soluble substances and tannins, reducing the lignin content and improving the quality of the final product. Process optimization makes it possible to reduce acid consumption and improve the characteristics of MCCS, which opens up prospects for the integrated use of agricultural lignocellulose residues in low-tonnage industries.

Keywords: microcrystalline cellulose, lignocellulose material, acid hydrolysis, pre-extraction, wheat straw, jerusalem artichoke

References

1. Vurasko, A.V., Driker B.N., Mertin E.H.V., Astratova G.V. Poluchenie cellyulozy shchelochno-okislitel'no-organosol'ventnym sposobom / A.V. Vurasko, B.N. Driker, E.H.V. Mertin, G.V. Astratova // Technical sciences. 2012. No.11. P. 586-592.
2. Evstigneev, E.H. I. Opređenje necellyuloznykh polisakharidov i drugikh komponentov v rastitel'nom syr'e / E.H.I. Evstigneev // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2018. No. 225. P. 248-259.
3. Chzhao C., Umehmura K. Issledovanie novogo natural'nogo kleya dlya drevesno-struzhechnykh plit, sostoyashchego iz tanina i sakharozy. // J Wood Sci №60, 2012- 269–277 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1405-3>

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ НЕДРЕВЕСНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Е. И. Симонова*, В. В. Зайцев, В. К. Дубовый

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: bliznyakova1989@mail.ru*

Аннотация. Одна из актуальных проблем целлюлозно-бумажной промышленности связана с поиском альтернативных источников волокнистого сырья в условиях растущего спроса и экологических требований. Возрастает интерес к использованию недревесного растительного сырья (однолетние растения, сельскохозяйственные отходы) в качестве перспективной и устойчивой замены традиционной древесине [1, 2]. Особое внимание уделяется перспективам применения низкотемпературных обработок для получения волокнистых полуфабрикатов, которые позволяют минимизировать энергозатраты, снизить нагрузку на окружающую среду и получать волокнистые полуфабрикаты для производства тарных видов картона. Технологические параметры получения волокнистых полуфабрикатов низкотемпературной щелочной обработкой, такие как продолжительность обработки, расход щелочи и вид растительного сырья, играют решающую роль в формировании свойств. Однако, несмотря на значительное количество исследований в этой области, остаются открытыми многие вопросы, касающиеся взаимосвязи между технологическими параметрами щелочной обработки и физико-механическими характеристиками получаемых волокнистых полуфабрикатов. В лабораторных условиях проведены серии низкотемпературных щелочных обработок для недревесного растительного сырья – конопли технической и соломы хлебных злаков, с помощью программ математического моделирования определены оптимальные параметры низкотемпературной щелочной обработки для исследуемого сырья. При рассчитанных параметрах получены волокнистые полуфабрикаты, определены их физико-механические характеристики.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажная промышленность, недревесное растительное сырье, низкотемпературная щелочная обработка, волокнистые полуфабрикаты, сельскохозяйственные отходы.

Цель работы заключается в определении влияния технологических параметров низкотемпературной щелочной обработки, на свойства волокнистых полуфабрикатов из недревесного растительного сырья.

Объектами исследования являлись: солома хлебных злаков (пшеница) и технической конопли. Компонентный состав недревесного растительного сырья: содержание целлюлозы (Кюшнера) для соломы пшеницы – 43,3 % от абсолютно-сухого сырья (а.с.с.), для технической конопли – 54,3 % от а.с.с., содержание лигнина (ГОСТ 11960) в соломе пшеницы – 21,6 % от а.с.с., в технической конопле – 23,1 % от а.с.с., зольность для соломы пшеницы – 12, 8 % от а.с.с., технической конопли – 0,6 % от а.с.с.

Техническая конопля содержит больший процент целлюлозы, чем солома пшеницы, так для соломы пшеницы можно отметить высокую зольность, что, возможно, связано с местом произрастания и вегетационным развитием.

На рисунке 1 приведено морфологическое строение исследуемого сырья.

Волокна соломы пшеницы в основном образованы прозенхимными клетками междоузлий, имеют длину от 0,5 до 2 мм. Толщина при этом небольшая – 0,02–0,03 мм. Волокна содержат короткие неволокнистые клетки зубчатой и спиральной формы. Волокна технической конопли имеют длину 2,5–4 мм, при толщине 0,02–0,03 мм.

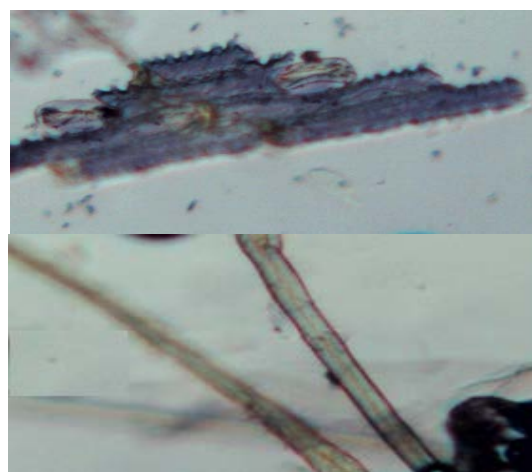
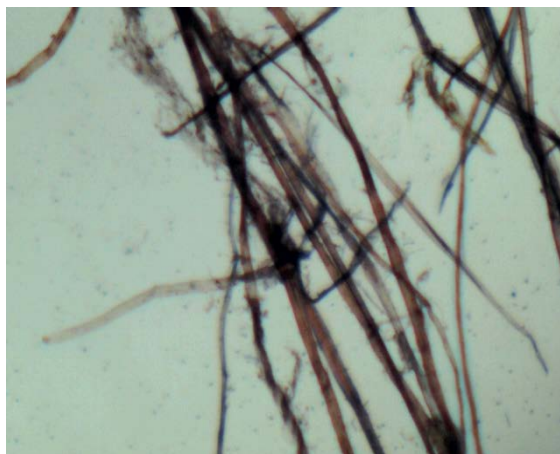


Рисунок 1 – микроскопия волокон технической конопли и соломы пшеницы

Низкотемпературную щелочную обработку проводили в лабораторном варочном котле при следующих условиях: жидкостный модуль 7:1, расход NaOH варьировали в диапазоне 5–15 % от а.с.с., продолжительность обработки 60–180 минут, температура 90 °С.

Полученные волокнистые полуфабрикаты промывали водой до нейтральной среды, высушивали и проводили анализ по основным показателям, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние параметров низкотемпературной щелочной обработки на свойства волокнистых полуфабрикатов из недревесного растительного сырья

Вид сырья	расход NaOH, % от а.с.с.	Продолжительность обработки, час.	Выход, % от а.с.с.	Зольность, % от а.с.с.	Остаточный лигнин, % от а.с.с.
техническая конопля	15	3	35,4±0,5	0,30±0,06	6,3±0,2
		2	43,1±0,5	1,00±0,06	6,9±0,2
		1	56,9±0,5	1,57±0,06	7,6±0,2
	10	3	40,8±0,5	0,55±0,06	6,5±0,2
		2	56,1±0,5	1,10±0,06	7,8±0,2
		1	66,2±0,5	1,69±0,06	8,3±0,2
	5	3	56,2±0,5	0,70±0,06	7,9±0,2
		2	63,5±0,5	1,75±0,06	8,6±0,2
		1	70,6±0,5	2,75±0,06	9,3±0,2
солома пшеницы	15	3	45,0±0,5	0,58±0,06	7,6±0,2
		2	53,5±0,5	0,97±0,06	8,0±0,2
		1	61,4±0,5	1,34±0,06	11,1±0,2
	10	3	40,0±0,5	0,95±0,06	7,3±0,2
		2	52,0±0,5	1,60±0,06	8,8±0,2
		1	80,0±0,5	2,07±0,06	10,7±0,2
	5	3	45,0±0,5	1,90±0,06	9,8±0,2
		2	65,0±0,5	2,70±0,06	10,2±0,2
		1	83,0±0,5	3,20±0,06	12,3±0,2

Проанализировав данные, представленные в табл. 1, можно сделать вывод, что при низкотемпературной щелочной обработке недревесного растительного сырья с ростом расхода щелочи снижается выход волокнистых полуфабрикатов, выход снижается также и с увеличением продолжительности обработки. Для всех рассматриваемых видов недревесного

растительного сырья с увеличением расхода щелочи возрастает процент удаленного лигнина, чем выше расход, тем ниже содержание остаточного лигнина.

Для поиска оптимальных значений концентрации щелочи и продолжительности обработки исследуемого сырья был спланирован и реализован двухуровневый двухфакторный полный факторный эксперимент с трехкратным повторением каждого опыта. По данному плану может быть получена экспериментально статистическая модель с нормализованными значениями входных факторов в виде полинома:

$$y_j = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2,$$

где b_0 – свободный член, равный значению выходного параметра в центре факторной области при $x_1 = x_2 = 0$; b_1 и b_2 – эффекты линейного влияния на выходной параметр соответствующих входных факторов; b_{12} – нелинейный эффект совместного влияния обоих входных факторов на выходной параметр.

За выходные параметры были взяты следующие свойства волокнистых полуфабрикатов (y_j):

y_1 – выход волокнистого полуфабриката, %;

y_2 – содержание остаточного лигнина, %;

Анализ зависимостей выходных параметров от значений входных факторов показывает, что с увеличением значений входных факторов все выходные параметры уменьшаются. При этом визуально невозможно определить оптимальные значения входных факторов, обеспечивающих высокий выход волокнистых полуфабрикатов при минимальном содержании остаточного лигнина. Для поиска оптимальных условий необходимо применить математические методы решения оптимизационных задач. Для решения поставленной оптимизационной задачи были составлены следующие математические модели:

$$y_{\text{техническая конопля}} = 84.67 - 0.24x_1 - 2.02x_2 - 0.001x_1x_2 + 0.0005x_{12} + 0.06x_{22}$$

ограничения:

$$y_{\text{лигнин}} \leq 6\%$$

$$60 \leq x_1 \leq 180 \text{ мин,}$$

$$5 \leq x_2 \leq 15\%.$$

$$y_{\text{солома пшеницы}} = 55.51 - 15.73 \cdot x_1 - 5.52 \cdot x_2 + 2.23 \cdot x_{12} + 1.98 \cdot x_{22} + 5.4 \cdot x_1x_2$$

ограничения:

$$y_{\text{лигнин}} \leq 6\%$$

$$60 \leq x_1 \leq 180 \text{ мин,}$$

$$5 \leq x_2 \leq 15\%.$$

Для решения этих оптимизационных задач был применен численный метод обобщенного приведенного градиента с использованием процедуры «Поиск решения» программы Excel [3]. С учетом оптимизации низкотемпературной щелочной обработки были получены волокнистые полуфабрикаты из технической конопли с выходом – 72 % и 73 % из соломы пшеницы со следующими физико-механическими свойствами (табл. 2).

Таблица 2 – Физико-механические показатели волокнистых полуфабрикатов из недревесного растительного сырья, полученных низкотемпературной щелочной обработкой

Показатель	Солома технической конопли	Солома пшеницы
Масса, г/м ²	80±5	80±5
Плотность, г/см ³	0,5±0,1	0,6±0,1
Сопротивление торцевому сжатию гофрированного образца (CCT ₀), кН/м,	5,8±0,3	4,3±0,3
Сопротивление сжатию на коротком расстоянии, (SCT) кН/м	1,7±0,3	1,1±0,3
Прочность при растяжении, кН/м	5,6±0,3	2,0±0,3

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

- малоликвидное сырье, такое как солома пшеницы и техническая конопля, может применяться для получения волокнистых полуфабрикатов низкотемпературной щелочной обработкой;
- в результате решения оптимизационной задачи можно рекомендовать режим обработки с расходом щелочи 10 % от а.с.с., продолжительностью 2 часа;
- анализируя физико-механические характеристики волокнистых полуфабрикатов, можно заключить, что волокнистые полуфабрикаты из технической конопли и соломы пшеницы, полученные низкотемпературной щелочной обработкой, могут применяться, как альтернативное сырье в композициях тароупаковочных видов бумаг и картона.

Список литературы

1. Zhong L., Huimei W., Lanfeng H. Pulping and papermaking of non-wood fibers// Pulp and Paper Processing. 2018. С.1-30. DOI:10.5772/intechopen.79017
2. Карелина, А. А. Недревесное сырье как источник целлюлозных волокон. Перспективы использования, проблемы и решения (обзор) / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Химия растительного сырья. – 2024. – № 2. – С. 55-75. DOI: 10.14258/jcprm.20240213401.
3. Шадрина, Н. И. Решение задач оптимизации в Microsoft Excel 2010 / Н. И. Шадрина, Н. Д. Берман. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. – 101 с.

EFFECT OF LOW-TEMPERATURE ALKALINE TREATMENT PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF NON-WOODY VEGETABLE RAW MATERIALS

E. I. Simonova*, V. V. Zaitsev, and V. K. Dubovyi

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: bliznyakova1989@mail.ru*

Abstract. One of the current problems in the pulp and paper industry is the search for alternative sources of fibrous raw materials in the face of growing demand and environmental requirements. There is an increasing interest in using non-wood plant raw materials (annual plants and agricultural waste) as a promising and sustainable alternative to traditional wood [1,2]. Special attention is being paid to the potential of using low-temperature processing methods to produce fibrous semi-finished products, which can help minimize energy consumption, reduce environmental impact, and produce fibrous semi-finished products for the production of packaging cardboard. The technological parameters of low-temperature alkaline processing of fibrous semi-finished products, such as the processing duration, alkali consumption, and type of raw material, play a crucial role in shaping the properties. However, despite the significant amount of research in this area, many questions remain open regarding the relationship between the technological parameters of alkaline treatment and the physical and mechanical characteristics of the resulting fibrous semi-finished products. In laboratory conditions, a series of low-temperature alkaline treatments were performed on non-woody plant raw materials such as technical hemp and cereal straw, and the optimal parameters of low-temperature alkaline treatment for the studied raw materials were determined using mathematical modeling programs. Fibrous semi-finished products were obtained using the calculated parameters, and their physical and mechanical characteristics were determined.

Keywords: pulp and paper industry, non-wood plant raw materials, low-temperature alkaline processing, fibrous semi-finished products, and agricultural waste.

References

1. Zhong L., Huimei W., Lanfeng H. Pulping and papermaking of non-wood fibers, Pulp and Paper Processing, 2018, P.1-30. DOI:10.5772/intechopen.79017
2. Karelina, A.A. Non-wood raw materials as a source of cellulose fibers. Prospects of use, problems and solutions (review) / A.A. Karelina, Yu.D. Alashkevich, V.A. Kozhukhov // Chemistry of plant raw materials, 2024, No. 2, Pp. 55-75. DOI: 10.14258/jcprm.20240213401. (In Russian).
3. Shadrina, N. I. Solving Optimization Problems in Microsoft Excel 2010 / N.I. Shadrina, N.D. Berman. Habarovsc: Pacific State University Press, 2016, 101 p. (In Russian).

РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ПОДОГРЕВАТЕЛИ ВЫПАРНЫХ СТАНЦИЙ

В. А. Суслов

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vyachsuslov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются различные конструктивные типы парожидкостных подогревателей щелока в технологических схемах выпарных станций целлюлозно-бумажного производства. Указаны основные преимущества и недостатки теплообменных аппаратов этого типа, определяющие эффективность их эксплуатации. На основе оценки эффективности использования подогревателей представлен теоретический анализ, влияющий на выбор новых отечественных аппаратов при замене старых.

Ключевые слова: выпаривание, выпарные аппараты, теплообменники, коэффициент теплоотдачи, интенсификация теплоотдачи, надежность эксплуатации, компактность.

Выпарные станции (ВС) являются неотъемлемой частью целлюлозного производства в России. Их основное назначение – обеспечить необходимую для горения концентрацию отработанного щелока в процессе его регенерации. ВС получают теплоту для выпаривания воды из щелока, как правило, от пара, называемого греющим, и поступающего в головной корпус станции. Пар, образовавшийся в результате испарения щелока, называется вторичным, который направляется в качестве греющего в последующий ВА.

ВС в зависимости от относительного движения пара и выпариваемого раствора по корпусам классифицируются на: прямоточные, в которых пар и выпариваемый раствор движутся в одном направлении; противоточные, в которых пар и выпариваемый раствор движутся в противоположных направлениях; ВС со смешанным питанием корпусов, схема которых имеет элементы прямо- и противотока.

В ВС, работающей по прямоточной схеме, давление пара в корпусах равномерно уменьшается по направлению от головного ВА к конденсатору. При этом выпариваемый щелок, двигаясь в одном направлении с потоком пара и попадая в последующий корпус с более низким давлением, является перегретым относительно его температуры насыщения. Вследствие этого происходит его вскипание. Появляется избыток пара, который может использоваться в схеме ВС. Поэтому прямоточные ВС, имеющие минимальное количество перекачивающих насосов и теплообменников, обладают максимальной энергоэффективностью. Главный недостаток прямоточной схемы заключается в том, что в процессе выпаривания с повышением концентрации и одновременным снижением температуры щелока резко увеличивается его вязкость до значений, при которых циркуляция невозможна. Кроме того, вскипание щелока при входе в кипяtilьные трубы ВА служит причиной интенсивного накипеобразования на этом участке поверхности труб, что снижает интенсивность теплообмена. Поэтому рассматриваемая схема питания корпусов ВС не может применяться для выпаривания щелока до высокой концентрации.

В противоточных ВС греющий пар и выпариваемый щелок движутся в противоположных направлениях. При такой схеме движения потоков по мере сгущения щелока повышается его температура, поэтому вязкость щелока остается в пределах, достаточных для его циркуляции, обеспечивающей относительно высокие коэффициенты теплоотдачи. При противоточной схеме питания щелок попадает в кипяtilьные трубы ВА всегда в недогретом до температуры насыщения состоянии. Поэтому его вскипание, как при прямоточной схеме питания корпусов ВС, исключено. За счет этого и постоянства вязкости щелока производительность противоточных ВС может быть наивысшей по сравнению с любой другой схемой. К недостаткам противоточной схемы следует отнести необходимость установки для обеспечения движения щелока перед каждым ВА перекачивающего насоса и

подогревателя, значительно увеличивающих энергоёмкость ВС. Кроме того, тяжелые условия работы головного ВА, в котором одновременное сочетание максимальной концентрации и высокой температуры щелока способствуют образованию накипи в кипяtilьных трубах, резко снижающей производительность и эффективность работы всей ВС. Для исключения этого недостатка ВС должны комплектоваться головными ВА «с падающей пленкой», концентрирующими на поверхности теплообмена гравитационно стекающий щелок высокой концентрации в режиме его испарения, а не кипения. Результаты работ, представленных в [1], показали, что применение подобных ВА в составе ВС практически исключает накипобразование.

Схема ВС со смешанным питанием корпусов имеет элементы прямо- и противотока, снижающая недостатки, присущие предыдущим схемам.

Большинство ВС целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) поставлены на ЦБП инофирмами в 70–80-х годах прошлого века. Эти ВС работают по смешанной или противоточной схемам питания ВА с поднимающейся пленкой раствора и укомплектованы различного типа рекуперативными парожидкостными подогревателями. Замена оборудования ВС ЦБП вследствие их значительных сроков амортизации сегодня связана с определенными трудностями. Однако многие вопросы замены подогревателей раствора, как наиболее быстро выходящих из эксплуатации аппаратов из-за засорения проходных сечений для щелока, на новые могут быть решены в пределах России на отечественных заводах и предприятиях, где производится значительный ряд необходимых для ВС ЦБП теплообменников.

Теплообменные аппараты ВС можно классифицировать на поверхностные и смесительные. К поверхностным относятся рекуперативные аппараты, если теплоносители разделены теплообменной поверхностью. В смесительных аппаратах теплообмен происходит при смешении теплоносителей без разделяющей их поверхности теплообмена. Известно, что наибольшей тепловой эффективностью обладают смесительные теплообменники. Однако процесс теплообмена в аппарате связан с понижением концентрации щелока, что противоречит основному принципу работы ВС. Поэтому промышленного применения эти аппараты не получили.

При выборе вида и конструкции подогревателей щелока, как правило, руководствуются методами оценки эффективности конвективных поверхностей с учетом технологических требований и конкретных условий выбранного теплового процесса. Зависимости для коэффициентов теплоотдачи и аэродинамических сопротивлений, определяющие их эффективность, описываются уравнениями вида: $Nu = f(Re)$, $Eu = f(Re)$, в которых для каждого типа поверхности теплообмена выбираются свои характерные линейные размеры и соответствующие относительные параметры. Вследствие этого для геометрически неподобных поверхностей представленные критериальные зависимости оказываются несопоставимыми между собой, так как они отражают закономерности теплообмена и гидродинамики только для конкретной исследуемой поверхности. Для сравнения тепловой эффективности геометрически неподобных поверхностей подогревателей различных типов необходимы показатели, одинаково справедливые для оценки различных форм конвективных поверхностей при любом обтекании их потоком теплоносителя. Этой проблеме посвящены многочисленные работы по исследованию гидродинамики и теплообмена на поверхностях теплообменного оборудования [2].

Михаил Викторович Кирпичёв [3] предложил характеризовать совершенство теплообменного аппарата при вынужденном движении рабочих сред отношением теплоты, переданной в аппарате Q , к затратам мощности N на преодоление гидравлических сопротивлений и ввел понятие энергетического коэффициента $E = Q/N$. Недостатком данной методики явилось неоднозначность коэффициента E в зависимости от многих факторов, определяющих интенсивность теплообмена. Для характеристики тепловой эффективности любой формы поверхности теплообмена в [4] было предложено пользоваться энергетическим коэффициентом $E_0 = \alpha / N_0$, характеризующим отношение количества теплоты, отданной единицей поверхности в единицу времени при разности температур в

1 °С, к мощности, затраченной для перемещения теплоносителя и отнесенной к единице поверхности: $N_0 = \Delta P \cdot w \cdot (f/F)$,

где ΔP – перепад давления; w – скорость потока; f – проходное сечение для щелока; F – поверхность теплообмена.

В такой записи энергетический коэффициент E_0 является универсальным, характеризующим количество теплоты, переданной при разности температур в 1 °С, при затратах энергии в 1 Вт на движение рабочей среды при обтекании 1 м² поверхности теплообмена.

Приведенные выше условия дают возможность выявить для сравниваемых поверхностей теплообмена относительные характеристики по тепловой эффективности, габаритам и массе при любой форме поверхностей и при любом способе обтекания их потоком газа или жидкости. Поэтому приведенная методика актуальна и в настоящее время [5].

Коэффициент теплоотдачи α связан с энергозатратами зависимостью: $\alpha = f(N_0)$, которая может быть определена аналитическим или графическим способами. Обычно используется графический метод сопоставления. Для примера на рисунке 1 приведен график сопоставления тепловой эффективности двух произвольных поверхностей теплообмена [4]. Оценка сравниваемых поверхностей производится при условии $Q = idem$ и $\Delta t = 1$. При некотором значении N_0 , согласно уравнению теплопередачи, для сравниваемых поверхностей 1 и 2 отношение $\alpha_1/\alpha_2 = F_2/F_1 = \psi$ характеризует преимущество тепловой эффективности поверхности 1 по сравнению с поверхностью 2.

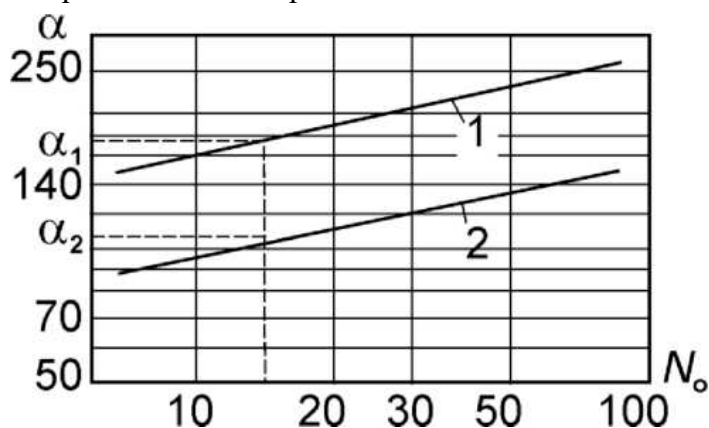


Рисунок 1 – Сопоставление тепловой эффективности поверхностей нагрева

Аналогично с использованием коэффициента компактности Π проводится оценка габаритных характеристик, а при наличии значений массы единицы поверхности – массовых характеристик сравниваемых поверхностей.

Предложенный метод анализа эффективности конвективных поверхностей [4] получен исходя из пренебрежения термическим сопротивлением для одной стороны, что часто справедливо для процессов конвекции с газовыми средами. Еще в большей степени это относится к парожидкостным подогревателям, в которых теплота передается процессами конденсации и конвекции. В случае сравнимости коэффициентов теплоотдачи в условиях работы парожидкостного рекуперативного подогревателя ВС необходимо рассчитать коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} + \frac{1}{\alpha_p}},$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи при конденсации пара; $\delta_{ст}$ и $\lambda_{ст}$ – толщина и коэффициент теплопроводности стенки поверхности теплообмена; $\delta_{нак}$ и $\lambda_{нак}$ – толщина и коэффициент теплопроводности накипи на поверхности теплообмена; α_p – коэффициент теплоотдачи к нагреваемому раствору.

Затраты мощности на преодоление сопротивления со стороны пара пренебрежимо малы по сравнению с сопротивлениями со стороны раствора. Тогда энергетический коэффициент E будет определяться коэффициентом теплопередачи K и затратами мощности на преодоление сопротивления со стороны раствора: $E = \frac{K}{N}$, где N – затраты мощности на сопротивление при движении жидкости.

Работы согласно приведенной выше методике показали превосходство пластинчатых теплообменников над кожухотрубчатыми и в случае их применения на ВС ЦБП. Здесь главную роль играет компактность аппаратов.

Кожухотрубчатые парожидкостные аппараты, к примеру в российском исполнении «Добровент», отличающиеся высокой надежностью, обладают значительным недостатком – сложностью очистки поверхности теплообмена при работе с растворами, содержащими большое количество механических примесей. Из-за данного недостатка подобный тип теплообменников получил ограниченное распространение в ЦБП, и большинство ВС, поставленных в ЦБП в прошлом веке фирмой «Розенблад», были оснащены сварными спиральными подогревателями, схема работы которых представлена на рисунке 2.

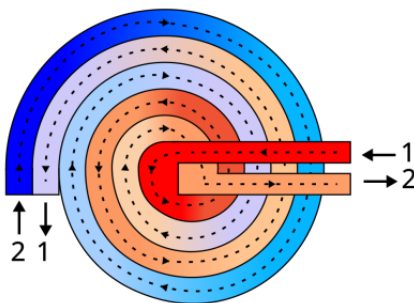


Рисунок 2 – Схема работы спирального теплообменника

В этих аппаратах поверхность теплообмена выполнялась из двух металлических листов, свернутых в виде спиралей вокруг центральной трубы, образующих каналы прямоугольного сечения. Внутренние концы спиралей приваривались к разделительной перегородке. Расстояние между листами фиксировалось штифтами. Теплообменники изготавливались с поверхностью нагрева до 100 м². К достоинствам этих аппаратов можно отнести компактность и пониженное по сравнению с кожухотрубчатыми многоходовыми теплообменниками гидравлическое сопротивление. К недостаткам аппарата относятся сложность ремонта, практическая невозможность очистки поверхности теплообмена вследствие неразборности конструкции. В настоящее время значительное количество отечественных производителей: Ридан или *Danfoss*; группа *РосВЭП*; Аксион; *Clever* и др., изготавливают как сварные, так и разборные спиральные теплообменники.

Наиболее перспективным решением замены рассматриваемого оборудования ВС, по нашему мнению, являются ВА и сварные теплообменники с поверхностью теплообмена из профилированных листов, обладающих значительно большим по сравнению с аппаратами из гладких листов эффектом самоочистки и теплопередачей, особенно при гравитационном течении выпариваемого раствора. Этот эффект был обнаружен автором работы во время авторского надзора при испытании теплообменника теплорекуперационного агрегата на Архангельском ЦБК еще в 80-х годах.

Современный ВА с поверхностью теплообмена из профилированных листов и многократной принудительной циркуляцией показан на рисунке 3. Поверхность теплообмена ВА состоит из профилированных пластинчатых элементов размером 7300×1200 мм, расположенных параллельно с шагом 40 мм. Элемент выполнен из двух профилированных листов, сваренных по его кромкам, и крепится в раме внутри ВА. Верхняя решетка рамы неподвижно закреплена к обечайке ВА. Раствор с помощью циркуляционного насоса Н

подается в раздатчик раствора 6, равномерно распределяется между элементами и стекает тонким слоем, полностью покрывая поверхность пластин.

Поскольку кипяtilьные элементы свободно подвешены внутри корпуса аппарата, образовавшийся вторичный пар имеет возможность неограниченного выхода из щелей, образованных кипяtilьными элементами. Греющий пар попадает во внутреннее пространство верхней части элемента и конденсируется на его поверхности. Конденсат отбирается из нижней части элемента.

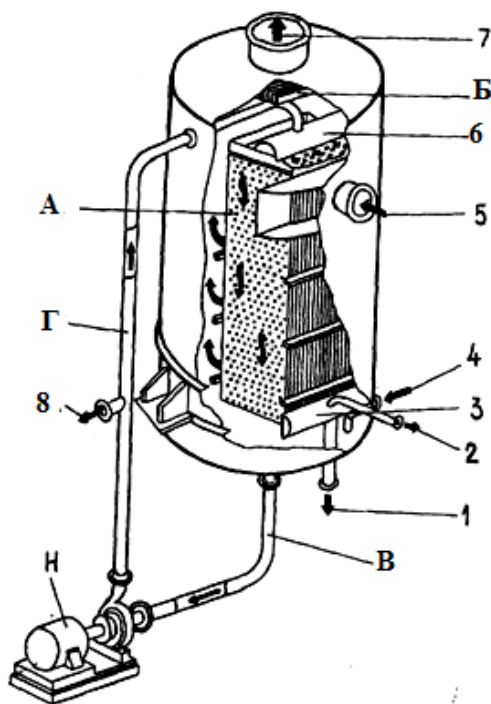


Рисунок 3 – ВА с поверхностью теплообмена из профилированных листов:

А – кипяtilьник; Б – каплеотбойник; В и Г – циркуляционные трубы; Н – циркуляционный насос; 1 – патрубок выхода конденсата; 2 – штуцер для отвода неконденсирующихся газов; 3 – сборник конденсата; 4 – патрубок для подвода раствора; 5 – патрубок входа греющего пара; 6 – раздатчик раствора; 7 – патрубок для отвода вторичного пара; 8 – патрубок для отвода раствора

ВС ОАО «Илим Групп» в г. Коряжма, укомплектованная ВА с принудительной циркуляцией гравитационно стекающего раствора, с поверхностью теплообмена из профилированных листов и встроенными в корпус ВА теплообменниками, производительностью 600 т/ч по щелоку успешно работает более 10 лет по противоточной шестиступенчатой схеме.

В России теплообменники из профилированных листов изготавливаются фирмой «Теплотекс АПВ». Каналы, образованные пластинами APV, имеют несколько большее поперечное сечение, чем в подобных аппаратах других производителей, что дает более равномерное распределение теплоносителя по ширине канала в пластинах APV. Поэтому они загрязняются с меньшей интенсивностью.

Выводы:

1. Дана классификация ВС ЦБП в зависимости от относительного движения теплоносителя и выпариваемого раствора. Показаны преимущества и недостатки ВС с различными схемами питания корпусов.

2. Приведенная методика оценки эффективности конвективных поверхностей В.М. Антуфьева доработана применительно к парожидкостным подогревателям раствора ВС.

3. На основе опыта эксплуатации существующих ВС ЦБП дана сравнительная характеристика наиболее эффективных пластинчатых подогревателей.

4. Рекомендованы для выбора при замене оборудования ВС российские парожидкостные теплообменники из профилированных листов с гравитационным течением раствора.

Список литературы

1. Суслов, В. А. Тепловые процессы в выпарных установках ЦБП: монография / В. А. Суслов, А. А. Поздняков. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 400 с.
2. Ефимов, А. Л. Обобщение данных по теплообмену и сопротивлению в каналах пластинчатых теплообменников / А. Л. Ефимов, М. Ю. Юркина, В. С. Глазов и др. // Вестник МЭИ. – 2016. – № 5.
3. Кирпичёв, М. В. Теплопередача / М. В. Кирпичёв, М. А. Михеев, Л. С. Эйгенсон. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1940.
4. Антуфьев, В. М. Теплообменные аппараты из профильных листов / В. М. Антуфьев, Е. К. Гусев, В. В. Ивахненко, Е. Ф. Кузнецов, Ю. М. Ламм. – Л., «Энергия», 1972. – 128 с.
5. Миронов, А. А. Обоснование выбора рациональной формы и размеров вихревого интенсификатора теплообмена / Ю. Ф. Гортышев, С. А. Исаев, А. В. Щелчков, И. А. Попов, А. А. Миронов // Международная конференция Национального комитета по тепломассообмену РАН и школа-семинар молодых учёных и специалистов под рук-вом акад. РАН А.И. Леонтьева. – СПб. Изд-во политехнического университета, 2017.

HEAT EXCHANGERS FOR HEATING SOLUTION OF EVAPORATION STATIONS

V. A. Suslov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: vyachsuslov@mail.ru

Abstract. Various design types of vapor-liquid liquor heaters in technological schemes of pulp and paper production evaporation stations are considered. The main advantages and disadvantages of heat exchangers of this type, which determine the efficiency of their operation, are indicated. Based on the assessment of the efficiency of using heaters, a theoretical analysis is presented that affects the choice of new domestic devices when replacing old ones.

Keywords: evaporation, evaporators, heat exchangers, heat transfer coefficient, heat transfer intensification, operational reliability, compactness.

References

1. Suslov, V.A. Thermal processes in CBP evaporation plants: a monograph / V.A. Suslov, A.A. Pozdnyakov. St. Petersburg: POLYTECH PRESS. 2022. 400 p.
2. Efimov, A.L. Generalization of data on heat exchange and resistance in the channels of plate heat exchangers / A.L. Efimov, M.Y. Yurkina, V.S. Glazov et al. // Bulletin of the MEI. 2016. No. 5.
3. Kirpichev M.V., Mikheev M.A., Eigenson L.S. Heat transfer / M.V. Kirpichev, M.A. Mikheev, L.S. Eigenson. M.: The State Energy Publishing House. 1940.
4. Antufiev, V.M. Heat exchangers from profile sheets. / V.M. Antufiev, E.K. Gusev, V.V. Ivakhnenko, E.F. Kuznetsov, Yu. M. Lamm. L.: "Energy", 1972. 128 p.
5. Mironov, A.A. Substantiation of the choice of a rational shape and size of a vortex heat exchange intensifier / Yu.F. Gortyshev, S.A. Isaev, A.V. Shchelchikov, I.A. Popov, A.A. Mironov // International Conference of the National Committee on Heat and Mass Transfer of the Russian Academy of Sciences and a school-seminar for young scientists and specialists led by the Academy of Sciences. RAS A.I. Leontieva, St. Petersburg. Publishing house of the Polytechnic University. 2017.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИЦИИ ПО ВОЛОКНУ НА СВОЙСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-ГИДРОГЕЛЕВОГО КОМПОЗИТА

Т. О. Лунева¹, В. К. Дубовый^{1*}, С. В. Савилов²

¹ Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: dubovy2004@mail.ru

Аннотация. В работе исследованы целлюлозно-гидрогелевые композиты на основе сульфатной хвойной и лиственной беленой целлюлозы с добавлением полиакриламидного гидрогеля. Целью исследования являлось исследование влияния композиции по волокну и оптимизация расхода гидрогеля (1–10 % от массы волокна) на достижение баланса между сорбционной емкостью (≥ 12 г/г) и механической прочностью композитов.

Ключевые слова: гидрогелевый композит, композиция по волокну, сульфатная беленая целлюлоза.

Разработка высокоэффективных сорбционных материалов на основе целлюлозно-гидрогелевых композитов (ЦГГ-композитов) представляет, как значительный экологический и промышленный интерес, так и потребность импортозамещения. Полиакриламидные адсорбенты демонстрируют исключительную гидрофильность и стабильность, однако подбор их расхода в композитах требует тщательного изучения для достижения оптимального баланса функциональных характеристик. Значительная разница в себестоимости гидрогеля и целлюлозы дополнительно подчеркивает важность оптимизации расхода адсорбента.

В данном исследовании была установлена зависимость между расходом полиакриламидного адсорбента и ключевыми физико-механическими свойствами композита, что углубляет понимание структурообразования в гибридных гидрогелевых системах.

Для поведения исследования было изготовлено два вида композита: на основе 100 % сульфатной хвойной беленой целлюлозы со степенью помола (СП) 16 °ШР и 100 % сульфатной лиственной беленой целлюлозы со СП 15 °ШР.

Структурно-морфологические, физико-химические, физико-механические и сорбционные свойства бумаги и ЦГГ-композитов исследовали согласно методикам [1, 2].

Ключевым технологическим фактором, определяющим свойства конечного материала, является процесс размола целлюлозы, который вызывает два основных эффекта – укорочение волокон (поперечная рубка) и фибриллирование поверхности (продольное расщепление на микрофибриллы). Данные структурные изменения приводят к увеличению удельной поверхности волокон, что повышает механическую прочность (за счет увеличения контакта между фибриллированными волокнами) и сорбционную емкость (за счет увеличения пористости фибриллированной структуры и усиления гигроскопичности).

Гидрогель представлял собой сополимер акриловой кислоты и акриламида, на основе [3] определялись следующие характеристики:

- 1) Массовая доля нелетучих веществ, %, не менее – 87;
- 2) Равновесное водопоглощение в дистиллированной воде, г/г, не менее – 400;
- 3) Массовая доля растворимой части, %, не более – 20;
- 4) Массовая доля остаточного акриламида, % – менее 0,1;
- 5) Массовая доля остаточной акриловой кислоты, % – менее 0,1;
- 6) Внешний вид – белые опалесцирующие гранулы;
- 7) Гранулометрический состав, мкм – 200-400.

Химической основой гидрогеля является сополимерный материал, синтезированный из акриламида $\text{CN}_2 = \text{CHCONH}_2$ и полиакрилатов натрия $[-\text{CH}_2-\text{CHCO}_2\text{Na}]_n$. В водной среде

данный сополимер образует полиэлектролит, чей электростатический баланс между отрицательно заряженными карбоксильными группами и положительно заряженными амидными группами регулируется их стехиометрическим соотношением. Материал демонстрирует высокую водопоглощающую способность, величина которой преимущественно зависит от концентрации ионов Na^+ . Как полиакриламид, так и полиакрилаты проявляют выраженные адгезионные свойства в водных системах, что было учтено при исследовании композитного материала [4].

Образующаяся в водной среде гидрофильная поверхность гидрогеля эффективно взаимодействует с гидрофильными целлюлозными волокнами. Данное взаимодействие лежит в основе технологии производства ЦГГ-композитов по бумагоделательной методике, где используется водно-волоконистая суспензия («бумажная масса»). Внесение гидрогеля в структуру бумаги с относительно равномерным распределением частиц гидрогеля по объему отливаемого листа возможно в виде водной суспензии.

Массу воздушно-сухого гидрогеля 5 г добавляют в стеклянный стакан с 2000 мл воды при перемешивании погружной мешалкой (1500 об/мин). Перемешивание ведут в течение 10 минут до образования однородной суспензии, концентрацией 0,25 %. Расчетное количество суспензии добавляют в бумажную массу перед отливом ЦГГ-композита. Массу перемешивают в течение 5 минут и отливают ЦГГ-композит. Сушку образцов ЦГГ-композита проводят под вакуумом при 95–98 °С до сухости 7–8 %.

Изучено влияние расхода гидрогеля на физико-механические свойства и сорбционную способность ЦГГ-композита. В таблице 1 представлены результаты исследования влияния расхода гидрогеля на свойства ЦГГ-композита при СП СХБЦ 16 °ШР.

Таблица 1 – Влияние расхода гидрогеля на физико-механические показатели и впитываемость ЦГ-композита из сульфатной беленой хвойной целлюлозы, массой 100 г/м², при степени помола целлюлозы (СП) 16 °ШР

№ п/п	Расход гидрогеля, %	Впитываемость, г H_2O /г композита	Прочность, Н	Толщина, мм	Плотность, г/см ³
1	0	4	36,6	0,18	0,55
2	1,0	10	28,3	0,19	0,53
3	2,5	11	26,2	0,20	0,50
4	5,0	12	22,5	0,21	0,48
5	10,0	13	19,4	0,21	0,48

Исследованы следующие расходы гидрогеля: 1,0; 2,5; 5,0; и 10,0 % от массы абсолютно сухого волокна (м.а.с.в.). Основным критерием эффективности служила впитывающая способность материала, в соответствии с требованиями к медицинским и гигиеническим материалам, она должна составлять не менее 12 г/г.

Из таблицы 1 видно, что увеличение расхода гидрогеля повышает впитываемость композита. Требуемая впитываемость воды достигается при расходе гидрогеля 5,0 %. Отметим, что увеличение расхода гидрогеля увеличивает среднюю толщину образца и понижает его плотность. Это положительное изменение свойств, так как повышается пористость материала и его впитываемость. Объясняется наблюдаемая зависимость значительным набуханием гидрогеля в водной среде и увеличением объема частиц.

Увеличение расхода гидрогеля снижает разрывную прочность композита. Так, в таблице 1 видно, что доля добавленного гидрогеля в 10 % снижает прочность на 17,2 Н. Что составляет 1,72 Н на каждый % добавленного гидрогеля. Это значительное понижение прочности ЦГ-композита. Объясняется данное явление тем, что частицы гидрогеля в данном конкретном варианте применения выполняют функцию инертного наполнителя. При этом малые доли

гидрогеля, ограниченно набухая до значительных объемов, препятствуют сближению поверхностей волокон и уменьшают плотность межволоконных связей.

Говоря о конкретном варианте применения гидрогеля, подразумевается его сравнительно быстрый контакт с водой, в пределах 10–15 мин. Это время определено опытным путем и обеспечивает значительное, но не предельное водопоглощение и набухание с отсутствием видимого поверхностного гидролиза и взаимной реакции полимера и целлюлозы. Гидролиз ожидаемо должен компенсировать потерю прочности за счет дополнительных когезионных сил связи.

В качестве коротковолокнистого полуфабриката была использована сульфатная лиственная беленая целлюлоза (СП 15 °ШР). Сульфатная лиственная беленая целлюлоза по своим структурно-морфологическим свойствам значительно отличается от сульфатной хвойной беленой целлюлозы. Элементарные анатомические единицы – клетки по размерам в лиственной древесине, примерно, в 1,5–2,0 раза меньше, чем в хвойной древесине. При получении целлюлозы сульфатным способом клетки частично разрушаются, углеводная часть деполимеризуется. В итоге степень полимеризации целлюлозы и длина волокна уменьшаются.

С другой стороны, морфологические единицы лиственной древесины – клетки, представлены значительно большим видовым и размерным разнообразием. При формировании целлюлозных материалов образуются менее прочные, но более объемные (пухлые) листы. Это обстоятельство может существенно влиять на производство и свойства ЦГГ-компози́тов. Поэтому исследования важны. Степень помола 15 °ШР, которую имела техническая целлюлоза, сравнима с сульфатной целлюлозой – 16 °ШР. Эта разница в пределах ошибки опыта. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Результаты (табл. 2) свидетельствуют, что впитываемость бумаги из лиственной целлюлозы без добавления гидрогеля выше 5 г/г против 4 г/г для хвойной целлюлозы. Прочность также ниже – 34,2 Н против 36,6 Н.

При добавлении гидрогеля ЦГГ-композит отличается повышенной впитываемостью воды, несколько большей толщиной и меньшей плотностью.

Полученные закономерности подтверждают вышеуказанные ожидания и показывают, что ЦГГ-композит может производиться из сульфатной беленой лиственной целлюлозы наравне с сульфатной хвойной целлюлозой.

Отличительным результатом для ЦГГ-композита из лиственной целлюлозы является высокая впитываемость воды – до 18 % г/г, при расходе гидрогеля 10 % от массы целлюлозы. Для сульфатной хвойной целлюлозы впитываемость при прочих равных условиях составляет 13 г/г.

Таблица 2 – Исследование влияния расхода гидрогеля на свойства целлюлозно-гидрогелевого композита массой 100 г/м² на основе сульфатной лиственной беленой целлюлозы (СП 15 °ШР)

№ п/п	Расход гидрогеля, %	Впитываемость, г Н ₂ О /г	Разрывная прочность, Н	Толщина, мм	Плотность, г/см ³
1	0	5	34,2	0,17	0,58
2	1,5	11	27,1	0,18	0,55
3	2,5	12	24,3	0,19	0,53
4	5,0	13	20,8	0,21	0,48
5	10,0	18	18,3	0,22	0,45

Значимым результатом данного эксперимента является целесообразность применения для получения ЦГГ-композита сульфатной беленой лиственной целлюлозы. Получаемый продукт ожидается качественно лучше и экономически эффективнее.

Как показано в выполненном исследовании, ЦГГ-композит, изготовленный из сульфатной хвойной и сульфатной лиственной целлюлозы, отличается свойствами. При этом его изготовление возможно, как из одного вида, так и из обоих видов целлюлозы. Учитывая разные свойства целлюлозы и их отпускную цену, представлялось важным исследовать влияние композиции по волокну на свойства ЦГГ-композита. Результаты представлены в таблице 3.

При изготовлении ЦГГ-композита добавки гидрогеля составили 5 % от массы целлюлозы. Композит отливался массой 100 г/м².

Как видно из таблицы 3, при одинаковом расходе гидрогеля, без его добавления впитываемость воды примерно одинаковая (12–13 г/г). Разные соотношения сульфатной и сульфитной целлюлозы существенно повышают впитываемость. Добавки лиственной целлюлозы 50–70 % к массе хвойной целлюлозы позволяют получить ЦГГ-композит с повышенной впитываемостью воды – до 16 г/г. Этот результат представляется лучшим из уже рассмотренных вариантов.

Таблица 3 – Влияние композиции по волокну на свойства целлюлозно-гидрогелевого композита массой 100 г/м² (расход гидрогеля 5%)

№ п/п	Расход волокна, %		Впитываемость, г Н ₂ О /г	Разрывная прочность, Н	Толщина, мм	Плотность, г/см ³
	СХБ	СЛБ				
1	100	0	12	22,5	0,21	0,48
2	70	30	15	22,0	0,21	0,48
3	50	50	16	21,3	0,20	0,50
4	30	70	16	21,1	0,21	0,48
5	0	100	13	20,8	0,21	0,48

На основании полученных результатов исследования можно сделать вывод, что для производства ЦГГ-композита предпочтительнее использовать композиции сульфатной хвойной и лиственной целлюлозы в соотношении 50:50–30:70 %. Потребительские свойства и экономическая составляющая полученных ЦГГ-композитов будут приемлемыми для промышленного производства.

Список литературы

1. Дубовый, В. К. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона / В. К. Дубовый. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та. 2006. – 230 с.
2. ГОСТ ИСО 171901-112019 Методы испытаний для определения характеристик абсорбирующих материалов на полимерной основе.
3. Комплексная химическая переработка древесины: учебник для вузов / И. Н. Ковернинский, В. И. Комаров, С. И. Третьяков, Н. И. Богданович, О. М. Соколов, Н. А. Кутакова, Л. И. Селянина, Е. В. Дьякова. – Архангельск: Изд-во Арх. гос. техн. ун-та, 2006. – 374 с.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FIBER COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF CELLULOSE-HYDROGEL COMPOSITE

T. O. Luneva¹, V. K. Dubovy^{1}, S. V. Savilov²*

¹ Higher School of Technology and Energy, SPbGUPTD, Saint Petersburg

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

*E-mail: dubovy2004@mail.ru

Abstract. The paper studies cellulose-hydrogel composites based on sulfate coniferous and deciduous bleached cellulose with the addition of polyacrylamide hydrogel. The aim of the study was to investigate the effect of the fiber composition and optimize the hydrogel consumption (1–10% of the fiber mass) to achieve a balance between the sorption capacity (≥ 12 g/g) and the mechanical strength of the composites.

Keywords: hydrogel composite, fiber composition, sulfate bleached cellulose.

References

1. Dubovyi, V.K. Laboratory Workshop on Paper and Cardboard Technology / V.K. Dubovyi. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. 2006. 230 p. (In Russian).
2. GOST ISO 171901-112019 Test Methods for Determining the Characteristics of Polymer-Based Absorbent Materials. (In Russian).
3. Complex Chemical Processing of Wood / I.N. Koverninsky, V.I. Komarov, S.I. Tretyakov, N.I. Bogdanovich, O.M. Sokolov, N.A. Kutakova, L.I. Selyanina, E.V. Dyakova: Textbook for Higher Education Institutions. Arhangelsk: Publishing House of the Arkhangelsk State Technical University. 2006. 374 p. (In Russian).

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РИСОВОЙ СОЛОМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗ НЕЕ БУМАЖНОЙ МАССЫ

Д. Д. Урозова*, Я. В. Казаков

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Россия*

**E-mail: durdonakhonurozova@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается проблема утилизации рисовой соломы – побочного продукта сельского хозяйства, который в больших объемах сжигается, создавая экологическую нагрузку. Для Республики Узбекистан перспективным направлением является ее переработка в целлюлозное волокно для целлюлозно-бумажной промышленности. Однако традиционные содовые и сульфатные методы требуют значительных энергозатрат, сопровождаются активным растворением кремнезема и ухудшением качества продукта.

В качестве альтернативы предлагается рассмотреть технологию сульфатного отстаивания, проводимую при атмосферном давлении и низких температурах. Исследование направлено на подбор и оптимизацию условий делигнификации рисовой соломы. В качестве переменных факторов изучены концентрация щелочного реагента ($\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{Na}_2\text{CO}_3 = 2:1:1$) и продолжительность процесса.

По результатам работы установлены рациональные параметры проведения процесса, обеспечивающие получение волокнистого продукта с повышенным выходом и сниженной зольностью. Предполагается, что применение данной технологии будет способствовать сокращению энергопотребления, минимизации перехода кремнезема в раствор, повышению экологичности и сохранению структуры волокон.

Таким образом, проводимые исследования направлены на обоснование эффективности технологии сульфатного замачивания и оценку ее перспектив для целлюлозно-бумажной промышленности, особенно в регионах с ограниченными лесными ресурсами, таких как Узбекистан.

Ключевые слова: рисовая солома, целлюлозное волокно, делигнификация, сульфатное отстаивание, щелочные реагенты, зольность, энергоэффективность, экологичность.

Рост мирового спроса на целлюлозно-бумажную продукцию усиливает давление на лесные ресурсы и делает актуальным поиск альтернативного сырья. Одним из наиболее доступных и возобновляемых материалов является рисовая солома – побочный продукт сельского хозяйства, объемы которого ежегодно исчисляются миллионами тонн.

Традиционный способ утилизации соломы – открытое сжигание – сопровождается массовыми выбросами углекислого газа, сажи и твердых частиц, усугубляя экологические проблемы [3, 4, 9]. При этом переработка соломы в целлюлозное волокно могла бы одновременно решать задачи утилизации отходов и обеспечения сырьем целлюлозно-бумажной промышленности.

Однако использование рисовой соломы осложняется ее химическим составом: высоким содержанием кремнезема и особенностями структуры лигнина. Это приводит к повышенной зольности продукта, износу оборудования и затрудняет процесс делигнификации. Традиционные содовые и сульфатные методы переработки оказываются чрезмерно энергозатратными и сопровождаются образованием трудноудаляемых отложений.

В мировой практике разрабатываются различные альтернативные методы (органо-солевые, ферментативные, биологические), но большинство из них пока остается на уровне лабораторных исследований и требует значительных затрат [5, 7].

В связи с этим целью настоящей работы является изучение и оптимизация мягкого щелочного метода – технологии сульфатного отстаивания рисовой соломы при низких температурах и атмосферном давлении.

Предлагаемая технология сульфатного отстаивания обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами варки целлюлозы:

1. Энергоэффективность: процесс проводится при низких температурах (25–60 °С) и атмосферном давлении, что существенно снижает энергозатраты.

2. Минимизация растворения кремнезема: щадящие условия обработки способствуют сохранению кремнезема в твердой фазе, уменьшая риск образования отложений на оборудовании.

3. Экологичность: отсутствие высоких температур и давления снижает выбросы токсичных веществ и делает процесс более безопасным.

4. Сохранность волокон: мягкие условия обработки позволяют получать волокно с улучшенными прочностными характеристиками.

5. Гибкость параметров: технология допускает регулирование времени отстаивания и концентрации реагентов, что облегчает ее адаптацию к различному сырью.

Вместе с тем метод имеет и определенные ограничения:

– продолжительность процесса может достигать 92 часов, что снижает производительность и требует больших производственных площадей;

– значительный расход воды обуславливает необходимость систем очистки и рециркуляции;

– получаемая целлюлоза сохраняет относительно высокую зольность, что ограничивает ее применение для некоторых видов бумажной продукции.

Таким образом, технология сочетает ряд конкурентных преимуществ с задачами, требующими дальнейшей оптимизации для промышленного внедрения.

Нами предлагается технология сульфатного отстаивания – щадящий щелочной процесс, проводимый при атмосферном давлении и низких температурах (25–60 °С) [1, 2, 6, 8, 13].

Предварительные эксперименты показали возможность получения целлюлозы с выходом 93–66 % и зольностью 6,4–8,7 % [11].

Целью данного исследования является оптимизация предлагаемого более мягкого и эффективного метода делигнификации рисовой соломы.

Материалом для исследований является рисовая солома урожая 2020 года, выращена в Ферганской долине, Республика Узбекистан. Хранение осуществлялось в полевых условиях в сельскохозяйственных амбарах. Для эксперимента отбирали образцы соломы в воздушно-сухом состоянии.

Для проведения процесса отстаивания использовали сухие и разрезанные по 12–20 мм стебли рисовой соломы. После термической обработки исследуемую массу перекладывали на сито, которая в дальнейшем подвергалась диспергированию с помощью воды. Полученный волокнистый материал снова промывали водой до нейтральной среды, просеивали, истирали, высушивали и взвешивали.

Фотографии сырья и полученного продукта представлены на рисунке 1.

В работе использовали двухфакторный эксперимент. В качестве делигнифицирующего реагента использовали раствор состава $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{Na}_2\text{CO}_3$ (2:1:1). Постоянные условия: гидромодуль – 4, температура делигнификации – 25 °С.

В качестве переменных факторов были выбраны:

X_1 – концентрация реагентов в реакционном растворе, % от массы абсолютно сухого сырья;

X_2 – продолжительность замачивания (включая заключительное замачивание в горячей воде), ч.



a



б

Рисунок 1 – Исходные образцы соломы и полученного продукта

У готового продукта определяли общий выход и зольность. Матрица планирования эксперимента и полученные результаты приведены в таблице 1.

При обработке результатов эксперимента получены уравнения: регрессионное – для выхода продукта (Y_1) и зольности продукта (Y_2) в виде полинома второго порядка:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2,$$

где X_1, X_2 – варьируемые факторы в натуральных значениях (см. табл. 1).

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента и результаты реализации

№ экспе- римен- та	Факторы				Выходные параметры	
	в кодированной форме		в натуральной форме		выход волокнистого продукта, %	зольность, %
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y_1	Y_1
1	–1	–1	5	24	93,1	8,98
2	–1	0	5	72	84,0	8,44
3	–1	1	5	120	75,7	7,43
4	0	–1	15	24	87,4	8,56
5	0	0	15	72	75,6	7,72
6	0	1	15	120	66,6	6,41
7	1	–1	25	24	82,1	8,12
8	1	0	25	72	72,7	6,91
9	1	1	25	120	66,2	6,41

Коэффициенты уравнения регрессии b_{ij} , коэффициент множественной корреляции r и средняя относительная погрешность аппроксимации δ представлены в таблице 2. Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера, модели адекватны.

Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение концентрации реагентов и времени замачивания приводит к снижению выхода волокнистого продукта и росту его зольности.

Таблица 2 – Коэффициенты уравнений регрессии и показатели качества моделей

Y_i	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	r	$\delta, \%$
Y_1	106,04	–1,316	–0,267	0,0008	0,0243	0,0005	0,995	0,92
Y_2	9,96	–0,096	–0,0151	–0,0001	0,0015	0,00002	0,983	2,00

По уравнениям регрессии рассчитаны поверхности отклика (рис. 2).

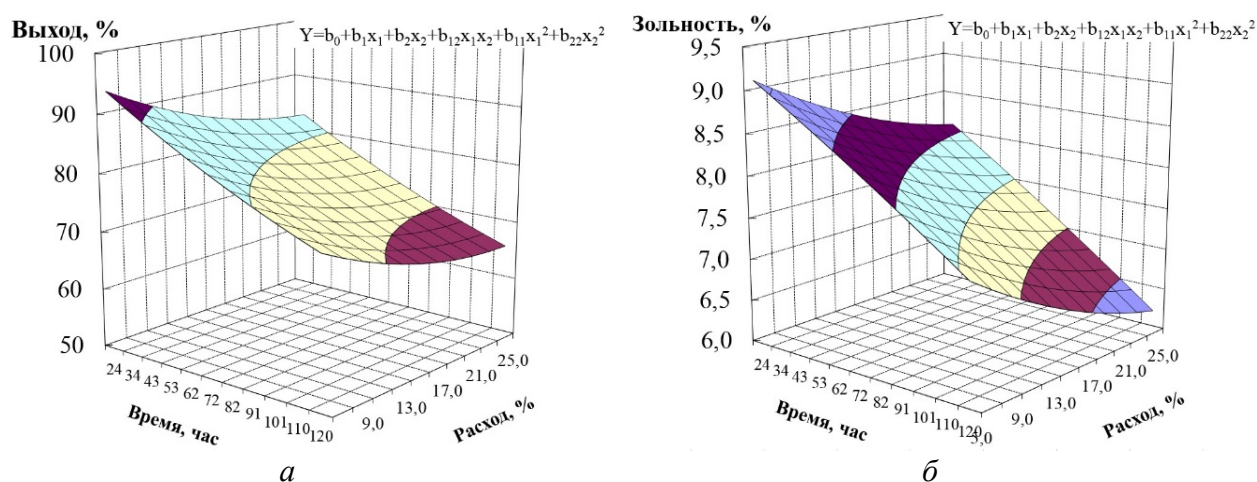


Рисунок 2 – Поверхности отклика, полученные в результате реализации эксперимента:
а – выход продукта; б – зольность продукта

На основании анализа установлено, что оптимальными параметрами процесса являются концентрация реагентов 14 % от массы абсолютно сухого сырья и продолжительность замачивания 92 часа. При данных условиях расчетный выход продукта составляет 71,8 %, а зольность – 7,4 %.

Среди различных методов переработки рисовой соломы для получения целлюлозной массы технология сульфатного замачивания выделяется рядом существенных преимуществ, делающих ее особенно перспективной в условиях необходимости повышения экологичности и экономической эффективности [3, 6, 10].

Внедрение разработанной технологии является стратегически важным для аграрных регионов с высокой долей рисоводства, таких как Республика Узбекистан [11, 12, 13]. Она способна заложить основу для создания устойчивых производств, решающих задачи утилизации сельскохозяйственных отходов и снижения нагрузки на лесные экосистемы.

Проведенный анализ показал высокий потенциал технологии сульфатного замачивания как альтернативного подхода к переработке рисовой соломы. Предварительные результаты и литературные данные подтверждают, что мягкие условия обработки позволяют сократить энергозатраты, минимизировать переход кремнезема в раствор и сохранить структуру волокон.

Вместе с тем технология требует дальнейшей оптимизации по таким параметрам, как продолжительность процесса и расход воды. Эти факторы могут влиять на промышленную применимость метода.

Будущие исследования будут направлены на уточнение оптимальных режимов замачивания, снижение зольности и разработку схем утилизации или повторного использования реагентов.

Вместе с тем метод характеризуется рядом ограничений, включая длительность процесса и относительно высокую зольность продукта. Для оценки промышленной применимости необходима дальнейшая оптимизация условий замачивания и разработка схем повторного использования реагентов и воды.

Таким образом, технология сульфатного замачивания представляет собой перспективное направление для целлюлозно-бумажной промышленности в регионах с ограниченными лесными ресурсами, включая Республику Узбекистан. Однако окончательные выводы о ее эффективности и масштабируемости могут быть сделаны только после проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Mukherjee A. Parametric optimization of delignification of rice straw // *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 116. P. 83–92.
2. Le Q.D., Ogawa Y., Harada H. Efficient pretreatment of Vietnamese rice straw by soda and sulfate cooking methods // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 178. P. 5–12.
3. Kaur D., Arora S., Sharma R. Prospects of rice straw as a raw material for paper making // *Waste Management*. 2017. Vol. 60. P. 127–139.
4. Goodman B.A., Pascual C. Utilization of waste straw and husks from rice production // *Cleaner Engineering and Technology*. 2020. Vol. 1. Article 100010.
5. Tsegaye B., Balomajumder C., Roy P. Bidelignification and hydrolysis of rice straw by novel bacteria // *Biotechnology for Biofuels*. 2018. Vol. 11. P. 213.
6. Aggarwal N., Gupta R., Singh A. An efficient approach toward the production of cellulose from rice straw // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, no. 42. P. 28150–28158.
7. Li P., Wang J., Liu H. Development of raw materials and technology for pulping // *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 18. Article 3799.
8. Rodríguez A., Moral A., Serrano L. Rice straw pulp obtained by using various methods // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 8. P. 2881–2886.
9. Worku L.A., Feleke S., Bekele T. Agricultural residues as raw materials for pulp and paper // *International Journal of Environmental Science*. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 45–58.
10. Islam M., Zaman M., Rahman A. Rice straw as a source of nanocellulose for sustainable food packaging materials: a review // *BioResources*. 2022. Vol. 17, no. 3. P. 4231–4256.
11. Урозова, Д. Д. Получение бумажной массы из рисовой соломы энергоэффективным методом / Д. Д. Урозова, Я. В. Казаков // *Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов*: матер. VIII Междунар. науч.-техн. конф. имени профессора В.И. Комарова (Архангельск, 11–11 сентября 2025 г.). Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: САФУ, 2025. – С. 316-320.
12. Урозова Д.Д., Халипаева С.И., Мамаджанов И.Б. Исследование влияния функциональных добавок на прочность гипсового камня, дисперсно-армированного синтетическим волокном / Д. Д. Урозова, С. И. Халипаева, И. Б. Мамаджанов // *Проблемы современной науки и образования*. – 2019. – №12 (145) ч.1. – С. 36 - 38.
13. Урозова, Д.Д., Карабаева М.И., Мирзаолимов А.Н. Изучение процесса получения вторичной целлюлозы из стеблей ячменя / Д. Д. Урозова, М. И. Карабаева, А. Н. Мирзаолимов // *Universum. Технические науки: электронный научный журнал*. – 2020. – № 12(81). С. 54-56.

OPTIMIZATION OF RICE STRAW PROCESSING TECHNOLOGY AND OBTAINING PAPER PULP

D. D. Urozo^a*, Ya. V. Kazakov

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russian Federation*

**E-mail: durdonakhonurozo^a@gmail.com*

Abstract. The article examines the problem of rice straw utilization — an agricultural byproduct that is burned in large quantities, creating an environmental burden. A promising direction is its processing into cellulose fiber for the pulp and paper industry. However, traditional soda and sulfate methods require significant energy consumption, are accompanied by active dissolution of silica, and deteriorate the quality of the product.

As an alternative, it is proposed to consider the technology of sulfate soaking carried out at atmospheric pressure and low temperatures. The study is aimed at selecting and optimizing the conditions for delignification of rice straw. The variable factors studied include the concentration of the alkaline reagent ($\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{Na}_2\text{CO}_3 = 2:1:1$) and the duration of the process.

Based on the results, rational parameters of the process were established, ensuring the production of a fibrous product with increased yield and reduced ash content. It is assumed that the application of this technology will contribute to reducing energy consumption, minimizing the transition of silica into the solution, increasing environmental friendliness, and preserving the fiber structure.

Thus, the conducted research is aimed at substantiating the efficiency of the sulfate soaking technology and assessing its prospects for the pulp and paper industry, especially in regions with limited forest resources, such as Uzbekistan.

Keywords: rice straw, cellulose fiber, delignification, sulfate soaking, alkaline reagents, ash content, energy efficiency, environmental friendliness.

References

1. Mukherjee A. Parametric optimization of delignification of rice straw // *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 116. P. 83–92.
2. Le Q.D., Ogawa Y., Harada H. Efficient pretreatment of Vietnamese rice straw by soda and sulfate cooking methods // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 178. P. 5–12.
3. Kaur D., Arora S., Sharma R. Prospects of rice straw as a raw material for paper making // *Waste Management*. 2017. Vol. 60. P. 127–139.
4. Goodman B.A., Pascual C. Utilization of waste straw and husks from rice production // *Cleaner Engineering and Technology*. 2020. Vol. 1. Article 100010.
5. Tsegaye B., Balomajumder C., Roy P. Biodelignification and hydrolysis of rice straw by novel bacteria // *Biotechnology for Biofuels*. 2018. Vol. 11. P. 213.
6. Aggarwal N., Gupta R., Singh A. An efficient approach toward the production of cellulose from rice straw // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, no. 42. P. 28150–28158.
7. Li P., Wang J., Liu H. Development of raw materials and technology for pulping // *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 18. Article 3799.
8. Rodríguez A., Moral A., Serrano L. Rice straw pulp obtained by using various methods // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 8. P. 2881–2886.
9. Worku L.A., Feleke S., Bekele T. Agricultural residues as raw materials for pulp and paper // *International Journal of Environmental Science*. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 45–58.
10. Islam M., Zaman M., Rahman A. Rice straw as a source of nanocellulose for sustainable food packaging materials: a review // *BioResources*. 2022. Vol. 17, no. 3. P. 4231–4256.
11. Urozova D.D., Kazakov Ya.V. Obtaining paper pulp from rice straw by an energy-efficient method / In the collection “Problems of Mechanics of Pulp and Paper Materials”: Proc. VIII Int. sci.-tech. conf. named after professor V.I. Komarova (Arkhangelsk, September 11–11, 2025). Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk: NArFU, 2025. Pp. 316–320.
12. Urozova D.D., Khalipaeva S.I., Mamadzhanov I.B. Study of the Influence of Functional Additives on the Strength of Gypsum Stone Dispersion-Reinforced with Synthetic Fiber 2019 / *Problems of Modern Science and Education*. Pp. 36 - 38.
13. Urozova D.D., Karabaeva M.I., Mirzaolimov A.N. Study of the Process of Obtaining Secondary Cellulose from Barley Stems // *Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal*. 2020. 12(81). Pp. 54-56.

Раздел 2. УСЛОВИЯ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 332.1, 330.15
ГРНТИ 82

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И УСЛОВИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (НДТ) ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ КАРЬЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ V КЛАССА ОПАСНОСТИ

М. В. Васильев, А. Н. Назарова*

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: spb.anna.nazarova@yandex.ru*

Аннотация. Статья посвящена ряду вопросов, связанных с рекультивацией отработанных карьеров, которая, в свою очередь, является критически важной задачей восстановления нарушенных земель. Применение отходов V класса опасности (практически неопасных) в качестве техногенного грунта для заполнения выемок представляет значительный экологический и экономический интерес. Однако эффективность и долгосрочная безопасность такого подхода напрямую зависят от использования научно обоснованных методов и технологий. Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) признано ключевым инструментом обеспечения экологической безопасности и ресурсосбережения в данной сфере, но требует четкого методологического обоснования и выявления комплекса условий для успешной реализации.

Ключевые слова: рекультивация отработанных карьеров, химический анализ тяжелых металлов, наилучшие доступные технологии, предельно допустимая концентрация, техногенный грунт, отходы V класса опасности, продукт «Экосмесь».

Восстановление нарушенных промышленных ландшафтов, в частности, рекультивация отработанных карьеров, является приоритетным для устойчивого природопользования.

Интеграция отходов низкого (V) класса опасности, характеризующихся минимальным эколого-токсикологическим воздействием, в качестве вторичного материала для формирования техногенных грунтов и заполнения пустот горного отвода, сопряжена с существенными экономическими выгодами и положительным экологическим эффектом. Однако оптимизация данного процесса и минимизация долгосрочных рисков неразрывно связаны с необходимостью внедрения методов, основанных на принципах научного обоснования.

Так, при оценке (в том числе прогнозной) уровня токсичности того или иного загрязнителя следует делать расчеты с учетом ландшафтных, почвенных и иных условий. Рассмотрим подробнее технологию анализа тяжелых металлов при рекультивации отработанных карьеров, в частности.

Во-первых, идет этап изысканий, включающий в себя определение типа грунтов, химический анализ тяжелых металлов (валовой и подвижной форм), морфологию, pH, пористость. Для этого производится бурение скважин с отбором проб, картирование по зонам (в зависимости от типа и степени загрязнённости, натурные и лабораторные исследования). Биотестирование (определение токсичности грунта) – как показатель не является главным, более того, очень неточный. Есть работы, которые об этом говорят. Главным критерием минимизации воздействия на окружающую среду должен быть химический анализ грунтов, который является наиболее показательным, важным и точным [2].

К одним из наилучших доступных технологий для экспресс-анализа тяжелых металлов на сегодняшний день можно отнести базовый прибор – анализатор тяжелых металлов почвы TrueX 700/TrueX 760 или аналог, который позволяет в течение 3–7 мин. определить требуемые

показатели, такие как, например, содержание тяжелых металлов. Доизучение грунтов в случае существенного их превышения по предельно допустимой концентрации (ПДК) возможно далее в лабораторных условиях. Пример результатов анализа тяжелых металлов представлен ниже (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение результатов испытаний для пробы 1 с ПДК и нормативами из технических условий (ТУ), изм. 2 [3]

Показатели, отобранные для 1 пробы (не нормируются в ТУ)	Результаты испытаний по протоколу	ПДК			Превышение ПДК
		pH 4,0	pH = 5,1-6,0	pH >=6,0	
pH солевой вытяжки	6,94				
Подвижные формы, мг/кг:					
кобальта	2,3		5,0		Нет
марганца	230	300	400	500	Нет
меди	6,3		3		В 2,1 раза
никеля	2,3		4		Нет
свинца	5,9		6		Нет
цинка	6,6		23		Нет
хрома	1,4		6		Нет

Как видно из приведенной таблицы, данный грунт нельзя использовать в качестве рекультиванта, поскольку он не соответствует требованиям ТУ «Экосмесь», как и ПДК. Таким образом, формируется задача обезвредить его и снизить содержание тяжелых металлов.

Таким образом, после детального анализа грунта (еще на стадии котлована) в ходе проектно-изыскательских работ определяется способ обезвреживания и методология его реализации.

Так, например, если выявлено превышение по меди и свинца в изучаемом грунте, то добавляются в требуемых пропорциях известковая мука и чистый (незагрязненный) грунт. То есть, к наилучшим доступным технологиям для снижения концентраций тяжелых металлов в грунте может быть разбавление его более чистым в требуемых концентрациях. Технология смешивания/разбавления представлена в Технологическом регламенте производства продукта «Экосмесь». После заверки грунта анализатором, что он стал соответствовать требованиям ТУ и ПДК, далее вывозится с площадки на карьер в качестве «Экосмеси».

Для более детального анализа рассматриваемых вопросов проанализируем профильную деятельность ООО «СК «Модуль», которое ведет разработку месторождения песков «Залесье» в Ломоносовском районе Ленинградской области на основании лицензии ЛОД 47264 ТР от 20.02.2016 г. Согласно требованиям лицензионного соглашения (пункт (з) лицензии ЛОД 47264 ТР), недропользователь обязан выполнить работы по рекультивации выработанного пространства карьера.

Основной задачей рекультивации является возвращение в хозяйственный оборот земель, нарушенных ранее горными работами.

Категория нарушенных земель, подлежащих рекультивации, – земли лесного фонда.

Направление рекультивации нарушенных земель определено как лесохозяйственное на основании Технических условий на рекультивацию лесного участка, выданных правообладателем – Комитетом по природным ресурсам Ленинградской области.

Направление рекультивации выбирается по результатам анализа природных условий территории и района работ, обобщенных данных ландшафтных и экологических данных с учетом категории земель в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59060-2020.

Работы по рекультивации выработанного пространства карьера «Залесье» проводятся поэтапно и последовательно.

На первом этапе осуществляется горнотехническая рекультивация, основной целью которой является создание благоприятных условий для посадки саженцев лесных культур и реализации второго этапа рекультивации – биологического.

1. Горнотехнический этап рекультивации включает в себя:

- демонтаж временных сооружений, технологического оборудования, инженерных сетей и их вывоз с территории месторождения;
- заполнение отработанной части карьера продуктом «Экосмесь» до уровня поверхности земли для восстановления естественного ландшафта;
- равномерное планирование территории нарушенного земельного участка;
- нанесение плодородного слоя почвы за счет складирования вскрышных пород и продукта «Экосмесь»;
- мелиоративная подготовка, прокладка водоотводящих канав;
- противоэрозионная организация территории;
- организация противопожарных мероприятий.

2. Биологический этап рекультивации:

- подготовка почвы;
- посадка лесных культур сеянцами сосны ОКС;
- уход за лесными культурами.

Нарушенные земли после добычи всех балансовых запасов представляют собой котлован, глубина выработок составляет от 1-го до 8-ми метров, частично обводнены, подстилающими породами являются глины и суглинки.

На первом этапе рекультивации осуществляется планирование откосов бортов карьера и постановка их в конечное положение, обеспечив тем самым их устойчивость, нивелируются все неровности дна карьера из-за особенностей залегания полезной толщи.

Собственных вскрышных пород для рекультивации карьера недостаточно ввиду особенностей залегания полезной толщи. Для подъема участка и формирования рельефа выше уровня грунтовых вод возникла необходимость в дополнительных грунтах, которые обеспечат оптимальные условия для произрастания лесных культур и при этом не нанесут вред окружающей среде.

Проект рекультивации предусматривает использование технологии, обеспечивающей производство продукции «Экосмесь», соответствующей ТУ 23.99.19-001-35758845-2019 (со всеми изменениями) экологическим требованиям, и позволяет минимизировать воздействие горных работ на окружающую среду [1].

Технология производства продукта «Экосмесь» для рекультивации карьера «Залесье» принята в соответствии с Технологическим регламентом «Технология производства продукта «Экосмесь» на основе отходов грунтов 5 класса и вскрышных пород».

По завершению планировочных, мелиоративных и противопожарных мероприятий наносится плодородный слой, обеспечивающий благоприятные условия для роста и приживаемости лесных культур, в рамках биологического этапа рекультивации. В качестве плодородного слоя используются как собственно вскрышные породы, представленные почвенно-растительным слоем, и селективно снятые для целей рекультивации еще до начала добычных работ, так и продукт «Экосмесь». Мощность плодородного слоя составляет не менее 0,3 м.

Карьер по завершению работ по нанесению на спланированную поверхность почвенного растительного слоя (завершения горнотехнического этапа) представлен на рисунке 1 (см. ниже).

После завершения горнотехнического этапа рекультивации приступают к биологическому этапу, при котором выполняются следующие основные работы:

- подготовка почвы под посадку лесных культур;
- посадка лесных культур сеянцами сосны ОКС;

- уход за лесными культурами.

Под подготовкой почв под лесные культуры понимается обработка почвы под посадку и посев леса с целью обеспечения оптимальных условий для приживаемости, роста культур и возможность комплексной механизации процесса лесовосстановления.



Рисунок 1 – Карьер по завершению горнотехнического этапа рекультивации

Подготовка почвы плужными бороздами осуществляется плугами ПКЛ-70 и ТДТ 55. При посадке в дно борозды обработка почвы выполняется одновременно с посадкой. Расстояние между центрами борозд составляет от 3,0 до 5 м. Глубина обработки почвы составляет 20–30 см.

За весенний период после нанесения почвенно-растительного слоя создаются благоприятные условия для посадки лесных культур.

Остановимся подробнее на таком важном этапе, как посадка лесных культур. Для Ломоносовского лесничества основной лесобразующей древесной породой является сосна обыкновенная, которая предпочтительна для посадки на песчаных почвах. Посадка лесных культур проводится в весенне-осенний период.

Схема размещения посадочных мест на участке, определяющая густоту лесных культур, составляет при ширине междурядий, в зависимости от типа лесорастительных условий, 3,0–5,0 м, шаг посадки от 0,7 до 1,1 м.

В качестве посадочного материала используются двух-трехлетние сеянцы сосны с открытой корневой системой, в количестве не менее 3,0 тыс. шт./га. Схема смешения пород – чистая, 10С С-С-С.

Способ лесоразведения – посадка вручную под меч «Колесова». По периметру участка с лесными культурами создается минерализованная полоса шириной не менее 1,5 м. После посадки (при необходимости) проектируются дополнения лесных культур (посадка взамен погибших сеянцев).



Рисунок 2 – Лесной участок по завершению биологической рекультивации

Под уходом за лесными культурами подразумевается уход за почвой культур до их смыкания. Такой уход проводят в первые годы жизни. Он заключается в рыхлении почвы и прополке травянистой растительности. Почву в рядах междурядий рыхлят на глубину 6–14 см. Число уходов зависит от почвенно-климатических условий, биологических особенностей древесных и кустарниковых пород, возраста посадочного материала и ширины междурядий, определяющих сроки смыкания лесных культур.

При частичной обработке почвы п-бороздами для обработки междурядий применяют культиваторы типа ДЛКН- 6.

Для сосны важно достаточное количество влаги в засушливый период. Поэтому желательно поливать ее два раза в неделю, выливая под каждое деревце по ведру воды, а для сосны в возрасте от двух до пяти лет – по два ведра. Взрослое растение достаточно полить один раз за лето, однако при этом объем воды увеличивается в два раза. Вода должна проникать на глубину не менее 30–40 см, где находятся основные корни растения. Рекомендуются организовать вокруг ствола небольшой валик из земли, выливать воду медленно, небольшими порциями.

При необходимости также необходимо осуществлять подкормку готовыми азотосодержащими удобрениями.

Остановимся подробнее на экономической составляющей применения отходов V класса опасности (практически неопасных) в качестве техногенного грунта для заполнения выемок. Так, общий объем грунта, требуемый для рекультивации карьера в соответствии с проектными параметрами, составляет 21,3 млн м³, из них объем собственных вскрышных пород месторождения составляет 1,0 млн м³. Дополнительный (требуемый) объем составит 20,3 млн м³ соответственно.

При средней стоимости грунта с учетом доставки на карьер не менее 500 руб./м³ прямые затраты недропользователя составят 10150 млн рублей.

Балансовые запасы песка на месторождении «Залесье» на момент проектирования составляют 15,1 млн м³. При средней отпускной стоимости песка с месторождения «Залесье», равной 230 руб./м³, выручка составит 3473 млн рублей соответственно.

Таким образом, затраты на приобретение дополнительного объема грунта, требуемого для рекультивации карьера, значительно превышают выручку от реализации песка, что делает нецелесообразным дальнейшую эксплуатацию месторождения, в том числе проведение рекультивационных работ уже нарушенных земель.

Учитывая экологическую значимость именно лесохозяйственного направления рекультивации на данной территории и формирование естественных ландшафтов и сохранение компонентов окружающей среды и экосистем, наиболее приближенным к естественным, предлагается использовать для рекультивации, помимо собственных вскрышных пород, грунты сторонних организаций 5 класса опасности с последующей их обработкой и утилизацией в соответствии с Технологическим регламентом, с целью получения продукта «Экосмесь» (ТУ 23.99.19-001-35758845-2019) [1].

Это позволит повысить экономическую целесообразность проекта при соблюдении экологических требований и, в конечном счете, реализовать лесохозяйственное направление рекультивации карьера «Залесье».

Список литературы

1. ТУ 23.99.19-001-35758845-2019. Введен 30.03.2021 в ООО «Строительная компания «Модуль».
2. Патентные документы RU 2014148386А Способ мелиорации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами / Леднев А.В., Ложкин А. В. Заявка от 01.12.2014 подана Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Удмуртский научно-исследовательский институт сельского хозяйства». Дата публикации: 16.03.2023. Правообладатель ООО «Ремедиа».

3. Дубовик, В. А. Приемы и механизм снижения загрязнения почв / В. А. Дубовик // Садоводство и виноградарство. 2011. – № 6. – С. 11-12.

**METHODOLOGICAL FOUNDATIONS AND IMPLEMENTATION CONDITIONS FOR
BEST AVAILABLE TECHNIQUES (BAT) IN QUARRY RECLAMATION USING CLASS V
NON-HAZARDOUS WASTE**

M. V. Vasiliev, A. N. Nazarova*

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: spb.anna.nazarova@yandex.ru*

Abstract. The article addresses a range of issues related to the reclamation of worked-out quarries, which is, in turn, a critically important task for the restoration of disturbed lands. The use of Class V (practically non-hazardous) waste as technogenic soil for backfilling excavations is of significant environmental and economic interest. However, the effectiveness and long-term safety of this approach directly depend on the application of scientifically sound methods and technologies. The implementation of best available techniques is recognized as a key tool for ensuring environmental safety and resource conservation in this field, but it requires clear methodological justification and the identification of a set of conditions for successful implementation.

Keywords: quarry reclamation / Mining site reclamation; chemical analysis of heavy metals; Best available techniques; maximum allowable concentration; Technogenic soil; Class V (low-hazard) waste; "Ekosmes" product.

References

1. TU 23.99.19-001-35758845-2019 (Note: "ТУ" is a Russian standard for "Technical Specifications" or "Technical Conditions"). 30.03.2021.
2. Patent document RU 2014148386A Method for reclamation of soils contaminated WITH heavy metals / Lednev A.V., Lozhkin A.V.
3. Dubovik, V.A. Techniques and mechanism of soil pollution reduction / V.A. Dubovik // Horticulture and Viticulture. 2011. No. 6. Pp. 11-12.

ИНТЕГРАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОГО АУТСОРСИНГА В СТРАТЕГИЮ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ, БАРЬЕРЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

С. Ю. Ившин

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: s.ivshin@internet.ru

Аннотация. В условиях усиления требований к экологичности и энергоэффективности производства предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) России обращаются к стратегии внедрения наилучших доступных технологий (НДТ). Одним из стратегически значимых, но недостаточно исследованных ресурсов для достижения показателей НДТ выступает логистический аутсорсинг. В статье рассматриваются возможности привлечения 3PL/4PL-операторов для оптимизации процессов снабжения, транспортировки и утилизации отходов, а также повышения прозрачности цепей поставок. Исследуется интеграция логистического аутсорсинга в стратегию внедрения НДТ на предприятиях ЦБП. Актуальность обусловлена необходимостью выполнения требований Федерального закона № 219-ФЗ и растущими экологическими штрафами. Установлено, что интеграция позволяет снизить логистические издержки на 15–25 % и углеродный след на 20–30 %. Выявлены организационные, технологические и экономические барьеры внедрения. Предложены практические механизмы их преодоления.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажная промышленность, НДТ, логистический аутсорсинг, зеленая логистика, углеродный след, транспортная оптимизация, экологическая эффективность.

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) России занимает значимое место в структуре промышленного производства, однако остается одной из наиболее ресурсоемких и экологически нагрузочных отраслей. Согласно данным Росстата [7], в 2023 году на долю ЦБП приходилось около 4,5 % промышленных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и 3,8 % сброса загрязненных сточных вод. Образование отходов производства достигло 1,2 млн тонн, при этом уровень их утилизации не превышал 40 %, что указывает на недостаточную эффективность существующих систем переработки и вторичного использования ресурсов.

В условиях растущих экологических штрафов (общая сумма по отрасли превысила 2,8 млрд руб. в 2023 году) [5], предприятия ЦБП столкнулись с необходимостью комплексного пересмотра подходов к модернизации производства. Традиционно основные инвестиции направляются на обновление технологического оборудования, однако потенциал логистической оптимизации остается недооцененным. Предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) России сталкиваются с необходимостью системного внедрения наилучших доступных технологий (НДТ), предусмотренных Федеральным законом № 219-ФЗ [1]. Эта задача имеет как экологическое, так и экономическое измерение: достижение нормативных значений по снижению выбросов, рациональному использованию ресурсов и повышению энергоэффективности требует не только модернизации технологического оборудования, но и оптимизации смежных управленческих и логистических процессов. Одним из стратегически значимых и при этом пока недостаточно исследованных инструментов реализации данной стратегии выступает логистический аутсорсинг.

Привлечение внешних логистических операторов (3PL/4PL) открывает предприятиям ЦБП возможности для системной оптимизации цепей поставок, транспортировки сырья, хранения продукции и утилизации отходов. Согласно данным Минпромторга РФ, на долю

логистических издержек в ЦБП приходится в среднем до 22–25 % совокупных операционных затрат [7]. В условиях растущего давления со стороны требований по внедрению НДТ снижение этих затрат за счет интеграции аутсорсинговых решений может стать критическим фактором конкурентоспособности.

Логистическая составляющая в структуре себестоимости продукции ЦБП достигает порядка 15–20 %, при этом ее вклад в общий углеродный след производства составляет 25–30 % [3]. Это обусловлено значительными объемами перевозок сырья (древесная щепка, химикаты) и готовой продукции, а также низкой эффективностью использования транспортных средств.

Опыт европейских компаний показывает, что использование 3PL/4PL операторов позволяет сокращать выбросы CO₂ на 10–15 % за счет консолидации транспортных маршрутов и применения более экологичных транспортных средств [6]. В России подобные практики пока применяются фрагментарно, что обусловлено рядом барьеров: нормативной неопределенностью в сфере регулирования логистического аутсорсинга применительно к НДТ [1], слабой цифровизацией взаимодействия между промышленными предприятиями и логистическими операторами [2], а также опасениями предприятий по поводу снижения уровня внутреннего контроля над материальными потоками.

Особую актуальность приобретает вопрос интеграции логистического аутсорсинга в управление отходами ЦБП. По данным Росстата, ежегодный объем отходов производства целлюлозы и бумаги в России превышает 4,5 млн тонн [8]. Утилизация этой массы требует устойчивых схем взаимодействия между предприятиями и переработчиками, что возможно обеспечить только при системной поддержке профессиональных логистических операторов.

Эффективность интеграции логистического аутсорсинга в стратегию НДТ предприятий ЦБП представлена таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ эффективности логистических моделей в ЦБП России (2023 – 2024 гг.)

Показатель	Традиционная логистика (in-house)	Логистический аутсорсинг (3PL/4PL)	Эффект внедрения
Удельные логистические издержки, руб./т	1850–2200	1450–1650	Снижение на 15–25 %
Уровень использования подвижного состава, %	68–72	82–88	Рост на 14–20 п.п.
Доля интермодальных перевозок, %	15–20	35–45	Рост в 2–2,5 раза
Время доставки, дни	5–7	4–5	Сокращение на 20–30 %
Управляемость потоками отходов	Ограниченная, высокая нагрузка на складские мощности	Централизованное управление, возможность замкнутого цикла	Сокращение количества отходов, снижение стоимости сырья, снижение затрат
Углеродный след логистики, кг CO ₂ /т	48–52	35–40	Снижение на 20–30 %

Источник: составлено по данным [4, 7]

Как показывают данные таблицы 1, переход на логистический аутсорсинг позволяет достичь значительного улучшения как экономических, так и экологических показателей. По оценкам Ассоциации логистических компаний России [9], в 2024 году доля аутсорсинга в транспортной логистике ЦБП выросла до 42 %, что на 8 процентных пунктов выше показателя 2022 года.

Вместе с тем, внедрение аутсорсинговых схем в стратегию НДТ невозможно без учета барьеров. Ключевыми среди них выступают:

- Экономические – необходимость первоначальных затрат на трансформацию логистических процессов и интеграцию ИТ-систем;
- Организационные – сопротивление персонала изменениям и опасения потери контроля над материальными потоками;
- Технологические – недостаточный уровень цифровизации отрасли, препятствующий прозрачному взаимодействию с логистическими партнерами [3].

Впервые логистический аутсорсинг рассматривается как инструмент не только повышения экономической эффективности предприятий ЦБП, но и как структурный элемент стратегии перехода к НДТ. Это позволяет предложить новый интегративный подход, при котором экологическая модернизация производства и оптимизация логистических процессов рассматриваются как взаимодополняющие факторы устойчивого развития отрасли.

Таким образом, можно сделать вывод, что интеграция логистического аутсорсинга в стратегию внедрения НДТ на предприятиях ЦБП представляет собой перспективное направление, способное обеспечить снижение затрат, повышение экологической результативности и улучшение позиций на внутреннем и внешнем рынках. Несмотря на существующие барьеры, международный и российский опыт подтверждает высокую актуальность данных решений для долгосрочной устойчивости отрасли.

Ключевые преимущества интеграции:

1. Снижение экологической нагрузки:

- оптимизация маршрутов с использованием TMS-систем снижает пробег на 12–18 % [3];
- консолидация грузопотоков уменьшает количество рейсов на 15–20 %;
- перевод перевозок на железнодорожный транспорт снижает выбросы на 35–40 % по сравнению с автомобильным транспортом [5].

2. Экономическая эффективность:

- сокращение операционных затрат на 15–25 % [3];
- уменьшение капитальных вложений в логистическую инфраструктуру на 30–40 %;
- высвобождение средств для модернизации основных производств.

Внедрение цифровых платформ управления логистикой позволяет дополнительно снизить экологический след на 10–15 % за счет оптимизации складских операций и минимизации порожних пробегов.

Барьеры внедрения и пути их преодоления представлены на рисунке 1.

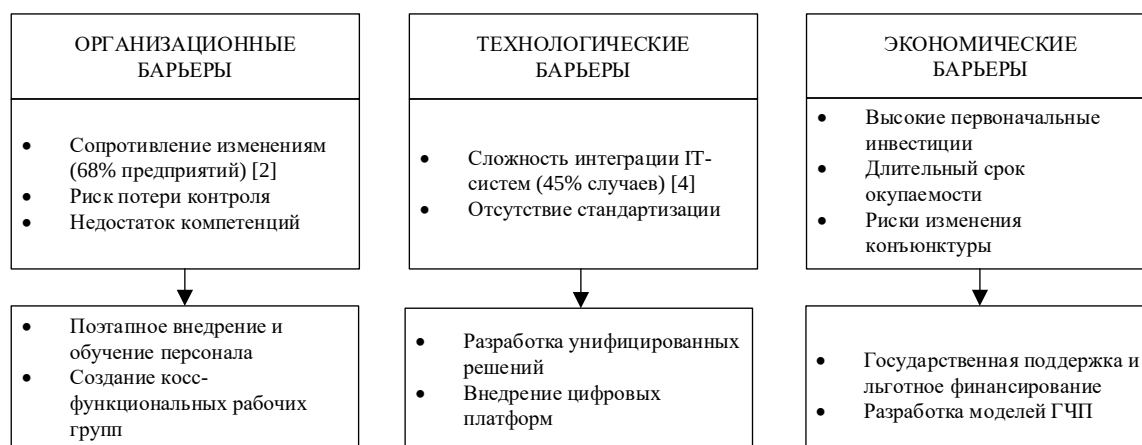


Рисунок 1 – Взаимосвязь барьеров внедрения и мер по их минимизации

Ключевым фактором успеха является формирование единого информационного пространства между предприятием и логистическим провайдером.

Разработанная модель интеграции включает 3 уровня:

- 1) стратегический уровень: согласование экологических и логистических KPI;
- 2) тактический уровень: создание совместных рабочих групп;
- 3) операционный уровень: внедрение цифровых платформ мониторинга.

На период до 2030 года можно выделить следующие перспективные направления [6]:

- цифровизация логистики: внедрение AI и IoT для предиктивной аналитики;
- развитие зеленой логистики: переход на электромобильный транспорт;
- государственная поддержка: субсидирование части затрат на внедрение НДТ.

По оценкам Минпромторга России [7], к 2030 году доля предприятий ЦБП, внедривших комплексные логистические решения в рамках НДТ, достигнет 65 %.

Традиционно основное внимание предприятий ЦБП в контексте модернизации уделяется техническому перевооружению производственных мощностей, включая обновление котельного и технологического оборудования, внедрение энергоэффективных систем сушки и отбеливания целлюлозы, совершенствование очистных сооружений [10]. Однако при этом логистическая составляющая остается в тени и воспринимается лишь как вспомогательная функция. Между тем ее значение в контексте устойчивого развития и внедрения НДТ весьма существенно.

Интеграция логистического аутсорсинга в стратегию внедрения НДТ позволяет рассматривать транспортную и складскую инфраструктуру предприятия как источник значительного экологического и экономического эффекта. В отличие от традиционного подхода, когда логистика воспринимается исключительно как инструмент снижения издержек, в рамках современной концепции зеленой экономики и циркулярного производства логистический аутсорсинг становится стратегическим элементом системы экологического менеджмента. Передача функций внешним провайдерам 3PL и 4PL позволяет предприятиям сосредоточиться на ключевых технологических процессах, одновременно повышая прозрачность цепей поставок и снижая углеродный след.

Таким образом, можно сделать вывод, что интеграция логистического аутсорсинга в стратегию внедрения НДТ на предприятиях ЦБП представляет собой перспективное направление, способное обеспечить снижение затрат, повышение экологической результативности и улучшение позиций на внутреннем и внешнем рынках. Несмотря на существующие барьеры, международный и российский опыт подтверждает высокую актуальность данных решений для долгосрочной устойчивости отрасли.

Список литературы

1. Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201407220028> (дата обращения: 03.09.2025).
2. Ившин, С. Ю. Анализ и перспективы развития искусственного интеллекта в логистике / С. Ю. Ившин // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика: материалы V Национальной научно-образовательной конференции. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 14–16 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2024. – С. 288-296.
3. Ившин, С. Ю. Логистический аутсорсинг в цепях поставок целлюлозно-бумажной продукции: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Ившин Станислав Юрьевич. – СПб., 2023. – 200 с.
4. Исследование внедрения НДТ в российской целлюлозно-бумажной промышленности. – М.: Ассоциация «Целлюлоза-Бумага», 2024. – 45 с. – Режим доступа: https://bumprom.ru/upload/iblock/e89/issledovanie_ndt_2024.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
5. Клименко, А. В. Оценка углеродного следа логистических цепочек в промышленности / А. В. Клименко, Д. С. Орлов // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28. – № 2. – С. 45–51. – Режим доступа: <https://www.ecologyandindustry.ru/ru/archive/2024/2/5> (дата обращения: 03.09.2025).
6. Михайлюк, М. В. Балансировка цепей поставок в постковидной фазе развития сегментов целлюлозно-бумажной продукции: от аутсорсинга доставки к вертикальной интеграции отраслевых цепочек создания стоимости / М. В. Михайлюк, С. Ю. Ившин // Экономические науки. – 2021. – № 205. – С. 75-81. – DOI 10.14451/1.205.75.
7. Обзор состояния целлюлозно-бумажной промышленности РФ за 2023 год. – М.: Минпромторг России, 2024. – 89 с. – Режим доступа: https://minpromtorg.gov.ru/upload/iblock/9c5/obzor_cbp_2023.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
8. Основные показатели охраны окружающей среды. – М.: Росстат, 2024. – 124 с. – Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxrana_okruzh_2024.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
9. Отчет о развитии рынка логистического аутсорсинга в России. – М.: Ассоциация логистических компаний России, 2024. – 78 с. – Режим доступа: https://aclr.ru/upload/iblock/7a3/otchet_rynok_logistiki_2024.pdf (дата обращения: 03.09.2025).
10. Тищенко, И. А. Лесопромышленный комплекс России: санкции и логистика как триггеры деформации экспортно-ориентированной модели отрасли / И. А. Тищенко, А. В. Павлюкова, С. Ю. Ившин. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. – 144 с.

INTEGRATION OF LOGISTICS OUTSOURCING INTO THE STRATEGY OF IMPLEMENTING BEST AVAILABLE TECHNIQUES IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY: EFFICIENCY, BARRIERS, PROSPECTS

S.Yu. Ivshin

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: s.ivshin@internet.ru

Abstract. Under the tightening requirements for environmental sustainability and energy efficiency, enterprises of the Russian pulp and paper industry (PPI) are increasingly turning to the

strategy of implementing Best Available Techniques (BAT). One of the strategically important, but insufficiently studied, resources for achieving BAT performance indicators is logistics outsourcing. The article examines the potential of involving 3PL/4PL operators to optimize procurement, transportation, and waste management processes, as well as to increase supply chain transparency. The study explores the integration of logistics outsourcing into the strategy of BAT implementation at PPI enterprises. The relevance of the research is determined by the necessity of complying with Federal Law No. 219-FZ and the growing environmental penalties. It was found that integration makes it possible to reduce logistics costs by 15–25% and the carbon footprint by 20–30%. Organizational, technological, and economic barriers to implementation were identified. Practical mechanisms for overcoming them are proposed.

Keywords: pulp and paper industry, BAT, logistics outsourcing, green logistics, carbon footprint, transport optimization, environmental efficiency.

References

1. Federal Law of July 21, 2014 No. 219-FZ “On Amendments to the Federal Law ‘On Environmental Protection’ and Certain Legislative Acts of the Russian Federation” [Electronic resource]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201407220028> (accessed: 03.09.2025). (In Russian).
2. Ivshin, S. Yu. Analysis and Prospects for the Development of Artificial Intelligence in Logistics S. Yu. Ivshin Logistics: Foresight Studies, Profession, Practice: Proceedings of the 5th National Scientific and Educational Conference. In 2 parts, St. Petersburg, October 14–16, 2024. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics, 2024. P. 288-296. (In Russian).
3. Ivshin, S. Yu. Logistics Outsourcing in Supply Chains of Pulp and Paper Products: Dissertation for the Degree of Candidate of Economic Sciences Stanislav Yurievich Ivshin, 2023. 200 p.
4. Klimenko, A. V., Orlov, D. S. Assessment of the Carbon Footprint of Industrial Logistics Chains *Ecology and Industry of Russia*. 2024. Vol. 28. No. 2. P. 45-51. Available at: <https://www.ecologyandindustry.ru/ru/archive/2024/2/5> (accessed: 03.09.2025). (In Russian).
5. Mikhailyuk, M. V. Balancing Supply Chains in the Post-COVID Phase of the Pulp and Paper Segments: From Delivery Outsourcing to Vertical Integration of Industry Value Chains M. V. Mikhailyuk, S. Yu. Ivshin Economic Sciences. 2021. No. 205. P. 75-81. DOI 10.14451/1.205.75. (In Russian).
6. Review of the State of the Pulp and Paper Industry of the Russian Federation for 2023. Moscow: Ministry of Industry and Trade of Russia, 2024. 89 p. Available at: https://minpromtorg.gov.ru/upload/iblock/9c5/obzor_cbp_2023.pdf (accessed: 03.09.2025). (In Russian).
7. Key Environmental Protection Indicators. Moscow: Rosstat, 2024. 124 p. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxrana_okruzh_2024.pdf (accessed: 03.09.2025). (In Russian).
8. Report on the Development of the Logistics Outsourcing Market in Russia. Moscow: Association of Logistics Companies of Russia, 2024. 78 p. Available at: https://aclr.ru/upload/iblock/7a3/otchet_rynok_logistiki_2024.pdf (accessed: 03.09.2025). (In Russian).
9. Report on the Digitalization of Transport Logistics. Moscow: National Association of Digital Transport, 2024. 67 p. Available at: https://nact.ru/upload/iblock/d45/tsifrovizatsiya_transporta_2024.pdf (accessed: 03.09.2025). (In Russian).
10. Tishchenko, I. A. Russia’s Timber Industry Complex: Sanctions and Logistics as Triggers of Deformation of the Export-Oriented Industry Model I. A. Tishchenko, A. V. Pavlyukova, S. Yu. Ivshin. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2024. 144 p. (In Russian).

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ФАНЕРЫ

Б. М. Шифрин*, Н. А. Иванов, И. К. Лисовский, Д. В. Калимуллин

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: shifrinb@mail.ru*

Аннотация. В таком непростом деле, как производство фанеры, этап горячего прессования является одним из важнейших, ведь именно он непосредственно определяет ключевые эксплуатационные характеристики готового продукта, такие как: прочность клееного шва (соответствующую требованиям ГОСТ 3916.1-96 или EN 314-1), геометрическую стабильность и отсутствие дефектов, таких как расслоение или термический «пережог» поверхности. От точности управления параметрами данного процесса напрямую зависит конечное качество фанеры, а также экономическая эффективность всего производства. Именно поэтому для надежности протекания этапа горячей прессовки стоит рассмотреть внедрение нечеткой логики с целью минимизации брака в условиях неопределенности и неполноты данных. Ее ключевое преимущество – возможность формализации качественных экспертных знаний и лингвистических правил вида «ЕСЛИ... ТО...» для управления сложными, плохо формализуемыми традиционными процессами.

Ключевые слова: горячее прессование, нечеткая логика, фаззификация, дефаззификация.

Процесс обеспечения стабильного качества на этапе горячего прессования сталкивается со значительными технологическими трудностями [1, 2]. Внедрение нечеткой логики позволит повысить точность данного этапа, решив следующие проблемы.

1. Высокая изменчивость свойств сырья. Влажность поступающего шпона может отклоняться от нормы на $\pm 7\%$, а плотность на $\pm 15\%$ в пределах одной партии. Нестабильность состава и вязкости клеевых систем (например, карбамидоформальдегидных или фенолформальдегидных) добавляет дополнительный уровень неопределенности.

2. Сложность и нелинейность процессов. Зависимости между управляющими параметрами (температура плит пресса обычно 110–150 °С; давление: 1,2–1,8 МПа; время выдержки 3–15 минут) и выходными характеристиками фанеры (прочность шва, влажность, отсутствие дефектов) являются высоко нелинейными и взаимосвязанными. Незначительное отклонение даже одного параметра при определенных условиях сырья может привести к резкому ухудшению качества [3].

3. Неэффективность традиционных методов управления. Жесткие алгоритмы и классические ПИД-регуляторы, широко применяемые в АСУ ТП, оказываются плохо приспособленными для компенсации значительных вариаций входных параметров сырья. Они не могут адекватно учитывать качественные экспертные знания технологов («если шпон сырой и плотный, нужно увеличить время и немного снизить температуру»).

Эти факторы приводят к существенным производственным потерям: уровень брака на этапе прессования на многих предприятиях достигает 8–12 %, что означает не только прямые убытки от списания продукции, но и перерасход сырья и энергоресурсов.

В данной статье мы попытаемся обосновать эффективность применения систем нечеткого логического вывода для оптимизации управления режимом горячего прессования фанеры и примерно описать практическую реализацию такой системы, направленной на адаптивную корректировку времени выдержки в реальном времени. В статье будут рассмотрены теоретические основы нечеткой логики, обоснован выбор этапа прессования как

наиболее критичного для внедрения, приведена архитектура, правила работы и ожидаемые результаты промышленного внедрения конкретной НЛ-системы.

Нечеткая логика (НЛ), предложенная Лотфи Заде в 1965 году, представляет собой математический аппарат для работы с неточными, «размытыми» понятиями и качественными суждениями, характерными для человеческого мышления и экспертного опыта. В отличие от классической бинарной логики, где переменная может принимать только значения «истина» (1) или «ложь» (0), НЛ оперирует степенями принадлежности элемента к тому или иному множеству, выраженными числом в интервале от 0 до 1. Эта особенность делает НЛ исключительно мощным инструментом для управления сложными технологическими процессами, что как раз подходит под горячее прессование фанеры, где многие ключевые параметры и состояния описываются качественно («высокая влажность», «низкая температура», «приемлемое качество шва») и имеют плавные границы переходов.

Любая система нечеткого вывода, применяемая для управления, включает четыре последовательных этапа [4].

1. Фаззификация (Fuzzification).

Преобразование точных (четких) числовых значений входных параметров, поступающих с датчиков или из АСУ ТП, в степени принадлежности к заранее определенным нечетким множествам.

Нечеткое множество описывается лингвистической переменной (например, «Температура плиты») и набором термов (например, «Низкая», «Оптимальная», «Высокая»). Каждому терму ставится в соответствие функция принадлежности (ФП), определяющая, насколько значение параметра принадлежит данному терму.

2. База нечетких правил (Fuzzy Rule Base).

Содержит экспертные знания о процессе управления в форме условных высказываний типа «ЕСЛИ (Предпосылка), ТО (Заключение)». Предпосылки и заключения формулируются с использованием лингвистических переменных и их термов.

Структура правила: ЕСЛИ (X_1 есть A_1) И (X_2 есть A_2) ... И (X_n есть A_n), ТО (Y есть B), где X_i – входные переменные, Y – выходная переменная, A_i и B – их термы.

Правила формируются на основе глубокого анализа технологического процесса, интервью с опытными технологами и данных исторических циклов прессования [5, 6].

3. Механизм нечеткого вывода (Fuzzy Inference Engine).

На основе результатов фаззификации и базы правил определить степень истинности каждого правила и сформировать нечеткое выходное значение для управляющей переменной.

Активизация условий (Агрегация предпосылок): для каждого правила вычисляется степень истинности его предпосылки. При связке «И» (наиболее частая в управлении) обычно используется оператор минимума (min) или произведения (prod).

Активизация заключения: полученная степень истинности предпосылки (например, 0,3) определяет, в какой мере активизируется выходной терм данного правила (например, Сильно Увеличить). Чаще всего используется метод min-активизации (обрезание ФП выхода на уровне степени истинности правила) или prod-активизации (масштабирование ФП выхода).

Агрегирование выходов: нечеткие выходы от всех сработавших правил объединяются в одно результирующее нечеткое множество для выходной переменной (Коррекция времени). Используется оператор максимума (max), накладывающий все активизированные выходные ФП друг на друга.

4. Дефаззификация (Defuzzification).

Преобразование полученного агрегированного нечеткого множества для выходной переменной обратно в одно четкое (числовое) значение, которое может быть подано на исполнительное устройство (например, задатчик времени пресса).

Существует несколько методов дефаззификации. Наиболее распространенным и интуитивно понятным является метод центра тяжести (Center of Gravity, CoG): четкое выходное значение Y вычисляется как абсцисса центра тяжести площади фигуры, образованной результирующей функцией принадлежности выходной переменной.

Практический смысл для прессования: если агрегированная ФП коррекции времени имеет сложную форму, метод CoG даст взвешенное среднее значение коррекции (например, +7,2 %), учитывающее вклад всех сработавших правил.

Преимущества нечеткой логики для управления прессованием фанеры:

- Учет экспертных знаний: позволяет формализовать интуицию и опыт технологов в виде понятных правил «ЕСЛИ-ТО».
- Устойчивость к неопределенности и неточностям данных: эффективно работает с «шумными» показаниями датчиков (влажности, температуры) и качественными оценками (плотность шпона).
- Интуитивность и прозрачность: логика работы системы (база правил) понятна инженерам и технологам, в отличие от «черного ящика» нейронных сетей.
- Относительная простота разработки и настройки по сравнению с созданием точных физико-химических моделей процесса прессования.
- Адаптивность: система гибко реагирует на изменчивость свойств сырья, автоматически корректируя управляющие воздействия.

Данные теоретические принципы составляют основу для построения конкретной системы нечеткого управления режимом горячего прессования фанеры, практическая реализация и результаты внедрения которой будут далее.

Горячее прессование – это ключевая и финальная стадия технологического цикла производства фанеры, от которой непосредственно зависят ее физико-механические свойства, геометрическая стабильность, прочность на скалывание, водостойкость и внешний вид готовой продукции [7]. На этом этапе формируется конечная структура многослойного шпонируемого пакета под воздействием высоких температур и давления, в результате чего активизируются клеевые составы и происходит их полимеризация.

Процесс горячего прессования представляет собой сложную систему с множеством взаимосвязанных и динамически изменяющихся параметров:

- Температура плит пресса: в диапазоне от 130 до 160 °С;
- Давление: от 1,0 до 1,6 МПа;
- Влажность шпона: от 6 до 12 %;
- Плотность материала, тип клеевого состава и его распределение, толщина пакета, начальная температура материалов и ряд других факторов.

Эти параметры имеют нелинейную взаимозависимость и оказывают комбинированное влияние на продолжительность прессования и качество продукции.

Проблема традиционного управления заключается в том, что регулирование параметров осуществляется, как правило, по усредненным технологическим картам либо на основе субъективного опыта оператора. Операторы вынуждены ориентироваться на усредненные значения или эмпирические поправки без учета реальных текущих изменений состояния пакета или оборудования.

Такой подход порождает ряд серьезных недостатков [8]:

- Отсутствие гибкости в реагировании на изменяющиеся условия.
- Невозможность оперативно скорректировать процесс при отклонениях в параметрах пакета (влажность, толщина, плотность).
- Потери сырья из-за брака.
- Избыточные затраты электроэнергии и пара при неоптимальных режимах.
- Снижение производительности из-за избыточных временных резервов в технологии.

Результат – потери производственной эффективности и упущенная выгода предприятия.

В этих условиях особенно актуальным становится внедрение интеллектуальных систем управления на основе методов нечеткой логики, способных учитывать неопределенность, размытые границы параметров и экспертные знания, формализованные в виде базы правил. Такие системы позволяют не только повышать качество продукции и снижать потери, но и

обеспечивать адаптивное управление режимами прессования в реальном времени с учетом текущего состояния пакета.

Целью разработки модели на основе нечеткой логики является построение интеллектуальной системы управления параметрами горячего прессования фанеры, способной оперативно адаптировать режимы в зависимости от изменяющихся условий процесса.

Сначала дадим определение лингвистическим переменным и проведем фаззификацию.

- Допустим, измеренная температура плиты пресса равна 142 °С. Функции принадлежности термов температуры могут быть заданы так:

Низкая: Треугольная ФП с вершинами (110 °С, 1), (120 °С, 1), (130 °С, 0).

Оптимальная: Треугольная ФП с вершинами (130 °С, 0), (140 °С, 1), (150 °С, 0).

Высокая: Треугольная ФП с вершинами (140 °С, 0), (150 °С, 1), (160 °С, 1).

- Расчет: Для Температура = 142°С:

Степень принадлежности к Низкая = 0.0 (142 > 130).

Степень принадлежности к Оптимальная = $\mu_{\text{Опт}}(142)$. По формуле треугольника: $\mu = (150 - 142) / (150 - 140) = 8/10 = 0.8$.

Степень принадлежности к Высокая = $\mu_{\text{Выс}}(142) = (142 - 140) / (150 - 140) = 2/10 = 0.2$.

- Итог фаззификации: Температура 142 °С → [Низкая: 0.0, Оптимальная: 0.8, Высокая: 0.2].

Построим базу правил.

- Примеры правил для прессования (фрагмент):

Правило 1: ЕСЛИ Влажность шпона Высокая И Температура плиты Низкая, ТО Коррекция времени Сильно Увеличить (+15 %).

Правило 2: ЕСЛИ Плотность шпона Низкая И Температура плиты Высокая, ТО Коррекция времени Уменьшить (-5 %).

Правило 3: ЕСЛИ Влажность шпона Средняя И Температура плиты Оптимальная И Плотность шпона Средняя, ТО Коррекция времени Без изменений (0 %).

- Для Правила 1 (Высокая Влажность & Низкая Температура):

Пусть степень Влажность = Высокая = 0.7, степень -Температура=Низкая = 0.3.

Степень истинности предпосылки = $\min(0.7, 0.3) = 0.3$.

Теперь проводим дефаззификацию.

- $Y = (0.3 \cdot -5) / 0.3 = -5$

Итоговое значение коррекции температуры равно -5 градусов.

Многочисленные исследования показали, что горячее прессование фанеры представляет собой сложный многофакторный процесс с нелинейными зависимостями между параметрами сырья и режимами работы оборудования [9]. Традиционные методы регулирования (жесткие алгоритмы и ПИД-регуляторы) оказываются недостаточно эффективными при высокой изменчивости свойств шпона, колебаниях влажности и плотности, а также при вариациях характеристик клеевых составов.

Разработанный подход на основе нечеткой логики позволяет учитывать экспертные знания технологов, формализованные в виде базы правил «ЕСЛИ–ТО», и адаптивно корректировать управляющие воздействия. Использование функций принадлежности для параметров процесса (температуры, давления, влажности шпона) и механизма нечеткого вывода обеспечивает плавное и обоснованное изменение времени выдержки, что способствует снижению уровня брака, повышению прочности клеевого шва и общей стабильности качества продукции.

Применение систем нечеткого управления в реальном времени создает предпосылки для экономии энергоресурсов и повышения производительности за счет сокращения избыточных резервов времени. Перспективой дальнейших исследований является разработка

промышленного прототипа и его испытание на действующих линиях горячего прессования фанеры.

Список литературы

1. Wei Q., Wu Z., Wei W., Aladejana J.T., Kouomo G.Y., Li D., Hou X., Wang X., Xie Y. Optimization of hot-press parameters for plywood with environmental aluminophosphate adhesive // *BioResources*. 2021. Vol. 16, No. 1. P. 1702–1712. DOI: 10.15376/biores.16.1.1702-1712.
2. Oztürk H., Demir A., Demirkir C. Optimization of pressing parameters for the best mechanical properties of wood veneer/polystyrene composite plywood using artificial neural network // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022. Vol. 80. P. 907–922. DOI: 10.1007/s00107-022-01818-2.
3. Spulle U., Meija A., Kuliņš L., Kopeika E., Liepa K.H., Šillers H., Zudrags K. Influence of hot pressing technological parameters on plywood bending properties // *BioResources*. 2021. Vol. 16, No. 4. P. 7550–7561. DOI: 10.15376/biores.16.4.7550-7561.
4. Ross T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 606 p.
5. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
6. Klir G.J., Yuan B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1995. 574 p.
7. Lv Y., Liu Y., Jing W., Woźniak M., Damaševičius R., Scherer R., Wei W. Quality control of the continuous hot pressing process of medium density fiberboard using fuzzy failure mode and effects analysis // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, 4627. DOI: 10.3390/app10134627.
8. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541.
9. Wang H. Deformation rate of engineered wood flooring with response surface methodology and adaptive network-based fuzzy inference system // *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18, e0292815. DOI: 10.1371/journal.pone.0292815.

APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO OPTIMIZE HOT PLYWOOD PRESSING

B. M. Shifrin*, N. A. Ivanov, I. K. Lisovskij, D. V. Kalimullin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: shifrinb@mail.ru*

Abstract. In such a complex process as plywood production, the hot pressing stage is one of the most important, as it directly determines the key performance characteristics of the finished product, such as: adhesive bond strength (meeting the requirements of GOST 3916.1-96 or EN 314-1), geometric stability, and the absence of defects such as delamination or thermal "burning" of the surface. The final quality of the plywood, as well as the economic efficiency of the entire production process, directly depends on the precise control of the process parameters. Therefore, to ensure the reliability of the hot pressing stage, it's worth considering the implementation of fuzzy logic to minimize defects under conditions of uncertainty and incomplete data. Its key advantage is the ability to formalize high-quality expert knowledge and linguistic rules such as "IF... THEN..." to manage complex, traditional processes that are difficult to formalize.

Keywords: hot plywood, fuzzy logic, fuzzification, defuzzification.

References

1. Wei Q., Wu Z., Wei W., Aladejana J.T., Kouomo G.Y., Li D., Hou X., Wang X., Xie Y. Optimization of hot-press parameters for plywood with environmental aluminophosphate adhesive // *BioResources*. 2021. Vol. 16, No. 1. P. 1702–1712. DOI: 10.15376/biores.16.1.1702-1712.

2. Oztürk H., Demir A., Demirkir C. Optimization of pressing parameters for the best mechanical properties of wood veneer/polystyrene composite plywood using artificial neural network // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022. Vol. 80. P. 907–922. DOI: 10.1007/s00107-022-01818-2.
3. Spulle U., Meija A., Kuliņš L., Kopeika E., Liepa K.H., Šillers H., Zudrags K. Influence of hot pressing technological parameters on plywood bending properties // *BioResources*. 2021. Vol. 16, No. 4. P. 7550–7561. DOI: 10.15376/biores.16.4.7550-7561.
4. Ross T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 606 p.
5. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
6. Klir G.J., Yuan B. *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1995. 574 p.
7. Lv Y., Liu Y., Jing W., Woźniak M., Damaševičius R., Scherer R., Wei W. Quality control of the continuous hot pressing process of medium density fiberboard using fuzzy failure mode and effects analysis // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, 4627. DOI: 10.3390/app10134627.
8. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541.
9. Wang H. Deformation rate of engineered wood flooring with response surface methodology and adaptive network-based fuzzy inference system // *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18, e0292815. DOI: 10.1371/journal.pone.0292815.

УДК 676.056.54
ГРНТИ 61.13.17

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В СУШИЛЬНЫХ ЧАСТЯХ БДМ

Е. Н. Громова*, В. В. Иванов

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: gromova.gturp@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается разработка рациональной схемы утилизации низкопотенциальной теплоты в сушильных частях бумагоделательных машин (БДМ) с целью повышения энергоэффективности производства. Исследуются источники вторичного тепла, а также методы их рекуперации. Предлагается схема, предусматривающая использование в качестве промежуточного теплоносителя воды. В разработанной схеме избыточная теплота передается в скруббере воде, нагреваемой до 35 °С. Проведен анализ энергетических преимуществ внедрения данной схемы, включая снижение расхода пара. Результаты показывают, что рациональное использование низкопотенциальной теплоты позволяет значительно повысить энергоэффективность сушильного процесса при минимальных капитальных вложениях.

Ключевые слова: сушка, бумага, сушильные установки, бумагоделательные машины, низкопотенциальное тепло, энергоэффективность.

В процессах сушки используются все известные способы переноса теплоты: конвекцией, излучением и контактом. Во всех этих способах подвода теплоты к влажному материалу влагопоглотителем является воздух.

Термодинамически процесс сушки – это переход теплоты с высокого потенциального уровня к более низкому, что характеризуется повышением энтропии паровоздушной смеси. Теплота, подводимая к материалу, расходуется на испарение влаги и суммарное изменение энтропии компонентов, участвующих в процессе сушки:

$$\sum \Delta S = \Delta S_{\text{п}} + \Delta S_{\text{в}} + \Delta S_{\text{м}} = S''_{\text{п}} + S''_{\text{в}} + S''_{\text{м}} - S'_{\text{п}} - S'_{\text{в}} - S'_{\text{м}},$$

где $S'_{\text{п}}, S'_{\text{в}}, S'_{\text{м}}$ – начальные значения энтропии воздуха, влаги и материала соответственно, $S''_{\text{п}}, S''_{\text{в}}, S''_{\text{м}}$ – конечные значения энтропий.

В связи с этим возникает проблема наиболее полного использования теплоты отработавшего воздуха, удаляемого из сушильных установок.

В целлюлозно-бумажном производстве наибольшее применение находят контактные установки для сушки бумаги и картона, потребляющие огромное количество греющего пара высоких параметров.

Расход теплоты на сушку $q_{\text{с}}$, отнесенный к 1 кг испаряемой влаги, складывается из полезной теплоты на испарение влаги $q_{\text{исп}}$, затрат теплоты на нагрев высушиваемого материала $q_{\text{нм}}$ и сушильного воздуха $q_{\text{нв}}$, потерь теплоты в окружающую среду через ограждающие конструкции $q_{\text{огр}}$:

$$q_{\text{с}} = q_{\text{исп}} + q_{\text{нм}} + q_{\text{нв}} + q_{\text{огр}} = (i_{\text{п}} - c_{\text{в}} \cdot t_{\text{м}}^0) + \frac{c_{\text{в}}}{d_2 - d_1} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{100}{U_1 - U_2} \cdot (c_{\text{м}} + c_{\text{в}} \cdot U_2) \cdot (t_2 - t_1) + \frac{k \cdot F_{\text{огр}}}{M} \cdot (\bar{t}_{\text{в}} + t_{\text{окр}}),$$

где $i_{\text{п}} = (2480 \pm 2,0) \cdot t_{\text{п}}$ – энтальпия пара в удаляемом воздухе, кДж/кг; $c_{\text{м}}$ и $t_{\text{м}}^0$ – теплоемкость и температура материала, поступающего в сушильную установку, кДж/кг·°С; d_1, d_2, t_1, t_2 – влагосодержания и температуры подаваемого и удаляемого воздуха, г/кг, °С; U_1, U_2 – начальная и конечная влажность материала, %; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость сухого воздуха, кДж/кг·°С;

M – количество испаряемой влаги, кг/ч; k – коэффициент теплопередачи через наружные ограждения, кДж/кг·°С, $F_{огр}$ – площадь наружных ограждений, м²; $\bar{t}_в$ и $t_{окр}$ – средняя температура воздуха в сушильной установке и температура окружающей среды соответственно, °С.

Произведем приближенную оценку удельного расхода теплоты на испарение влаги в контактной сушильной установке без учета регенерации при следующих исходных данных: температура воздуха, забираемого из цеха $t_1 = 20$ °С, температура удаляемого воздуха $t_2 = 80$ °С, влагосодержания воздуха, соответственно, $d_1 = 0,015$ кг/кг, $d_2 = 0,085$ кг/кг, поверхность ограждений $0,1$ м², коэффициент теплопередачи через наружные ограждения $8,0$ кДж/кг·°С, влажность бумажного полотна на входе и на выходе из сушильной части $2,0$ и $0,07$ кг/кг, соответственно, температура массы и высушенного полотна – 25 °С и 120 °С соответственно.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Энтальпия пара в удаляемом воздухе: $i_{п} = 2560$ кДж/кг.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Полезная теплота испарения	$q_{исп}$, кДж/кг	2455
Затраты теплоты на нагрев сушильного воздуха	$q_{нв}$, кДж/кг	1028
Затраты теплоты на нагрев высушиваемого материала:	$q_{нм}$, кДж/кг	87
Потери теплоты в окружающую среду через ограждающие конструкции	$q_{огр}$, кДж/кг	46

Суммарный удельный расход теплоты на сушку, отнесенный к 1 кг испаряемой влаги будет равен: $q_c = 3616$ кДж/кг.

Удельный расход сухого насыщенного пара, подаваемого на сушильные цилиндры и на калориферы для подогрева воздуха (без учета регенеративного подогрева):

$$g_{п} = \frac{q_c}{i_{сп} \cdot (1 - x_{п})} = 1,61 \text{ кг/кг},$$

где $x_{п} = 0,02$ – минимальное количество пролетного пара, рекомендуемое по условиям продувки цилиндров.

На современных бумагоделательных машинах осуществляется регенеративный подогрев воздуха, подаваемого в сушильную часть. По условиям теплообмена подогрев сушильного воздуха возможен до температуры $40\text{--}45$ °С. В соответствии с литературными данными [1, 3] количество организованно подаваемого воздуха (через систему регенерации) не превышает 75 % от общего объема. Тогда количество регенерируемой теплоты составит:

$$q_p = \frac{c_v}{d_2 - d_1} \cdot (t_2 - t_1) \cdot 0,75 = 316 \text{ кДж/кг}.$$

Удельный расход пара с учетом регенерации:

$$g_{п} = \frac{q_c - q_p}{i_{сп} \cdot (1 - x_{п})} = 1,49 \text{ кг/кг}.$$

В целлюлозно-бумажной промышленности на сегодняшний день применяется трехступенчатая система регенерации теплоты отработавшего влажного воздуха (рис. 1).

Влажный воздух удаляется из сушильной части БДМ и поступает в поверхностный теплообменник ТУ-1, в котором нагревает свежий воздух, забираемый из цеха, до температуры $40\text{--}45$ °С.

На Id-диаграмме (рис. 2) этот процесс изображается линией 5-6. При этом в сушильный процесс возвращается до 7 % теплоты. Именно эта часть теплоты относится к категории регенерации. В теплообменнике второй ступени ТУ-2 нагревается воздух общеобменной вентиляции. В холодный период года здесь используется от 15 до 25 % теплоты отработавшего воздуха. В третьей ступени, представляющей собой водяной скруббер, нагревается

распыленная вода, которая используется в технологическом процессе. По условиям тепломассообмена вода в скруббере может нагреваться до 30–35 °С.

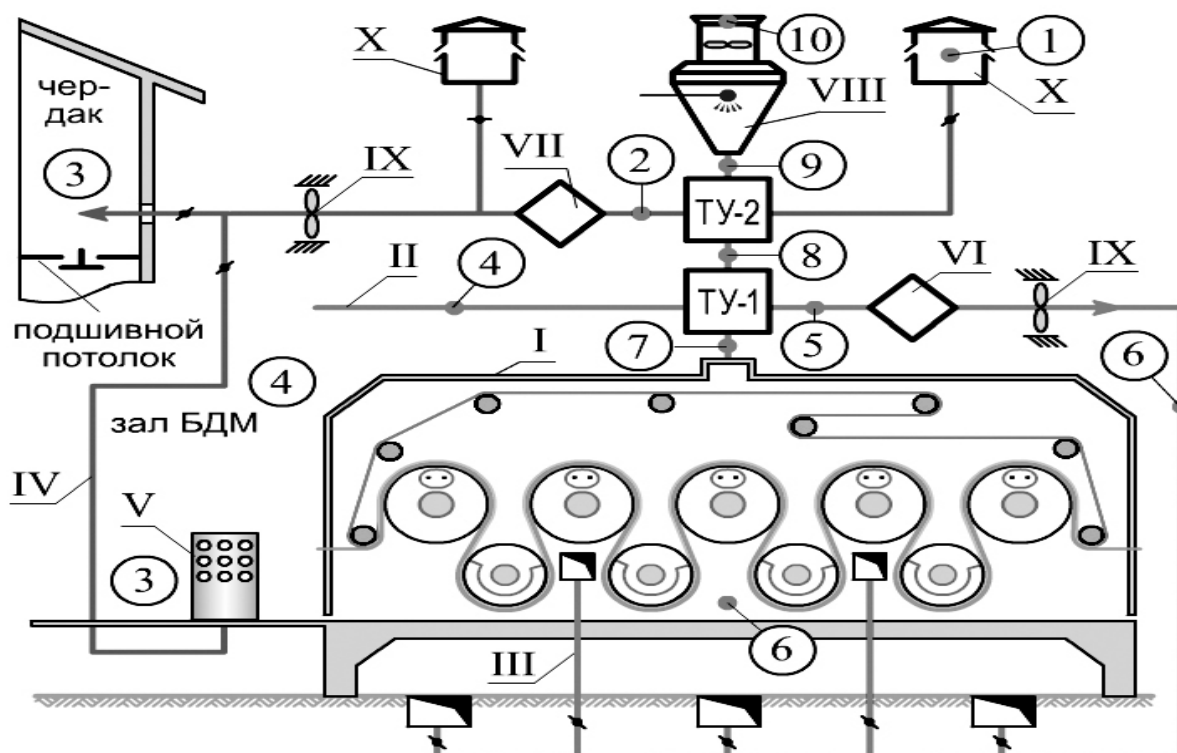


Рисунок 1 – Схема вентиляции сушильной части бумагоделательной машины (БДМ): I – вентиляционный колпак БДМ; II – сушильный агент (воздух); III – сеткопродувные камеры; IV – подвод воздуха в цех БДМ; V – воздухораспределители; ТУ-1, ТУ-2 – теплоуловители первой и второй ступени; VI – калорифер первой ступени; VII – калорифер второй ступени; VIII – скруббер; IX – вентиляторы; X – забор наружного воздуха

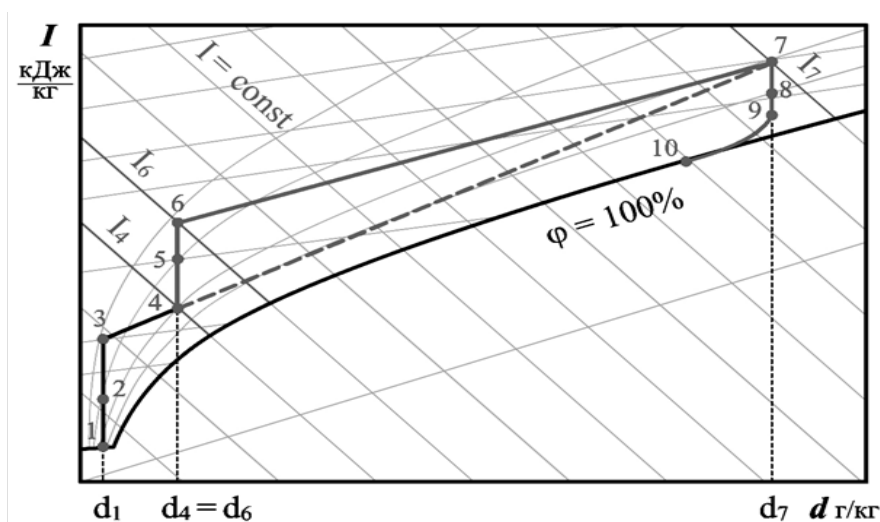


Рисунок 2 – Процессы изменения состояния воздуха в сушильной части БДМ: 1–2 – нагрев наружного воздуха в ТУ-2; 2–3 – нагрев воздуха в калорифере второй ступени; 3–4 – нагрев и увлажнение воздуха в зале БДМ; 4–5 – нагрев воздуха в ТУ-1 при постоянном влагосодержании; 5–6 – нагрев воздуха в калорифере второй ступени; 6–7 – нагрев и увлажнение воздуха под колпаком БДМ; 7–8 – охлаждение паровоздушной смеси (ПВС) в ТУ-1 при постоянном влагосодержании; 8–9 – охлаждение ПВС в ТУ-2; 9–10 – охлаждение и осушение паровоздушной смеси в скруббере

Таким образом, количество низкопотенциальной теплоты отработавшего влажного воздуха, передаваемой в теплообменниках будет равно:

- в ТУ-1 $Q_1 = M \cdot l_c \cdot (I_5 - I_4)$,

- в ТУ-2 $Q_2 = M \cdot l_c \cdot (I_2 - I_1)$,

где M – количество испаряемой влаги, кг/с; l_c – удельный расход воздуха, кг/кг; I_1 и I_2 – начальная и конечная энтальпия охлаждаемого воздуха в ТУ-1; I_3 – конечная энтальпия в ТУ-2.

Поверхность теплообменника определяется по уравнению теплообмена:

$$F = \frac{Q}{3,6 \cdot \varepsilon_3 \cdot k \cdot (\bar{t}_{\text{гр}} - \bar{t}_{\text{н}})},$$

где k – коэффициент теплопередачи; $\bar{t}_{\text{гр}}$ и $\bar{t}_{\text{н}}$ – средние температуры греющего и нагреваемого воздуха; ε_3 – коэффициент загрязнения.

Анализ уравнения теплообмена показывает, что степень использования теплоты и величина необходимой поверхности нагрева находятся в противоречии, а именно: при увеличении степени регенерации уменьшается теплообменный потенциал $\bar{\vartheta} = \bar{t}_{\text{гр}} - \bar{t}_{\text{н}}$ и, соответственно, увеличивается поверхность теплообмена.

Термодинамический анализ процесса регенерации на Id-диаграмме показывает, что на нагрев сушильного воздуха в ТУ-1 может быть использовано до 10 % теплоты удаляемого влажного воздуха [2].

Современные БДМ, как правило, оборудованы пластинчатыми теплообменниками, трудно поддающимися очистке от пыли, выносимой из сушильной части и оседающей на поверхности пластин. Отложения волокнистой пыли на пластинах оказываются настолько велики, что в процессе эксплуатации теплообменники полностью забиваются и оказываются неработоспособными. Налипание пыли способствует также частичной конденсации пара в конце процесса, особенно в ТУ-2. Вместе с тем в целях обеспечения компактности установки регенерации теплообменные аппараты выполняются с узкими проходными щелями ($B = 15\text{--}20$ мм), что делает их непригодными к эффективному обдуву [4, 5].

На основании изложенного предлагается проект усовершенствованной системы утилизации низкопотенциального тепла отработанного влажного воздуха, в которой в качестве промежуточного теплоносителя используется вода. Принцип действия системы заключается в следующем.

Основным аппаратом, использующим теплоту конденсации паров, содержащихся в удаляемом воздухе, является водяной скруббер, в котором вода нагревается до температуры 35 °С. Охлажденный воздух выбрасывается в атмосферу и частично возвращается на рециркуляцию. Нагретая в скруббере вода дополнительно нагревается в трубном змеевике, обогреваемым воздухом, удаляемым из-под колпака БДМ. При этом вода нагревается до температуры 60–65 °С. Нагретая вода используется в качестве теплоносителя в поверхностном теплообменнике для нагрева воздуха до температуры 55 °С. Дополнительный подогрев воздуха до 80 °С осуществляется в паровом калорифере.

Дальнейшая реализация теплового потенциала воды происходит в калорифере второй ступени, предназначенном для нагрева наружного воздуха, подаваемого в общеобменную вентиляцию цеха БДМ.

Проведенный термодинамический анализ эффективности предложенной системы рекуперации демонстрирует, что максимальная эффективность достигается при прямом теплообмене между отработанной паровоздушной смесью и приточным воздухом. Однако величина передаваемой теплоты в данном случае лимитирована термодинамическими ограничениями процесса. Согласно расчетам, максимально достижимый коэффициент рекуперации в теплоуловителе первой ступени (ТУ-1) не превышает 15%.

Таким образом, основная часть теплоты отработавшей паровоздушной смеси может быть использована только в низкотемпературных технологических процессах. В предложенной схеме избыточная теплота передается в скруббере воде, нагреваемой максимум до 35 °С. Выполненный анализ показывает, что суммарное среднегодовое использование

теплоты на нагрев воздуха не превышает 15 %. Более эффективным представляется использование нагретой воды в формирующей части БДМ для подогрева водной волокнистой суспензии, поступающей на фильтрующую сетку.

Список литературы

1. Бельский, А. П. Вентиляция бумагоделательных машин / А. П. Бельский, М. Д. Лотвинов. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 214 с.
2. Казаков, В. Г. Отопительно-вентиляционные системы в целлюлозно-бумажной промышленности: учеб. пособие / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 200 с.
3. Бойков, Л. М. Вентиляция бумаго- и картоноделательных машин / Л. М. Бойков. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 258 с.
4. Kazakov, V. G. Closed cycle of air-steam mixture the drying section of paper machine / V. G. Kazakov, E. N. Gromova // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 24 – 31.
5. Бойков, Л. М. Модернизация систем вентиляции на предприятиях ЦБП / Л. М. Бойков, Д. А. Прохоров, Е. Н. Ионин // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2015. – № 10. – С. 60–64.

DEVELOPMENT OF A RATIONAL SCHEME FOR THE USE OF LOW-POTENTIAL HEAT IN THE DRYING PARTS OF THE BDM

E. N. Gromova*, V. V. Ivanov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: gromova.gturp@mail.ru*

Abstract. The article discusses the development of a rational scheme for the utilization of low-potential heat in the drying parts of paper machines (BDM) in order to increase the energy efficiency of production. The sources of secondary heat, as well as methods of their recovery, are being investigated. A scheme is proposed that provides for the use of water as an intermediate coolant. In the developed scheme, excess heat is transferred in the scrubber to water heated to 35 °C. An analysis of the energy advantages of implementing this scheme, including a reduction in steam consumption, has been carried out. The results show that the rational use of low-potential heat can significantly increase the energy efficiency of the drying process with minimal capital investment.

Keywords: drying, paper, drying plants, paper-making machines, low-potential heat, energy efficiency.

References

1. Belsky A.P., Lotvinov M. D. *Ventilyaciya bumagodelatel'nykh mashin* [Ventilation of paper machines]. Moscow, Forest industry. 1990. 214 p. (In Russian).
2. Kazakov V. G., Lukanin P. V., Gromova E. N. *Otopitel'no-ventilyacionny'e sistemy v cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti: ucheb. posobie* [Heating and ventilation systems in the pulp and paper industry: a textbook]. St. Petersburg: HSE SPbGUPTD, 2018. 200 p. (In Russian).
3. Bojkov, L.M. *Ventilyaciya bumago- i kartonodelatel'nykh mashin* [Ventilation of paper and cardboard making machines]. St. Petersburg: HSE SPbGUPTD, 2018, 258 p. (In Russian).
4. Kazakov, V. G., Gromova E. N. Closed cycle of air-steam mixture the drying section of paper machine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems]. 2019. vol. 21. no. 3. pp. 24-31.
5. Bojkov L. M., Prokhorov D.A., Ionin E. N. *Modernizaciya sistem ventilyacii na predpriyatiyax CzBP* [Modernization of ventilation systems at CBP enterprises]. *Cellyuloza. Bumaga. Karton.* [Cellulose. Paper. Paperboard.]. Moscow. 2015. No. 10. pp. 60-64. (In Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛИЭТИЛЕНОМ, НАПОЛНЕННЫМ АРАБИНОГАЛАКТАНОМ

Е. А. Исаев¹, Н. С. Сергеев¹, О. А. Ерохина^{1*}, И. Ю. Васильев², Э. Л. Аким¹

¹Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

²Московский политехнический университет, Москва, Россия

*E-mail: art-stones@bk.ru

Аннотация. В связи с широким распространением материалов с полимерным покрытием в качестве упаковки придание пластиковой упаковке биоразлагаемости стало актуальной задачей. Биоразлагаемость может достигаться за счет введения в состав синтетического полимера биоразлагаемых компонентов. В связи с этим является актуальным создание новых видов композиционных материалов с высокой степенью биоразлагаемости и разработка методов ее оценки.

Цель данной работы заключается в получении и исследовании биоразлагаемости упаковочного целлюлозного композитного материала на основе мешочной бумаги и полиэтилена низкой плотности, наполненного арабиногалактаном.

Устойчивость к биологическому разложению оценивали, сопоставляя прочностные, деформационные, релаксационные свойства образцов после почвенного воздействия с исходными.

Установлено, что по истечении времени (20–80 дней) у композита с полиэтиленом, наполненным арабиногалактаном, наблюдается более активное снижение прочности, деформационной жесткости и работы разрушения, увеличение величины деформации ползучести и скорости деформационного процесса в сравнении с аналогичными характеристиками у образцов композита с полиэтиленом, что, вероятно, свидетельствует о его ускоренной биodeградации.

Ключевые слова: полиэтилен, арабиногалактан, мешочная бумага, биodeградация, почвенное воздействие.

Известны способы создания композиционных материалов с высокой степенью биоразлагаемости [1-3], в том числе наполненных полимеров, получаемых путем введения в синтетические полимеры наполнителя, например, полисахаридов, крахмалов и других добавок. Введение в матрицу полиэтилена (ПЭ) добавок ускоряет процесс деградации материала в результате почвенного воздействия, воздействия ультрафиолетового излучения или других факторов окружающей среды. В данной работе были проведены исследования по разработке и изучению биоразлагаемости целлюлозного композиционного материала на основе мешочной бумаги и полиэтилена низкой плотности, наполненного арабиногалактаном (Б+ПЭ+АГ).

В качестве образцов использовали:

- Бумагу мешочную SKI80 (ПАО «Сегежа Групп», Россия), масса 1 м² – 80 г/м²;
- Полиэтилен низкой плотности 11503-070, показатель текучести 7 г/10 мин (ПАО «Сибур-Холдинг», Россия);
- Арабиногалактан (АО «Аметис», Россия, Амурская область);
- Гранулы полиэтилена, наполненные арабиногалактаном, полученные на двухшнековом экструдере (Москва, МПУ).

Образцы целлюлозного композиционного материала (КМ) получали на пилотной экструзионно-ламинаторной установке (ПЭЛУ) следующим образом: гранулы полиэтилена, наполненного арабиногалактаном (композиция 95 % ПЭ + 5 % АГ), загружали в бункер ПЭЛУ, оттуда они попадали в шнек с нагревательными элементами. При нагревании гранулы переходили в высокоэластическое, а затем в вязкотекучее состояние. Расплав полиэтилена

через щелевую головку наносили на мешочную бумагу при температуре $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости шнека экструдера $V = 50\text{ об/мин}$.

Изучали и анализировали следующие характеристики:

– деформационно-прочностные – измеряли на горизонтальной разрывной машине для сухих и влажных испытаний, модель 81502TS (PTI, Австрия), в условиях кондиционирования при температуре $T = 22 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $W = 50 \pm 2\text{ }\%$;

– релаксационные свойства (ползучесть) – исследовали на автоматическом релаксметре деформаций АРД, ЛТИЦБП, Россия;

– устойчивость к воздействию естественного комплекса почвенной среды на ЦКМ – оценивали методом инкубации материалов в почву в течение 20, 40, 60 и 80 дней с последующим сопоставлением их физико-механических, прочностных и упруго-релаксационных свойств с аналогичными свойствами исходных образцов.

В таблице 1 представлены прочностные и деформационные характеристики композиционных материалов. При сопоставлении и анализе полученных характеристик образцов композиционных материалов Б+ПЭ и Б+ПЭ+АГ было установлено, что введение в структуру полиэтилена арабиногалактана не ухудшает прочностные свойства композита. Поверхностные свойства практически не изменяются. При этом несколько увеличивается величина удлинения при разрушении и снижается модуль эластичности.

Таблица 1 – Прочностные и деформационные характеристики образцов композиционных материалов

Вид образца	Характеристика			
	Максимальное усилие при разрушении P , Н	Удлинение при разрушении ϵ , %	Модуль эластичности (E_0), МПа	Впитываемость при одностороннем смачивании по Коббу (60 с)
Б+ПЭ	121	3,4	3,19	1,6
Б+ПЭ+АГ	134,9	3,6	2,4	2,1

На рисунке 1 представлена диаграмма растяжения образцов композиционного материала Б+ПЭ+АГ после почвенного воздействия за 20, 40, 60, 80 дней.

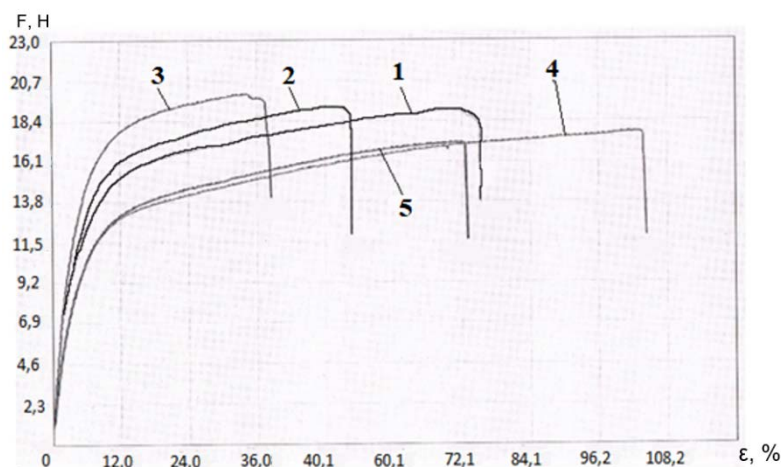


Рисунок 1 – Диаграмма растяжения образцов композита после почвенного воздействия:
1 – исходный (плёнка); 2 – 20 дней; 3 – 40 дней; 4 – 60 дней; 5 – 80 дней

Из рисунка 1 видно, что почвенное воздействие на образцы композита привело к уменьшению прочности и модуля эластичности на 10–15 %. При этом удлинение при разрушении увеличилось на 30–40 %, что, вероятно, связано с биodeградацией КМ.

На рисунках 2, 3 представлены графики влияния почвенного воздействия в течение 80 дней на величину максимального усилия при разрушении и модуля эластичности у образцов композита Б+ПЭ+АГ. Из рисунка 2 видно, что в течение первых 20 дней резко снижается прочность (максимальное усилие при разрушении) образца, это связано с разложением бумаги при воздействии почвенной среды. Далее, после сорока дней нахождения в почве, величина максимального усилия при разрушении уменьшается с меньшей скоростью.

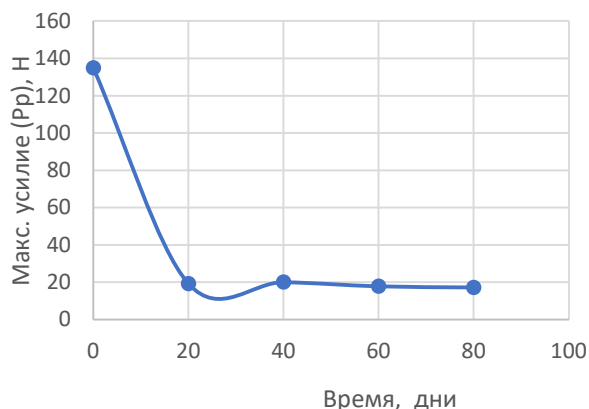


Рисунок 2 – Влияние почвенного воздействия на максимальное усилие при разрушении композита Б+ПЭ+АГ

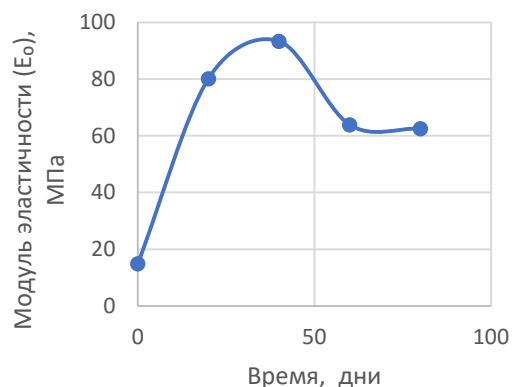


Рисунок 3 – Влияние почвенного воздействия на модуль эластичности композита Б+ПЭ+АГ

Модуль эластичности (рис. 3) у образцов композита сначала увеличивается до 40 дней в результате разложения бумаги при почвенном воздействии, а затем уменьшается за счет хемодеструкции и бактериального воздействия.

На рисунке 4 представлены графики деформации ползучести во времени при постоянной нагрузке 5 Н в течение 5 минут с последующим эластическим восстановлением формы образцов ПЭ 100 % и ПЭ, наполненного арабиногалактаном (95 % ПЭ + 5 %АГ).

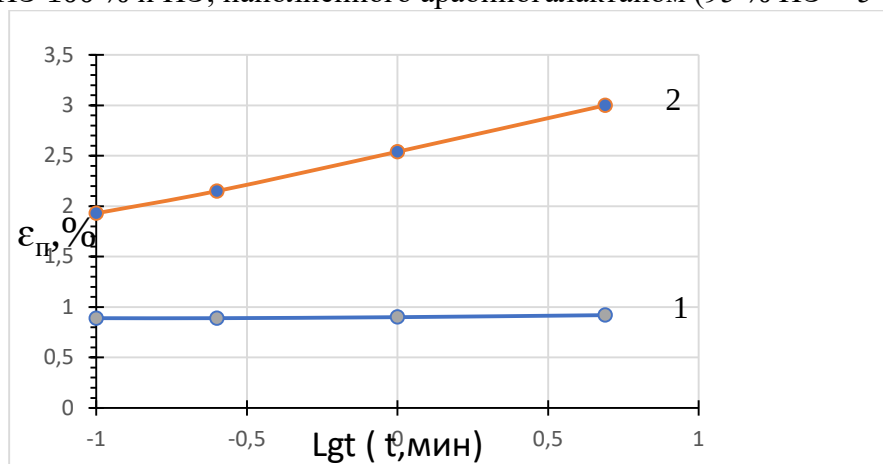


Рисунок 4 – Деформация ползучести во времени при нагрузке $P = 5$ Н, времени $t = 5$ мин у образцов: 1 – ПЭ; 2 – ПЭ+АГ

После завершения процесса эластического восстановления формы образца измеряли остаточную деформацию и рассчитывали составляющие компоненты деформации ползучести.

Из рисунка 4 видно, что у образцов полиэтилена, наполненного арабиногалактаном, величина деформации ползучести и скорость деформационного процесса значительно выше,

чем у образцов полиэтилена, что, вероятно, объясняется специфическим воздействием арабиногалактана на структуру полиэтилена.

На рисунке 5 представлены графики изменения деформации ползучести при нагрузке $P = 5 \text{ Н}$, времени $t = 5 \text{ мин}$ во времени для образцов полиэтилена, наполненного арабиногалактаном, исходных и после почвенного воздействия в течение 80 дней. Из рисунка 5 видно: до 60 дней почвенного воздействия на образцы наблюдается незначительное увеличение деформации ползучести и скорости деформационного процесса. А затем, после воздействия более 60 дней, характеристики деформационного процесса и скорость релаксационного процесса существенно увеличиваются, что, вероятно, объясняется структурными изменениями в образцах в результате хемотреструкции и бактериальным воздействием.

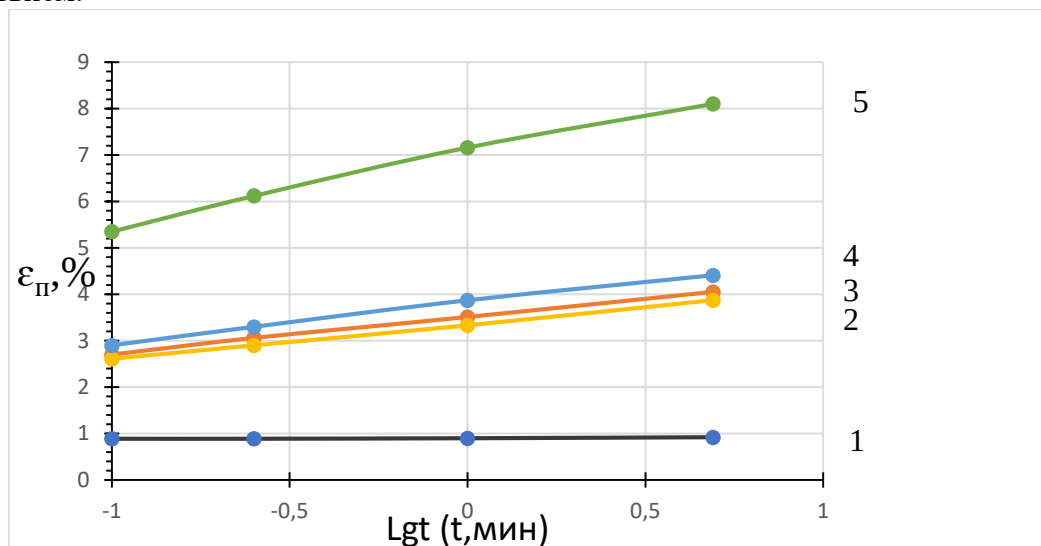


Рисунок 5 – Влияние почвенного воздействия на величину деформации ползучести при нагрузке $P = 5 \text{ Н}$, времени $t = 5 \text{ мин}$ у образцов ПЭ+АГ:
1 – исх.; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80 дней

В таблице 2 представлены данные по влиянию почвенного воздействия на составляющие компоненты деформации ползучести для образцов ПЭ и ПЭ+АГ.

Таблица 2 – Влияние почвенного воздействия на составляющие компоненты деформации ползучести образцов ПЭ и ПЭ+АГ

Показатели	Образцы ПЭ				Образцы ПЭ+АГ				
	Время почвенного воздействия, дней				Время почвенного воздействия, дней				
	Исх.	20	40	80	Исх.	20	40	60	80
Деформация ползучести $\varepsilon_{п}$, %	3,1	3,4	3,8	5,2	4	4,1	4,3	5,1	8,1
Упругая компонента деформации $\varepsilon_{о}$, %	0,32	0,36	0,44	0,6	0,5	0,52	0,6	0,65	1,08
Эластическая компонента деформации, $\varepsilon_{эл}$ %	2,42	2,86	3,16	4,08	2,8	2,9	3,2	3,9	6,12
Остаточная компонента деформации $\varepsilon_{ост}$, %	0,36	0,18	0,2	0,5	0,7	0,61	0,46	0,54	0,9
Параметр скорости ползучести	0,19	0,21	0,23	0,27	0,75	0,75	0,76	0,95	1,9

Из таблицы 2 видно, что влияние почвенного воздействия в течение 80 дней на величину составляющих компонент деформации ползучести и скорость деформационного процесса образцов полиэтилена и полиэтилена, наполненного АГ, значительно отличаются. У образцов ПЭ+АГ деформация ползучести, составляющие компоненты деформации и параметр скорости релаксационного процесса, больше по величине в несколько раз, чем у образцов ПЭ. Полученные результаты позволяют предположить, что АГ способствует увеличению скорости механодеструкции и повышению доступности ее объема для воздействия почвенной среды, в том числе микроорганизмов [4].

Выводы:

1. В результате проведенных исследований был получен материал на основе бумаги и полиэтилена, наполненного АГ, и определены режимы нанесения наполненного ПЭ (температура, скорость экструдера, скорости валковых систем).
2. Установлено, что использование при ламинировании мешочной бумаги полиэтилена, наполненного арабиногалактаном, не ухудшают прочность при разрушении композита и его поверхностные свойства.
3. В результате почвенного воздействия в течение 80 дней на образцы Б+ПЭ+АГ максимальное усилие при разрушении уменьшилось на 10–15 %, модуль эластичности – на 30 %, при этом удлинение при разрушении увеличилось на 30 %, что, вероятно, свидетельствует о биодegradации композита.
4. Экспериментально установлено, что величина деформации ползучести и скорости деформационного процесса в образцах полиэтилена, наполненного АГ, значительно больше, чем у образцов ПЭ.
5. Установлено, что при почвенном воздействии в течение 80 дней на образцы полиэтилена, наполненного АГ, составляющие компоненты деформации ползучести и скорость релаксационного процесса увеличиваются в сравнении с аналогичными характеристиками исходных образцов. Полученные результаты позволяют предположить, что АГ способствует увеличению скорости механодеструкции и повышению доступности ее объема для воздействия почвенной среды, в том числе микроорганизмов.
6. Исследования показали, что введение в синтетические полимеры добавок, обеспечивающих биодegradируемость, меняют скорость выделения углекислого газа, но не меняют общую величину карбонового следа.

Список литературы

1. Кинзябулатова, Д. Ф. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть I / И. Н. Вихарева, И. И. Зарипов, Д. Ф. Кинзябулатова [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2020. – Т. 3. – № 6. – С. 320-325. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-320-325.
2. Панченко, А. Н. Биоразлагаемые полимеры, их свойства и применение / А. Н. Панченко // Научный журнал. – 2023. – № 4 (4). – С. 204-206. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-4-4-204-206.
3. Васильев, И. Ю. Создание пленочных композиций на основе синтетических и природных полимеров с приданием им свойства биоразлагаемости: дисс. канд. техн. наук: 2.6.11 / Васильев И. Ю. – Москва, 2023. – 135 с.
4. Ельяшевич, Г. К. Физико-механические и релаксационные свойства композитов на основе арабиногалактана и пористых полиэтиленовых пленок / Г. К. Ельяшевич, О. А. Ерохина, Е. В. Сергеева, Е. Ю. Розова, И. С. Курындин, А. А. Пекарец, Э. Л. Аким // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова. – Архангельск: САФУ, 2023. – С. 316-321.

ANALYSIS OF BIODEGRADABILITY OF COMPOSITE MATERIALS WITH POLYETHYLENE FILLED WITH ARABINOGALACTAN

E. A. Isaev¹, N. S. Sergeev¹, I. Yu. Vasiliev², O. A. Erokhina¹, E. L. Akim¹

¹ Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

*E-mail: art-stones@bk.ru

Abstract. The growing use of polymer-coated materials in packaging has raised the demand for environmentally friendly solutions, particularly those enabling biodegradability. One of the promising approaches is the incorporation of biodegradable components into synthetic polymers. In this context, the development of novel composite materials with enhanced biodegradability, as well as reliable methods for its evaluation, is of particular relevance.

The present study focuses on the fabrication and assessment of a cellulose-based packaging composite consisting of sack kraft paper and low-density polyethylene filled with arabinogalactan. Biodegradation resistance was evaluated by comparing the mechanical strength, deformation behavior, and relaxation characteristics of the samples before and after exposure to soil conditions. The results demonstrate that within 20–80 days of soil exposure, the composite containing arabinogalactan-filled polyethylene exhibits a reduction in tensile strength, deformation stiffness, and fracture energy, accompanied by an increase in creep strain and deformation rate. These findings provide clear evidence of the material's biodegradation.

Keywords: polyethylen, arabinogalactan, kraft sack paper, biodegradation, soil exposure.

References

1. Kinzyabulatova D.F. Biorazlagaemye polimernye materialy i modifitsiruyushchie dobavki: sovremennoe sostoyanie. Chast' 1 [Biodegradable polymeric materials and modifying additives: current state. Part 1]. Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurna. [Nanotechnology in construction: scientific online journal]. 2020. T. 3. No. 6. S. 320-325. DOI 10.15828/2075-8545-2020-12-6-320-325. (In Russian).
2. Panchenko A.N. Biorazlagaemye polimery, ikh svoystva i primeneniye [Biodegradable polymers, their properties and applications]. Nauchnyy zhurnal [Scientific journal]. 2023. № 4 (4). S. 204-206. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-4-4-204-206. (In Russian).
3. Vasil'ev I. Yu. Sozdanie plenochnykh kompozitsiy na osnove sinteticheskikh i prirodnykh polimerov s pridaniem im svoystva biorazlagaemosti: dis. kand. tekhn. nauk: 2.6.11 [Creation of plastic composites based on synthetic and natural polymers with their biodegradability properties: dis. cand. techn. science: 2.6.11]. Moscow, 2023. 135 p. (In Russian).
4. El'yashevich G.K., Erokhina O.A., Sergeeva E.V., Rozova E.Yu., Kuryndin I.S., Pekarets A.A., Akim E.L. Fiziko-mekhanicheskie i relaksatsionnye svoystva kompozitov na osnove arabinogalaktana i poristyykh polietilenovykh plenok [Physicomechanical and relaxation properties of composites based on arabinogalactan and porous polyethylene films]. Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni professora V.I. Komarova. Arkhangel'sk: SAFU, 2023. S. 316-321. (In Russian).

ИССЛЕДОВАНИЕ РОССИЙСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ КАРТОНА И БУМАГИ И ИХ ВОЗВРАЩЕНИЕ В ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ОБОРОТ

Р. В. Колесников

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: roman_kolesnikov@hotmail.com

Аннотация. В статье кратко освещена концепция устойчивого развития в части формирования новой модели хозяйствования, реализуемой на принципах экономики замкнутого цикла. Дана краткая историческая справка о развитии системы обращения с отходами и извлечения вторичных ресурсов из их состава. Проведен анализ динамики развития количественных характеристик сферы обращения с отходами в России, в том числе в разрезе основных составляющих процесса обращения с отходами. Дана оценка потенциального объема образования отходов бумаги и картона в составе отходов потребления. Описан функционирующий в России механизм возврата отходов бумаги и картона в хозяйственный оборот и дана его краткая характеристика. Проанализированы и систематизированы нормативно-институциональные основы обращения с отходами бумаги и картона в России. Выделены положительные стороны и недостатки существующей системы, существующие ограничения, а также возможные направления развития отрасли.

Ключевые слова: отходы, отходы производства и потребления, твердые коммунальные отходы (ТКО), макулатура, бумага и картон, переработка отходов, циркулярная экономика, экономика замкнутого цикла.

Современное развитие экономики неосязаемых активов, называемой «неоэкономика», описывает постиндустриальный этап развития стран. Его суть заключается в росте роли непроеизводственных активов (услуги и технологии) в развитии глобальной и национальных экономик. Однако это не снижает значимости развития производственных комплексов в странах, имеющих соответствующую экономическую специализацию, основанную на переработке сырья и материалов и создании осязаемых активов. С точки зрения производственных организаций, новый этап экономического развития заключается в создании новых бизнес-процессов и технологий, способных обеспечивать лидерство и конкурентоспособность производимой продукции.

Основой развития современных производственных комплексов является функционирование в парадигме ограниченности первичных природных ресурсов и необходимости перехода к новой модели хозяйствования. Основы такого развития заложены в современной концепции устойчивого развития. Среди основных направлений развития концепции устойчивого развития в контексте управления отходами, в частности, отходами бумаги и картона, являются формирование комплексной системы обращения с отходами, направленной на снижение уровня потребления первичных природных ресурсов, и снижение экономического ущерба, наносимого окружающей среде в процессе производства и потребления товаров и услуг [1, 6].

Одним из ключевых направлений концепции устойчивого развития является формирование экономики замкнутого цикла. Ее суть заключается в смене линейной модели хозяйствования (производство => потребление => захоронение) на замкнутую систему, предполагающую максимальное вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот [2, 4]. В контексте перехода к замкнутой модели хозяйствования особое значение приобретает вторичная переработка наиболее ценных и пригодных для возвращения в экономический оборот сырья и материалов из состава образующихся отходов. Отходы бумаги и картона, макулатура представляют собой ценное сырье для ряда отраслей промышленности, в первую

очередь, целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), и имеют высокий потенциал для вторичной переработки.

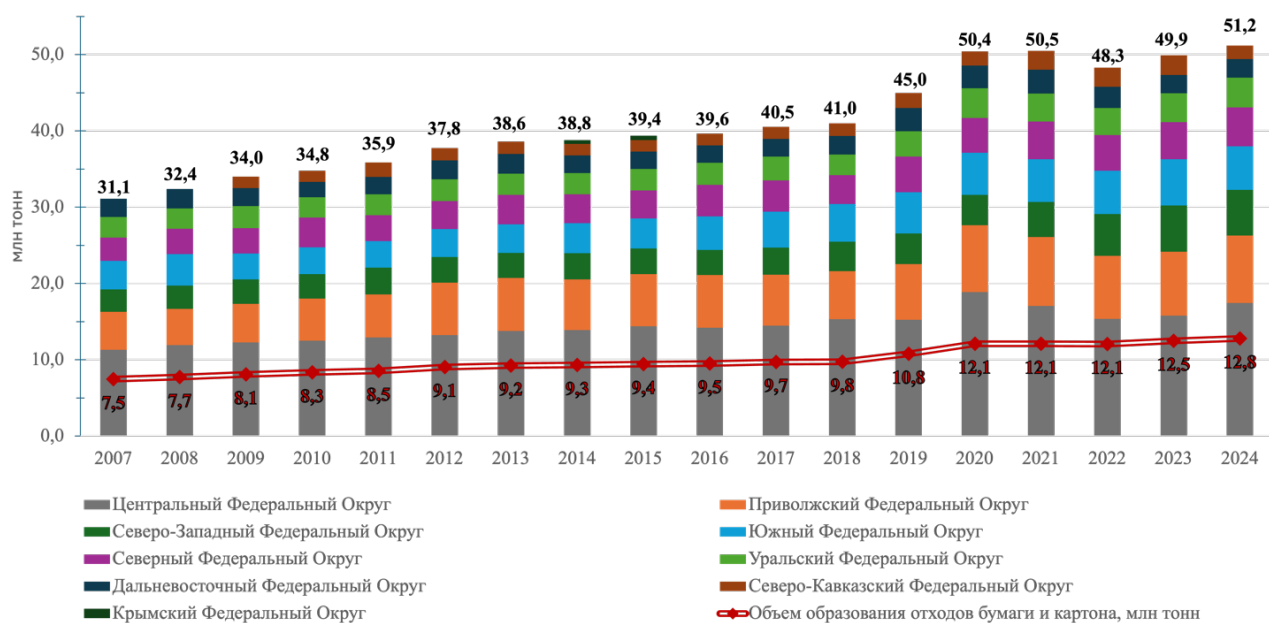
Во времена СССР функционировала отлаженная система вторичной переработки таких видов ресурсов из состава отходов потребления, как макулатура, стеклотара, металлолом. Сбор вторичных ресурсов осуществлялся у населения через разветвленную сеть пунктов приема, насчитывавшей более 5,5 тыс. пунктов. Полученное сырье направлялось на одно из 527 функционирующих в стране предприятий по переработке вторичных ресурсов. Существующая система позволила добиться уровня утилизации образующихся твердых коммунальных отходов (ТКО) около 25 % к 1989 году. Можно заключить, что уже в тот период развития страны вторичные ресурсы были основой обеспечения экономики страны необходимыми промышленностью сырьем и материалами [5].

Существовали отлаженные механизмы стимулирования различных субъектов экономических отношений к сбору вторичных ресурсов. Активно велись разработки, направленные на формирование комплексной системы обращения с отходами производства и потребления. Уже к началу 80-х годов XX века Всесоюзным проектно-конструкторским и технологическим институтом вторичных ресурсов (ВИВР) Госнаба СССР была сформирована концепция развития системы обращения с твердыми коммунальными отходами. Основой разработанной концепции развития сферы обращения с отходами являлась сортировка отходов и их последующее возвращение в экономический оборот в качестве вторичных материальных ресурсов [3].

После развала СССР фактически исчезла существовавшая система сбора и переработки вторичных ресурсов. Это явилось следствием нарушения, а в некоторых случаях полного разрыва существовавших производственных цепочек и тем, что независимые республики были сконцентрированы на решении проблем, возникших в экономике после развала Союза, что отодвинуло вопросы обращения с отходами на второй план. Следствием этих процессов явилось то, что за прошедшее с момента развала СССР и до начала масштабных реформ отрасли, произошедших в 2019 году, происходила постепенная деградация системы обращения с отходами в части утилизации отходов, сокращения объемов их образования и захоронения. Следует рассмотреть динамику основных показателей сферы обращения с твердыми коммунальными отходами в России (рис. 1).

Рассмотрев основные характеристики развития сферы обращения с отходами в России в 2007–2024 гг., можно отметить четкий тренд на рост количества образующихся отходов. Абсолютный рост объемов образования отходов потребления в рассматриваемом периоде составил более 20 млн тонн. Объем образованных у населения отходов в 2024 году почти на 65 % выше аналогичного показателя 2007 года. Основными факторами, оказавшими влияние на это, являются, в первую очередь, рост благосостояния населения и, как следствие, изменение профиля потребления, а также увеличение численности населения. Стоит отметить существенный рост объемов образования отходов в 2019–2020 гг. Причинами такого роста являются совершенствование системы учета потоков отходов, в рамках проводимой в стране «мусорной реформы», а также ограничения, связанные с пандемией COVID-19, повлекших за собой бурный рост онлайн-торговли.

Учитывая усредненный морфологический состав отходов, согласно которому до 25 % образующихся в процессе потребления отходов приходится на бумагу и картон, оценочный объем образования макулатурного сырья в составе ТКО в 2024 году может достигать 12,8 млн тонн [4, 7]. По итогам 2024 года, в процессе сортировки отходов, из общего объема ТКО было выделено лишь 586 тыс. тонн макулатурного сырья, что составляет лишь 4,6 % от годового объема образования. При этом в экономический оборот в качестве вторичных материальных ресурсов было возвращено только 6,9 тыс. тонн.



Год	Количество образованных твердых коммунальных отходов, млн тонн	Количество направленных на обработку твердых коммунальных отходов		Количество направленных на обезвреживание твердых коммунальных отходов		Количество направленных на утилизацию твердых коммунальных отходов		Количество направленных на захоронение твердых коммунальных отходов		Эффективность отбора вторичных ресурсов из состава твердых коммунальных отходов, %
		млн тонн	%	млн тонн	%	млн тонн	%	млн тонн	%	
2020	48,46	18,75	39%	1,49	3%	1,76	4%	36,10	74%	9%
2021	48,36	22,50	47%	2,59	5%	3,12	6%	44,48	92%	14%
2022	48,29	24,49	51%	1,14	2%	3,26	7%	37,53	78%	13%
2023	49,93	25,99	52%	1,27	3%	3,56	7%	38,76	78%	14%
2024	51,19	28,34	55%	1,12	2%	4,14	8%	40,89	80%	15%

Рисунок 1 – Инфографик: Динамика основных показателей сферы обращения с твердыми коммунальными отходами в России в 2007–2024 гг.

[Составлено автором на основе данных ЕМИСС и Росприроднадзора [8,9]]

Таким образом, из всего объема макулатурного сырья, образующегося в процессе потребления, в качестве вторичных ресурсов в экономику возвращается около 0,05 % бумаги и картона. Это позволяет говорить о несовершенстве применяемых технологий сбора, накопления и сортировки отходов. Большая часть макулатурного сырья теряет свои свойства в результате смешанного накопления отходов и становится непригодной для вторичного использования [8].

На сегодняшний день в России сформировались два функционирующих независимо друг от друга механизма возврата отходов бумаги и картона в хозяйственный оборот. Первый механизм реализуется через регионального оператора и преимущественно направлен на возвращение в оборот полезных фракций из состава отходов, образующихся у населения. Второй механизм реализуется частным сектором и направлен на возврат бумаги и картона, образующихся в офисах и торговых сетях. Именно второй механизм является наиболее эффективным, обеспечивая потребности целлюлозно-бумажной отрасли во вторичных ресурсах. Функционирующую в России систему возврата бумаги и картона в хозяйственный оборот можно описать следующей схемой (рис. 2).



Рисунок 2 – Система обращения с отходами бумаги и картона в России
[Составлено автором на основе данных ППК «РЭО» и ЕФГИС УОИТ]

Всего в реестре утилизаторов числится 16 организаций-переработчиков бумаги и картона, располагающих 65 объектами утилизации суммарной мощностью около 3,7 млн макулатурного сырья в год. Более 70 % всех мощностей ориентировано на переработку картонного сырья, являющегося основой при производстве тарного и упаковочного видов картона. Крупнейшие переработчики бумаги и картона сосредоточены в европейской части России. 70 % всех мощностей по переработке макулатурного сырья приходится на 5 крупнейших переработчиков: АО «Каменская БКФ» 750 тыс. тонн (Тверская обл.), ООО «Прикамский картон» 666,9 тыс. тонн (Пермский край), ООО «Алексинская БКФ» 426,2 тыс. тонн (Тульская обл.), ООО «Геопак» 386,4 тыс. тонн (Московская и Калужская обл.), АО «МЦБК» 385,1 тыс. тонн (Республика Марий Эл) [10, 12].

С помощью механизма возврата отходов бумаги и картона в хозяйственный оборот, реализуемого частным сектором, предприятия ЦБП обеспечивают себя необходимыми вторичными ресурсами. Как правило, это осуществляется посредством заготовки вторичных ресурсов, образующихся у крупных продуктовых и других торговых сетях, и реализуется предприятиям ЦБП по прямым контрактам. Второй контур системы обращения с отходами бумаги и картона, от населения, фактически не функционирует. Как было сказано ранее, через этот канал в экономический оборот в качестве вторичных материальных ресурсов было возвращено только 6,9 тыс. тонн бумаги и картона в 2024 году, что является ничтожно малым объемом по сравнению с общей потребностью отрасли в сырье. При этом общий потенциал данного канала заготовки макулатурного сырья составляет более 12 млн тонн в год.

Нормативно-институциональные основы обращения с отходами бумаги и картона в России обеспечиваются следующими ключевыми элементами:

- *Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»* является основополагающим и задает правовые основы обращения с отходами в России, в том числе необходимость их вовлечения в хозяйственный оборот.

- *Постановление Правительства РФ № 1156 «Правила обращения с ТКО»* устанавливает общие правила обращения с ТКО в России и закрепляет модель системы с региональным оператором во главе рассматриваемого процесса.

- *Территориальные и федеральная схемы обращения с отходами.* Во всех регионах разработаны территориальные схемы обращения с отходами, описывающими потоки отходов, маршруты вывоза и объекты инфраструктуры по обращению с ними. На федеральном уровне ответственным за интеграцию отдельных схем в единую национальную систему является Российский экологический оператор.

- *Федеральная государственная информационная система учета ТКО (ФГИС УТКО).* Национальная система учета потоков отходов, объединяющая в себе информацию об

источниках образования и местах накопления отходов, объектах инфраструктуры по обращению с отходами и количественных характеристиках отрасли [11].

– *Стандартизация качества макулатурного сырья.* Основным документом, вводящим классификацию вторичного бумажного и картонного сырья и регламентирующим технологическую совместимость, является государственный стандарт ГОСТ 10700–97 «Макулатура бумажная и картонная. Технические условия».

– *Механизм расширенной ответственности производителя (РОП).* Бумажная и картонная упаковка подпадает под механизм РОП, обязывающий производителей и импортеров соблюдать установленные нормативы утилизации товаров (упаковки) после их использования и утраты потребительских свойств.

– *Федеральная государственная информационная система учета отходов от использования товаров (ФГИС УОИТ) и Реестр утилизаторов отходов (РУО).* Предоставляет данные об образующихся отходах, содержащих вторичные ресурсы, перечень организаций-производителей и утилизаторов, а также реестр наличного оборудования по переработке вторичного сырья с указанием мощности.

Можно отметить, что существующая в России система обращения с отходами бумаги и картона обладает достаточной нормативно-правовой базой для ее функционирования. Ей свойственна высокая степень цифровизации, повышающая прозрачность учета объемов и существующих потоков отходов и вторичных ресурсов. Реализованы механизмы объединения отдельных субъектов сферы обращения с отходами в единую экосистему. Внедрены в практику экономические механизмы стимулирования производителей и импортеров бумажной и картонной продукции, способствующие повышению уровня ее утилизации или компенсации экономического ущерба, нанесенного окружающей среде в связи с их захоронением.

Несмотря на положительные стороны существующей системы обращения с отходами бумаги и картона, следует выделить ряд существенных недостатков. Ключевой элемент системы, крупнейшие потребители товаров и услуг в лице населения, фактически исключены из процессов возвращения бумажного и картонного сырья в хозяйственный оборот. Основной причиной является заведомо низкое качество сырья, делающее его непригодным для вторичной переработки. Что является следствием отсутствия национальной системы раздельного сбора и накопления отходов у населения. Несмотря на декларирование необходимости внедрения такой системы на федеральном уровне, практически такие проекты реализуются на региональном уровне в очень ограниченных масштабах, носящих характер пилотных проектов.

Другим немаловажным фактором является отсутствие развитого рынка вторичного сырья и материалов. Реализуемая ППК «РЭО» инициатива по формированию электронной торговой площадки вторичными ресурсами и сырьем еще не дала значимых результатов. Например, на 9 сентября 2025 года на площадке представлено только 9 лотов по продаже бумаги и картона суммарным объемом 720 тонн, что, например, составляет менее 1/100 % от потребностей крупнейшего переработчика макулатурного сырья – Каменской БФ. Следует отметить важность реализуемой инициативы для создания прозрачного централизованного рынка вторичных ресурсов и сырья, объединяющего все субъекты сферы обращения с отходами. Однако для успешной реализации необходимо обязательное участие всех экономических субъектов в деятельности торговой площадки и стимулирование перехода производителей продукции с использования первичных природных ресурсов на вторичные материальные ресурсы.

Проведенное исследование показало, что функционирующая в России система возвращения отходов бумаги и картона в хозяйственный оборот опирается на разветвленную нормативно-правовую базу. Проведена существенная работа по стандартизации и институционализации отрасли посредством развития института региональных операторов и федерального оператора по обращению с отходами. В соответствии с национальной политикой внедрения цифровых технологий в различные сферы жизнедеятельности общества удалось существенно повысить цифровой контроль и обеспечить прозрачность потоков отходов.

Реализуемые в стране реформы создают необходимую инфраструктуру по сортировке и переработке отходов, постепенно формируется спрос на вторичные ресурсы.

В то же время в России сохраняются существенные системные ограничения, препятствующие развитию системы обращения с отходами бумаги и картона. Наибольшую проблему представляет низкая вовлеченность населения в процессы раздельного сбора и накопления отходов, что ограничивает возможность наращивания объемов переработки бумажного и картонного сырья из состава ТКО ввиду потери необходимых характеристик и загрязненности. Отсутствуют механизмы экономического стимулирования домохозяйств и потребителей первичного сырья к развитию экономики замкнутого цикла. Российские регионы сильно дифференцированы по своей отраслевой структуре, профилю потребления населения, уровню развития инфраструктуры и пр., что требует более комплексного подхода к решению проблем в части вторичной переработки сырья и материалов из состава отходов, развития межрегиональной кооперации.

Среди дальнейших направлений развития российской системы обращения с отходами следует выделить экологическое просвещение и больший охват населения программами раздельного сбора и накопления отходов. Формирование новых экономических механизмов стимулирования всех субъектов сферы обращения с отходами к развитию принципов экономики замкнутого цикла. Формирование полноценного и прозрачного рынка вторичных ресурсов с понятным и прогнозируемым ценообразованием, развитие инструмента долгосрочных контрактов. Выстраивание новых производственных и логистических цепочек, ориентированных на переработку вторичных ресурсов взамен природных. Модернизация существующих производств с целью вовлечения в экономический оборот низкокачественной макулатуры.

Список литературы

1. Ветрова, М. А. Оценка уровня готовности субъектов РФ к развитию низкоуглеродной циркулярной экономики / М. А. Ветрова // Экономика устойчивого развития. – 2025. – № 1(61). – С. 50-60.
2. Долгова, О. И. Многообразие циркулярных моделей: анализ и классификация R-стратегий / О. И. Долгова // Друкеровский вестник. – 2025. – № 1(63). – С. 181-189.
3. Доронкина, И. Г. Эволюция технологических подходов при решении проблемы твердых бытовых отходов / И. Г. Доронкина, О. Н. Борисова // Сервис в России и за рубежом. – 2015. – Т. 9, № 4(60). – С. 102-111.
4. Дьячкова, О. Н. Система раздельного сбора твердых коммунальных отходов жителями многоквартирных домов / О. Н. Дьячкова // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 7. – С. 838-858.
5. Колдобская, Н. А. Проблемы переработки мусора в крупных столичных городах на постсоветском пространстве / Н. А. Колдобская // Социально-экономическая география: история, теория, методы, практика: сборник научных статей, Смоленск, 14–16 октября 2016 года. – Смоленск: Универсум, 2016. – С. 454-462.
6. Курбатова, А. И. Системный подход к оценке устойчивости системы управления твердыми коммунальными отходами: аналитический обзор / А. И. Курбатова, Е. В. Савенкова, А. В. Роцин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. – 2025. – № 1. – С. 321-331.
7. Никанорова, А. А., Лебедев, Д. А., Никаноров, П. А. и др. Перспективы извлечения вторичных материальных ресурсов из ТКО в Ленинградской области / А. А. Никанорова, Д. А. Лебедев, П. А. Никаноров и др. // Региональная экология. – 2019. – № 2(56). – С. 72-85.
8. Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере природопользования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rpn.gov.ru/> (дата обращения: 21.08.2025).

9. Официальный сайт Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 16.08.2025).
10. Официальный сайт Федеральной государственной информационной системы учета отходов от использования товаров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://uoit.mnr.gov.ru/public/lists/equipment_analytics (дата обращения: 01.09.2025).
11. Официальный сайт Федеральной государственной информационной системы учета ТКО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://utko.mnr.gov.ru/> (дата обращения: 01.09.2025).
12. Официальный сайт Публичной Правовой Компании «Российский Экологический Оператор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://reo.ru/> (дата обращения: 19.08.2025).

EXPLORING PAPER AND CARDBOARD WASTE MANAGEMENT IN RUSSIA AND THEIR RETURN TO THE ECONOMY

R.V. Kolesnikov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation
E-mail: roman_kolesnikov@hotmail.com

Abstract. The article briefly outlines the concept of sustainable development in the context of forming a new economic model based on the principles of the circular economy. A short historical overview of the development of the waste management system and the extraction of secondary resources is provided. The dynamics of quantitative indicators in the field of waste management in Russia are analyzed, including its main components. An assessment is given of the potential volume of paper and cardboard waste generated within consumer waste streams. The functioning mechanism of returning paper and cardboard waste into economic circulation in Russia is described and briefly characterized. The regulatory and institutional framework for paper and cardboard waste management in Russia is analyzed and systematized. The strengths and weaknesses of the current system, its existing limitations, and possible directions for the industry's further development are identified.

Keywords: waste, production and consumption waste, municipal solid waste (MSW), wastepaper, paper and cardboard, waste recycling, circular economy, closed-loop economy.

References

1. Vetrova, M.A. Ocenka urovnya gotovnosti sub"ektov RF k razvitiyu nizkouglerodnoj cirkulyarnoj ekonomiki / M.A. Vetrova // *Ekonomika ustojchivogo razvitiya*. 2025. no 1(61). P. 50-60. (in Russian)
2. Dolgova, O.I. Mnogoobrazie cirkulyarnyh modelej: analiz i klassifikaciya R-strategij / O.I. Dolgova // *Drukerovskij vestnik*. 2025. no 1(63). P. 181-189. (in Russian)
3. Doronkina, I.G. Evolyuciya tekhnologicheskikh podhodov pri reshenii problemy tverdyh bytovykh othodov // I.G. Doronkina, O.N. Borisova // *Servis v Rossii i za rubezhom*. 2015. Vol. 9. no 4(60). P. 102-111. (in Russian)
4. D'yachkova, O.N. Sistema razdel'nogo sbora tverdyh kommunal'nyh othodov zhitelyami mnogokvartirnyh domov / O.N. D'yachkova // *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. no 7. P. 838-858. (in Russian)
5. Koldobsкая, N.A. Problemy pererabotki musora v krupnyh stolichnyh gorodah na postsovet'skom prostranstve / N.A. Koldobsкая // *Social'no-ekonomicheskaya geografiya: istoriya, teoriya, metody, praktika: sbornik nauchnyh statej*, Smolensk, 14–16 oktyabrya 2016 goda. – Smolensk: Universum, 2016. P. 454-462. (in Russian)
6. Kurbatova, A.I. Sistemnyj podhod k ocenke ustojchivosti sistemy upravleniya tverdymi kommunal'nymi othodami: analiticheskij obzor / A.I. Kurbatova, E.V. Savenkova, A.V. Roshchin

- // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Social'no-ekonomicheskie nauki. 2025. no 1. P. 321-331. (in Russian)
7. Nikanorova, A.A. Perspektivy izvlecheniya vtorichnyh material'nyh resursov iz TKO v Leningradskoj oblasti / A.A. Nikanorova, D.A. Lebedev, P.A. Nikanorov i dr. // Regional'naya ekologiya. 2019. no 2(56). P. 72-85. (in Russian)
 8. Oficial'nyj sayt Federal'noj sluzhby po nadzoru v sfere prirodopol'zovaniya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rpn.gov.ru/> (data obrashcheniya: 21.08.2025).
 9. Oficial'nyj sayt Edinoj mezhvedomstvennoj informacionno-statisticheskoy sistemy (EMISS) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.fedstat.ru/> (data obrashcheniya: 16.08.2025).
 10. Oficial'nyj sayt Federal'noj gosudarstvennoj informacionnoj sistemy ucheta othodov ot ispol'zovaniya tovarov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://uoit.mnr.gov.ru/public/lists/equipment_analytics (data obrashcheniya: 01.09.2025).
 11. Oficial'nyj sayt Federal'noj gosudarstvennoj informacionnoj sistemy ucheta TKO [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://utko.mnr.gov.ru/> (data obrashcheniya: 01.09.2025).
 12. Oficial'nyj sayt Publichnoj Pravovoj Kompanii «Rossijskij Ekologicheskij Operator» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://reo.ru/> (data obrashcheniya: 19.08.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРОФАЗНОГО ИСТОЧНИКА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ СЕРОВОДОРОДА ДЛЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ю. А. Копыльцов*, Ю. Г. Добряков

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: kopyltsov@b10.vniim.ru*

Аннотация. Сероводород, а также другие серосодержащие газы (метил-, этилмеркаптаны, диметилсульфид, диметилдисульфид) являются характерными загрязняющими веществами в целлюлозно-бумажной промышленности. Ограничения содержания этих веществ в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе, воздухе населенных мест закреплены в подзаконных нормативно-правовых актах Российской Федерации. Из-за этого задача метрологического обеспечения измерений содержания сероводорода в газовых средах имеет высокую актуальность, а потребность в средствах метрологического обеспечения измерений содержания сероводорода в таких средах остаётся высокой. Помимо существующих средств поверки и градуировки рабочих средств измерений: стандартных образцов состава – газовых смесей в баллонах под давлением и источников микропотока, применимыми представляются парофазные источники газовых смесей. Но в настоящий момент данное направление для сероводорода не получило развития. На специально созданном газохроматографическом комплексе нами были проведены экспериментальные исследования, направленные на создание парофазных источников газовых смесей сероводорода на основе водных растворов сульфидов щелочных металлов. Рассмотрены возможности использования температурной зависимости молярной доли молекулярного сероводорода, образующегося в растворе при гидролизе солей, для создания газовых смесей сероводорода в широком диапазоне значений молярной доли сероводорода из одного парофазного источника (от 0,1 до 0,6 млн⁻¹) за счёт его термостатирования при различных значениях температуры. Выделены некоторые проблемы по изготовлению и аттестации таких парофазных источников газовых смесей сероводорода, предложены варианты применения таких парофазных источников для задач экологического контроля на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

Ключевые слова: ЦБК, экология, сероводород, контроль выбросов, средство измерения, парофазный анализ, газовая хроматография, градуировка, стандартные образцы.

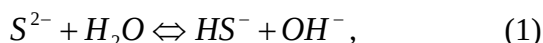
Сероводород (сернистый водород, сульфид водорода, дигидросульфид, H₂S, СВ) – ядовитый, бесцветный газ, тяжелее воздуха, с неприятным запахом и сладковатым вкусом, в воздухе находится в виде паров. Очень токсичен: имеет 1-й класс опасности согласно ГОСТ 12.1.007-76 (вещества «чрезвычайно опасные»). Этим обоснованы строгие ограничения его содержания в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе и воздухе населенных мест. Предельно допустимая концентрация (ПДК) СВ в воздухе рабочей зоны составляет 10 мг/м³, в смеси с углеводородами – не более 3 мг/м³ (согласно ГОСТ 12.1.005-88), максимальная разовая (не вызывающая негативных последствий в организме при долговременном контакте) массовая концентрация в атмосферном воздухе – не более 0,008 мг/м³, допустимая среднегодовая – не более 0,002 мг/м³. Наравне с другими серосодержащими соединениями (меркаптанами и органическими сульфидами) СВ является одним из характерных загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности [1]. В связи с этим разработка технических решений и средств для снижения выбросов СВ в окружающую среду имеет высокую значимость, и работы в этом направлении непрерывно ведутся [2]. Одновременно с этим актуальной является задача метрологического обеспечения измерений (МОИ) содержания СВ в воздухе – установления и применения

научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.² Важным элементом МОИ являются стандартные образцы (СО), с использованием которых проводится поверка, калибровка, испытания в целях утверждения типа рабочих средств измерений (СИ). Также СО применяются для градуировки рабочих СИ.

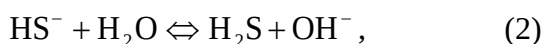
Для МОИ содержания СВ в атмосферном воздухе, а также в промышленных выбросах, представляющих собой влажные воздушные среды, требуются СО, схожие по составу и свойствам с реальными средами. В настоящее время подобное МОИ осуществляется с использованием СО состава газовых смесей в баллонах под давлением (ГСО-ПГС) [3] и источников микропотока на основе проницаемых полимерных трубок (ИМ) [4], применяемых в комплексе с термодиффузионными генераторами [5]. Приведенные выше средства МОИ обеспечивают воспроизведение молярной доли СВ в диапазоне от 1 млн⁻¹ (~1,4 мг/м³ при температуре T = 20 °С) в сухих газовых смесях, реже – от 0,1 млн⁻¹ (~0,14 мг/м³ при температуре T = 20 °С), и имеют некоторые ограничения в использовании. ГСО-ПГС имеют ограниченный срок годности (12 месяцев), требуют соблюдения строгих условий хранения, т.к. колебания температуры хранения провоцируют сорбцию СВ на стенках и порах покрытия баллона, а также требуют специализированных баллонов с сульфинертным покрытием (в основном, импортного производства). Так, в ходе исследований, проведенных Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии имени Д.И. Менделеева, из пяти исследованных видов баллонов отечественного производства, теоретически подходящих для изготовления высокоточных газовых смесей, только один вид признан пригодным для приготовления ГСО-ПГС СВ в статусе эталона сравнения [6].

Для решения задач МОИ молярной доли СВ ниже 1 млн⁻¹, помимо существующих решений, могут быть применены парофазные источники газовых смесей (ПИГС) на основе водных растворов сульфидов щелочных металлов (ПИГС-СВ). Выпускаемые в настоящее время ПИГС [7] в статусе рабочих эталонов 1-го разряда (в основном на органические вещества) основаны на буферном эффекте гетерогенных систем, где массовая концентрация целевого компонента в конденсированной фазе (активированный уголь или нелетучий растворитель) на 4–6 порядков превышает равновесную концентрацию вещества в газовой фазе над сорбентом. Такие ПИГС предназначены для воспроизведения одного заданного значения молярной доли (массовой концентрации) целевого компонента в пробе.

ПИГС-СВ базируется на ином подходе, основанном на химическом равновесии, где за счет обратимой химической реакции гидролиза в водном растворе возникают молекулярные формы целевого компонента (H₂S), распределение которого между конденсированной и газовой фазой устанавливается по термодинамическим законам. Принцип действия ПИГС-СВ основан на двухступенчатом процессе гидролиза этих солей в водных растворах и на следующих химических реакциях:



где S²⁻ и HS⁻ – соответственно сульфид- и гидросульфид-ионы, образующиеся в водном растворе в ходе гидролиза;



где H₂S – СВ в молекулярном виде, растворенный в растворе.

Степень гидролиза по первой ступени (1) составляет 90 %, а по второй (2) – 0,01 %, что приводит к появлению микроконцентрации молекулярной формы СВ в растворе. Поскольку реакции гидролиза обратимы, при удалении СВ из раствора инертным газом-экстрагентом, барботируемым через такой раствор, равновесие смещается вправо – в сторону образования новых количеств свободного СВ в соответствии с внешними условиями для данной системы. Этот процесс позволяет получить парогазовый поток с постоянной молярной долей СВ на уровне 1 млн⁻¹ и ниже, в присутствии паров воды. Сложность создания ПИГС-СВ обусловлена

²ГОСТ 8.820 – 2013. ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

существенным влиянием на воспроизведение молярной доли СВ в парогазовом потоке таких факторов, как состав вещества, температура системы, скорость потока газа-экстрагента и прочих влияющих факторов.

Равновесие зависит от температуры системы газ–насыщенный раствор и может быть сдвинуто в сторону СВ, что позволяет менять молярную долю СВ на выходе ПИГС в широком интервале только за счет термостатирования при разных температурах. Зависимость содержания СВ от массовой концентрации соли в водном растворе фиксируется за счет применения насыщенных растворов с присутствием твердой фазы, поскольку растворимость и, соответственно, максимальная массовая концентрация сульфида в растворе также определяется температурой.

Исследовательская установка создана на базе газового хроматографа Цвет-500М, аналитический блок которого с газовыми коммуникациями и термостатами колонки, детектора и газового крана управляется от ПК (рис. 1). Оцифрованный сигнал с детектора поступает на ПК, где и обрабатывается. Для определения СВ используется фотоионизационный детектор (ФИД) с криптоновым источником вакуумного ультрафиолета (ВУФ-лампой) с энергией 10,6 эВ, способной ионизировать и детектировать молекулы веществ, с более низким потенциалом ионизации.

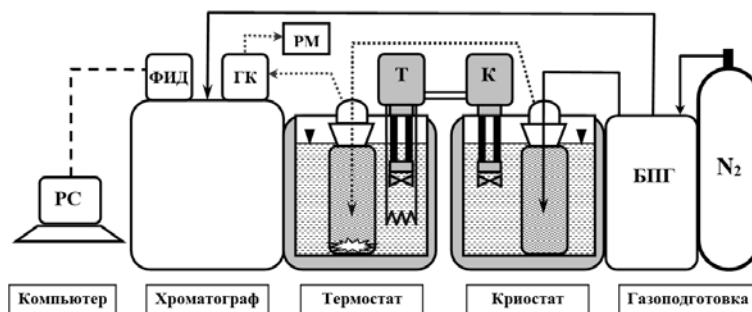


Рисунок 1 – Схема установки для хроматографических исследований ПИГС-СВ

Были использованы две схемы градуировки экспериментальной установки. В первой схеме использовались два ГСО-ПИГС: СВ в воздухе на уровне 20 млн^{-1} и смесь СВ, метил- и этилмеркаптанов в азоте на уровне 100 млн^{-1} . Оба ГСО-ПИГС разбавлялись чистым азотом с помощью генератора газовых смесей (тип ГГС-Р) для получения требуемой молярной доли СВ на выходе (рис. 2).

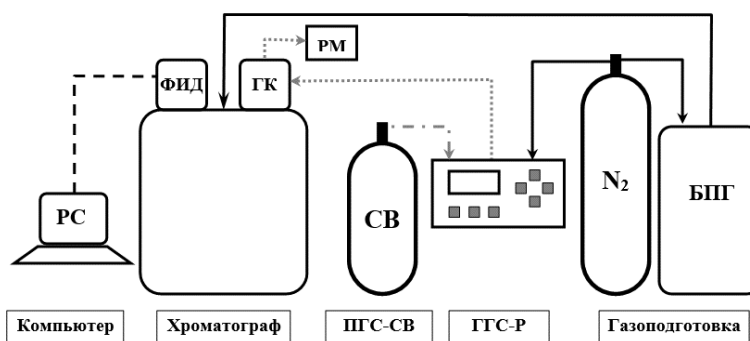


Рисунок 2 – Градуировка хроматографа с использованием ГСО-ПИГС и ГГС-Р

Во второй схеме градуировки экспериментальной установки (рис. 3) применялся ИМ СВ с малой производительностью ($0,065 \text{ мкг/мин}$ при 30°C), аттестованный с использованием динамической гравиметрической установки Magnetic Suspension Balance System (ВНИИМ).

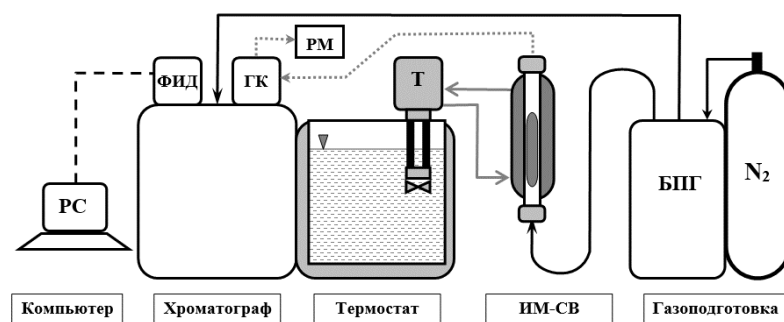


Рисунок 3 – Градуировка хроматографа с использованием ИМ

В ходе работы было подтверждено стабильное воспроизведение молярной доли СВ на уровне от 0,1 до 0,6 млн⁻¹ в потоке газа при нескольких фиксированных значениях температуры (10 °С, 15 °С, 20 °С), что свидетельствует о возможности создания ПИГС-СВ на динамической основе – газовой экстракции или статических – СО из насыщенных водных растворов сульфидов. Результаты исследований представлены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1 – Результаты исследования

Температура ПИГС, °С	Ср. знач. высоты пика, мВ	оСКО высоты пика, %	Ср. знач. площади пика, мВ·мин	оСКО площади пика, %	Молярная доля H ₂ S на выходе ПИГС, млн ⁻¹	Массовая концентрация H ₂ S на выходе ПИГС, мг/м ³
10	0,22	9,4	0,029	6,1	0,095	0,134
15	0,69	2,4	0,082	2,4	0,242	0,342
20	1,77	0,8	0,22	2,4	0,621	0,878

На рисунке 4 видно, что при отображении результатов в полулогаримфических координатах от обратной температуры, К, получается линейная зависимость, характерная для многих термодинамических величин, таких как коэффициент распределения, энтальпии реакций и т. п.

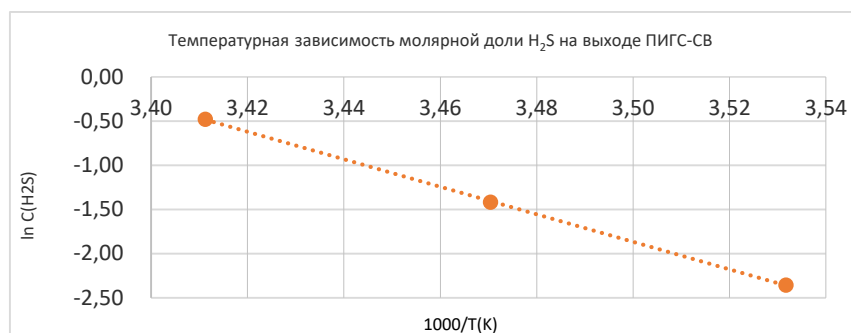


Рисунок 4 – Отображение результатов в полулогаримфических координатах от обратной температуры, К

Также в ходе исследований было установлено, что ФИД реагирует и на насыщенные пары воды, образующиеся при газовой экстракции из водных растворов сульфида натрия. Это позволило убедиться в разделении СВ и воды при хроматографическом анализе и рассчитать влажность получаемой газовой смеси – 84 % при 20 °С. В дальнейшем планируется подтвердить это значение титриметрическими измерениями, продолжить исследования с использованием доработанной конструкции экстрактора и подтвердить полученные данные прямым методом потенциометрического (аргентометрического) титрования, а также изучить концентрационную зависимость и ресурс ПИГС-СВ. Также планируется изучить возможность

применения ПИГС-СВ для выполнения измерений массовой концентрации СВ в водных стоках и растворах.

Таким образом, для выполнения измерений массовой концентрации СВ в различных газовых средах [8], где методиками выполнения измерений³ установлено требование применять ГСО-ПГС для градуировки газоанализаторов или хроматографов, на СВ может быть использован ПИГС-СВ в сочетании с жидкостным криотермостатом, либо в динамическом варианте для создания увлажненных газовых смесей с заданной концентрацией СВ в постоянном потоке газа, либо в статическом варианте в виде герметично закрытых флаконов с раствором сульфида определенной массовой концентрации для дозирования газовой смеси СВ с помощью специальных парофазных приставок в хроматограф.

Список литературы

1. Федяева, О. А. Промышленная экология: конспект лекций / О. А. Федяева. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 145 с.
2. Анискин, С. В. Эффект интенсивного окисления сероводорода дымовых газов содорегенерационного котла при производстве целлюлозы / С. В. Анискин, В. С. Куров // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2024. – № 5. – С. 188-202.
3. Особенности применения стандартных образцов-имитаторов для метрологического обеспечения газоаналитических средств измерений / А. В. Колобова [и др.] // Эталон. Стандартные образцы. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 55-64.
4. Патент № 2111460 РФ, G01F 13/00 (1995.01). Диффузионный источник микропотока газа (варианты) / Гуревич В. Г., Конопелько Л. А.; заявитель и патентообладатель Научно-производственное общество «Мониторинг». № 97106826/28; заявл. 22.04.1997; опубл. 20.05.1998.
5. Мальгинов, А. В. Передача единиц молярной доли и массовой концентрации газовых компонентов с помощью рабочих эталонов 1-го разряда на основе динамических генераторов газовых смесей / А. В. Мальгинов, А. А. Евдокимов, Е. В. Громова // Измерительная техника. – 2011. – №. 9. – С. 8-12.
6. Колобова, А. В. Исследования баллонов отечественных производителей в целях разработки и выпуска эталонов сравнения – стандартных образцов состава газовых смесей на основе диоксида серы, сероводорода, карбонилсульфида / А. В. Колобова, О. В. Фатина, А. В. Мальгинов // Эталон. Стандартные образцы. – 2025. – Т. 21, № 2. – С. 61-76.
7. Патент № 2153158 РФ, МПК G01N 7/00. Способ получения градуировочных парогазовых смесей / Конопелько Л. А., Котов Г. Н., Кустиков Ю. А.; заявитель и патентообладатель Научно-производственное общество «Мониторинг»; заявл. 21.10.1998; опубл. 20.07.2000.
8. Газохроматографическое определение летучих серосодержащих примесей в промышленных выбросах и водных растворах / А. Г. Витенберг, О. Г. Коваленко, В. И. Тома, Ю. Г. Добряков // Журнал аналитической химии. – 2007. – Т. 62, № 9. – С. 857-867.

USING OF A VAPOR-PHASE SOURCE OF HYDROGEN SULFIDE GAS MIXTURES FOR ENVIRONMENTAL CONTROL TASKS AT PULP AND PAPER INDUSTRY ENTERPRISES

Iu. A. Kopyltsov*, Yu. G. Dobryakov

The D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: kopyltsov@b10.vniim.ru*

³ Методика выполнения измерений массовой концентрации сероводорода, метилмеркаптана, диметилсульфида и диметилдисульфида в промышленных выбросах газохроматографическим методом. М-МВИ-116-09 (взамен М-МВИ-116-03) с изменением № 1 от 25.11.2024 г., ФР.1.31.2009.06497

Abstract. Hydrogen sulfide and other sulfur-containing gases are typical pollutants in the pulp and paper industry. The limits for these substances in work area air, atmospheric air, and industrial emissions are regulated by the legislation of the Russian Federation. The task of metrological support for measuring the content of hydrogen sulfide in various (gaseous or liquid) matrix is relevant and metrological support instruments for such measures are required. In addition to existing means of verification and calibration of working measuring instruments (gas mixtures standard in pressurized cylinders, permeation tubes) vapor-phase sources of gas mixtures could be usable. We conducted experimental studies on specially designed gas chromatographic complex to create vapor-phase sources of hydrogen sulfide gas mixtures based on aqueous solutions of alkali metal sulfides. The molecular hydrogen sulfide concentration depends on temperature dependence of temperature, this allows to create hydrogen sulfide gas mixtures with a wide range of molar fractions of hydrogen sulfide from a single vapor-phase source (from 0.1 to 100 ppm) by thermostating it. Specific problems related to the production and certification of such vapor-phase sources and opportunities of their application in environmental control tasks at pulp and paper industry enterprises are highlighted in the article.

Keywords: pulp and paper mill, ecology, hydrogen sulfide, emission control, measuring instrument, vapor phase analysis, gas chromatography, calibration, standard samples.

References

1. Fedyaeva O.A. *Promyshlennaya ekologiya: konspekt lektsiy* [Industrial Ecology: lecture notes] Omsk, OmGTU' Publ, 2007. 145 p. (In Russian)
2. Aniskin S.V., Kurov V.S. The Effect of Intensive Oxidation of Hydrogen Sulfide from Flue Gases of a Soda Recovery Boiler in the Production of Pulp. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2024. vol. 5. pp. 188-202
3. Kolobova A.V., Konopelko L.A., Sokolov T.B., Fatina O.V. Osobennosti primeneniya standartnykh obraztsov – imitatorov dlya metrologicheskogo obespecheniya gazoanaliticheskikh sredstv izmereniy [Features of the Use of Reference Materialsimitators for Metrological Support of Gas Analytical Measuring Instruments]. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023, vol 19 no. 3, pp. 55-64. (In Russian)
4. Gurevich V.G., Konopel'ko L.A. *Diffuzionnyy istochnik mikropotoka gaza (varianty)* [Diffusion source of gas microflow (variants)]. Patent RF no. 2111460. 1995. no. 97106826/28, 1998 (In Russian).
5. Mal'ginov A. V., Evdokimov A. A., Gromova E. V. Dissemination of units of mole fraction and mass concentration of gas components by means of first-grade working standards based on dynamic gas mixture generators. *Measurement techniques*. 2011. vol. 54. pp. 971–976
6. Kolobova A.V., Fatina, O.V., Malginov A.V. Issledovaniya ballonov otechestvennykh proizvoditeley v tselyakh razrabotki i vypuska etalonov sravneniya – standartnykh obraztsov sostava gazovykh smesey na osnove dioksida sery, serovodoroda, karbonilsul'fida [Research of Cylinders of Domestic Producers for the Purpose of Development and Production of Primary Reference Materials for the Composition of Gas Mixtures Based on Sulfur Dioxide, Hydrogen Sulfide, Carbonyl Sulfide]. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025. vol. 21 no. 2. pp. 61-76. (In Russian)
7. Konopel'ko L.A., Kotov G.N., Kustikov Yu.A. *Sposob polucheniya gradirovannykh parogazovykh smesey* [Method for obtaining calibration vapor-gas mixtures], Patent RF no. 2153158, 2000 (In Russian)
8. Vitenberg A.G., Kovalenko O.G., Toma V.I., Dobryakov Yu.G. Gas-chromatographic determination of volatile sulfur-containing impurities in industrial emissions and aqueous solutions. *Journal of analytical chemistry*. 2007. vol. 62 no. 9. pp. 857-867.

РОЛЬ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕНЕЗА

А. Б. Дягилева, А. И. Смирнова*, А. С. Пилецкая

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: smirnova_nasty87@mail.ru*

Аннотация. Лесопромышленный комплекс (ЛПК) является важным элементом мировой экономики, обеспечивающий сырьем различные производственные процессы, такие как производство бумаги, строительных материалов, мебели. Также лесопромышленный комплекс России можно рассмотреть, как природно-техническую систему, объединяющую в себе производственные элементы в виде технических объектов и окружающую среду в условиях видоизмененного ландшафта. Каждому элементу этой системы на всех этапах его развития свойственна определенная неоднородность, системность и наличие многих уровней организации специфического влияния на основные компоненты окружающей среды: ландшафт (как водный, так и лесной), водные экосистемы, воздух. В результате антропогенного воздействия ЛПК происходят изменения состава почв, грунтовых и подземных вод, угнетение и снижение общего биоразнообразия экосистемы. Глубина преобразования ландшафта на современном этапе развития техногенеза может существенно различаться по регионам. Это обстоятельство позволяет прогнозировать уровень устойчивого развития регионов, которые могут иметь различные стартовые позиции. Понимание этапности техногенеза и систематизация степени преобразованности ландшафта на основе обобщенных подходов устойчивости экосистем позволит изменить механизм техногенеза с деградационного на стадию управляемого с меньшими экологическими потерями, в том числе при реализации принципов социально-ориентированной циркулярной экономики.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, техногенез, механизмы техногенеза, окружающая среда.

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) играет роль основного потребителя сырья и регулятора рынка лесопродукции и определяет основные тенденции развития большинства регионов Российской Федерации. Отрасль объединяет лесозаготовку, деревообработку, целлюлозно-бумажную промышленность и биоэнергетику, продукция ЛПК используется в разных областях народного хозяйства. ЛПК может рассматриваться как элемент сложившейся линейной экономики, поскольку обеспечивает рабочие места и вклад в ВВП. С точки зрения перехода к экономике замкнутого цикла ЛПК может являться примером для организации безотходного производства. Например, вторичная переработка древесных и бумажных отходов позволяет снизить нагрузку на природу и повысить рентабельность производств. Таким образом, область данного исследования относится к систематизации фундаментальных научных знаний в области изменения составных частей современного природно-технического комплекса.

Также лесопромышленный комплекс России можно рассмотреть, как природно-техническую систему, объединяющую в себе производственные элементы в виде технических объектов и окружающую среду в условиях видоизмененного ландшафта. Однако необходимо отметить влияние ЛПК на качество окружающей среды через вырубку лесов, загрязнение воздуха, грунтовых и подземных вод, угнетение и снижение общего биоразнообразия экосистемы [1]. Сегодня крупные предприятия ЛПК отнесены к 1 категории воздействия на окружающую среду и должны получать комплексные экологические разрешения (КЭР).

Техногенез в настоящее время является ведущим фактором формирования техносферы, состоящей из отдельных природно-технических систем (ПТК). Актуальность изучения процессов техногенеза обусловлена применимостью процессов управления для

реализации устойчивого состояния биогеоценоза, в том числе с учетом ландшафтно-экологических условий и инженерно-технических устройств. Целью управляемых природно-технических систем является определение квоты воспроизводимых природных ресурсов, которыми могут воспользоваться ПТК в условиях сохранения устойчивого развития.

В общем случае естественные ландшафтно-геохимические процессы в зоне влияния ЛПК можно разделить на четыре группы [2]: биогенез, гидрогенез, гуматогенез, хелатогенез. Основные процессы и последствия влияния ЛПК на экосистему в целом при вырубке лесов для производственных целей на основе анализа литературы и практической экспертной деятельности сведены в таблицу.

Таблица – Влияние ЛПК на естественные ландшафтно-геохимические процессы

Виды ландшафтно-геохимических процессов	Описание процесса	Последствия влияния ЛПК
Биогенез	процесс, обусловленный деструкцией и накоплением органического вещества в почвах, миграцией и накоплением химических компонентов	- изменение биогенной миграции, смена сообществ животных, насекомых и микроорганизмов; - изменение количества и качества опада, формирующего лесную подстилку; - изменение цикла CO_2 , соотношения C/N.
Гидрогенез	совокупность геохимических и минералогических превращений, вызванных проникновением воды по трещинам с поверхности в земную кору	- избыток количества влаги на поверхность почвы; - увеличение склонового стока; - эрозионные процессы (смыл и снос почвы, оврагообразование и пр.); - снижение качества воды в поверхностном водном источнике из-за нарушения гидрологического режима формирования подземного стока, а также увеличение количества обменного кальция, углерода и азота.
Гуматогенез	накопление в почвах наиболее устойчивых органоминеральных соединений	- уменьшение количества опада, в результате чего происходит перераспределение количества углерода в составе фульвокислот и гуминовых веществ в органогенных слоях горизонта при увеличении их окисленности.
Хелатогенез	формирование в нижних горизонтах почвы ненасыщенных подвижных органоминеральных соединений железа, алюминия, марганца с вольвокислотами и бурыми гуминовыми кислотами.	- ускоренный процесс накопления ненасыщенных комплексов органоминеральных структур, в состав которых входят алюмо- и железогумусовые кислоты.

Техногенная трансформация окружающей среды на современном этапе приобретает глобальные масштабы. Существует несколько его различных форм, которые в совокупности

с их проявлениями и последствиями следует рассматривать как отдельные экологические механизмы данного явления:

- Деградационный механизм техногенеза сопровождается утратой хозяйственного, рекреационного и видеоэкологического потенциалов, а также снижением биоразнообразия окружающей среды.

- Модифицирующий механизм техногенеза подразумевает искусственное разведение или целенаправленную акклиматизацию новых видов и их вселение в процессе технической деятельности, а также техногенную инвазию. Так, с одной стороны, в результате модифицирующего техногенеза могут быть созданы условия, благоприятные для развития определенных групп организмов, улучшающих экологическую ситуацию или даже обуславливающих саму возможность их существования. Например, вселение теплолюбивых видов рыб-бентософагов в водоемы-охладители АЭС. С другой стороны, техногенная инвазия приводит к вытеснению видов-аборигенов и возникновению новых видов биопомех и биоповреждений.

- Креативный механизм техногенеза заключается в создании новых природно-антропогенных объектов (например, водохранилищ), которые часто становятся важным компонентом региональных и межрегиональных природно-технических систем.

- Поддерживающий механизм техногенеза, основанный на работе целенаправленно создаваемых инженерно-технических систем и устройств, способных при наступлении неблагоприятной ситуации поддерживать благополучное экологическое состояние участка окружающей среды (инженерно-экологическое обустройство). Примером может служить искусственная аэрация водных объектов в периоды ухудшения кислородного режима.

- Управляющий механизм техногенеза – включение в природно-техническую систему объекта, способного регулировать ее состояние, так называемого экологического регулятора.

Все эти механизмы техногенеза сосуществуют одновременно, нередко на граничащих участках или даже в пределах одного и того же участка. В том случае, если воздействие обуславливает деградационный механизм техногенеза, его далеко не всегда можно прекратить. Причем следует отметить, при получении предприятиями КЭР не останавливает этот процесс, но способствует созданию нового уклада социально-экологического природопользования через программы повышения экологической эффективности. В ряде случаев более реальным является переход на другой тип техногенеза, смягчающий негативные последствия. Например, при сбросе в водный объект хозяйственно-бытовых стоков, вызывающих заморы (деградационный механизм), более действенной мерой может являться не запрет загрязнения водоема, а организация его аэрации (поддерживающий механизм). Другим решением может быть создание прибрежного биофильтра из тростниковых зарослей, задерживающих загрязнители (модифицирующий механизм).

Таким образом, в результате исследования литературы и полевых работ установлены характерные признаки техногенеза, которые определяются основными механизмами существующей системы и способствуют пониманию процессов регулирования биогеохимических процессов при функционировании ЛПК в условиях циркулярной экономики. Природообустроительный техногенез включает всю совокупность действий, входящих в состав поддерживающего и управляющего механизмов техногенеза. Одним из наиболее значимых способов его целенаправленной реализации является экологическая оптимизация, т. е. усиление позитивных аспектов деятельности технических объектов, оказывающих значимое воздействие на окружающую среду, при одновременном снижении негативных. Установлено, что глубина преобразования ландшафта под влиянием технических систем существенно различается по регионам. Это обстоятельство позволяет дифференцированно подходить к разработке алгоритмов устойчивого развития регионов, которые могут иметь различные стартовые позиции. Экологическая оптимизация инженерно-технических объектов является основой альтернативной стратегии охраны окружающей среды, которая в современных условиях способна на практике обеспечить реализацию концепции устойчивого развития.

Список литературы

1. Очистка и рекуперация промышленных выбросов / под общ. ред. В. Ф. Максимова, И. В. Вольфа. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 416 с.
2. Дягилева, А. Б. Лесопромышленный комплекс и процесс техногенеза / А. Б. Дягилева, А. И. Смирнова, П. И. Ленивец // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2025. – № 1. – С. 177-196. – URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-177-196>.

THE ROLE OF THE TIMBER INDUSTRY IN THE SYSTEM OF REGULATION OF TECHNOGENESIS

A. B. Diagileva, A. I. Smirnova*, A. S. Piletskaya

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: smirnova_nasty87@mail.ru*

Abstract. The timber industry is an important element of the global economy, providing raw materials for various production processes, such as the production of paper, building materials, and furniture. The Russian timber industry can also be considered as a natural and technical system that combines production elements in the form of technical facilities and the environment in a modified landscape. At all stages of its development, each element of this system is characterized by a certain heterogeneity, consistency, and the presence of many levels of organization of specific effects on the main components of the environment: landscape (both aquatic and forest), aquatic ecosystems, and air. As a result of the anthropogenic impact of LPC, changes in the composition of soils, groundwater and groundwater occur, as well as the suppression and reduction of the overall biodiversity of the ecosystem. The depth of landscape transformation at the present stage of technogenesis development can vary significantly by region. This circumstance makes it possible to predict the level of sustainable development of regions that may have different starting positions. Understanding the stages of technogenesis and systematizing the degree of transformation of the landscape based on generalized approaches to ecosystem sustainability will make it possible to change the mechanism of technogenesis from a degraded to a manageable stage with less environmental losses, including when implementing the principles of a socially oriented circular economy.

Keywords: timber industry, technogenesis, mechanisms of technogenesis, environment.

References

1. *Ochistka i rekuperaciya promyshlennyh vybrosov* [Purification and recovery of industrial emissions] / pod obshch. red. V. F. Maksimova, I. V. Vol'fa. M.: Lesn. prom-st', 1989, 416 p. (In Russian).
2. Dyagileva, A.B. Lesopromyshlennyy kompleks i process tekhnogeneza [Timber industry and the process of technogenesis] / A.B. Dyagileva, A.I. Smirnova, P.I. Lenivcev // *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal* [Lesnoy Zhurnal-Russian Forestry Journal], 2025. no 1. pp. 177-196. URL: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-177-196>. (In Russian).

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ОТЩЕПА ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. С. Янченко*, Р. В. Колесников

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: nstsnck@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается проблема утилизации отходов деревообработки на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности, в частности, отщепа – мелкой фракции древесины, образующейся при подготовке сырья. Накопление данного вида отходов приводит к значительным экономическим издержкам, связанным с их сбором, транспортированием и размещением на полигонах, а также наносит экологический и экономический ущерб окружающей среде. В работе проведен анализ доступных технологических решений по переработке отщепа с учетом экологической и экономической эффективности. На основе анализа технологических решений подробно рассмотрены 3 ключевых направления: возврат в производство для переработки в термомеханическую массу, производство топливных пеллет и изготовление строительных материалов (арболит). Для каждого варианта проведен анализ капитальных и операционных затрат, рассчитан потенциальный экономический эффект и сроки окупаемости. Показано, что переработка отщепа является стратегически важным направлением для российских ЦБК, позволяющим не только сократить издержки, но и создать новую продукцию с добавленной стоимостью.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП), отщеп, экология, термомеханическая масса, топливные пеллеты, арболит, переработка отходов деревообработки, экономика замкнутого цикла, утилизация отходов.

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) занимает важное место в структуре экономики России, являясь одной из базовых отраслей лесопромышленного комплекса страны. Социально-экономическое значение отрасли обусловлено существенной долей как в структуре ВВП России в целом (около 1 %), так и в структуре промышленного производства страны (около 3 %). Предприятия ЦБП являются важным источником налоговых поступлений Северо-Западного федерального округа (СЗФО), формируют занятость, что особенно важно для ряда городов СЗФО, экономика и социальная стабильность в которых во многом зависит от функционирования предприятий ЦБП (Светогорск, Коряжма, Кондопога). Среди других факторов, обуславливающих значимость отрасли для экономики России, стоит отметить ее экспортный потенциал, что способствует притоку валютной выручки в экономику страны и обеспечение сырьем и продукцией множества смежных отраслей (упаковочные производства, издательская деятельность, офисные принадлежности и др.).

Являясь высокотехнологичной, ресурсозатратной и значительно автоматизированной отраслью, производственная деятельность предприятий ЦБП сопряжена с образованием существенного объема отходов. Одним из основных видов образующихся отходов являются древесные отходы (кора, опилки, обрезки, отсеvy и др.). Большая часть образующихся отходов утилизируется на производстве, образуя замкнутые циклы производства. Однако такой вид отходов, как отщеп, представляющий собой мелкодисперсную фракцию древесины, образующуюся в результате механического повреждения круглого лесоматериала при его транспортировании, разгрузке, сортировке и окорке, является сложно утилизируемым [2].

Причина проблем с утилизацией образующегося на производстве отщепа связана с его морфологическим составом. Он представляет из себя гетерогенную смесь, состоящую из частиц древесины размером 10–50 мм, коры, минеральных включений (песок, камни) и прочих примесей [1]. Традиционно отщеп рассматривается как некондиционный материал, непригодный для основного производства целлюлозы и бумаги, и подлежит размещению на

полигонах захоронения отходов. Среднегодовой объем образования отщепа на предприятиях ЦБП может достигать сотен тонн. Например, среднегодовой объем образования отщепа на предприятии ООО «Карелия Палп», в городе Кондопога, составляет 320 тонн отщепа в год. Размещение такого объема отходов на полигонах влечет за собой прямые экономические потери, включающие затраты на ручной сбор, транспортирование и оплату размещения отходов, которые могут достигать 5,3 млн руб. в год. Помимо экономических потерь, это создает серьезные экологические риски, связанные с выбросами метана в процессе разложения и загрязнением почв и водных ресурсов.

В условиях глобального тренда на устойчивое развитие и рациональное использование природных ресурсов, а также в связи с ужесточением российского природоохранного законодательства, проблема переработки отщепа приобретает особую актуальность. Внедрение технологий его утилизации и рециклинга позволяет трансформировать экологическую проблему в экономические возможности, снизить зависимость предприятий ЦБП от первичных природных ресурсов и будет способствовать формированию новых источников прибыли. Целью данной работы является комплексный анализ технологически реализуемых и экономически целесообразных направлений переработки отщепа для российских ЦБП [3].

В рамках проходившей на базе Высшей школы технологии и энергетики ФГБОУ ВО СПбГУПТД «Инновационной недели-2025», проектными командами был проведен анализ современных практик и решений в области рециклинга отходов ЦБП, который позволил выделить три наиболее перспективных направления переработки отщепа, обладающих своими технологическими особенностями и экономическими преимуществами.

1. *Производство термомеханической массы (ТММ)*. Возврат отщепа в технологический процесс для производства термомеханической массы является наиболее логичным с точки зрения замкнутого цикла производства. ТММ представляет собой полуфабрикат для изготовления бумаги и картона, получаемый путем механического размола предварительно пропаренной щепы. Технологическая цепочка включает в себя:

- этап очистки сырья от минеральных и металлических примесей (с использованием вибрационных грохотов и магнитных сепараторов);
- сушку сырья до влажности 8–12 %;
- измельчение до требуемой фракции;
- термическую обработку в пропарочных камерах;
- финальный размол на рафинерах.

Как показали расчеты, из 320 тонн образующегося отщепа после очистки можно получить около 280 тонн товарной ТММ. Капитальные затраты на организацию такой линии оцениваются примерно в 4,9 млн руб., а годовые эксплуатационные расходы в 1,8 млн руб. Полученную массу предприятие может использовать для собственных нужд, снижая закупки дорогостоящего волокна, или реализовывать на сторону, в качестве полуфабриката. Данное решение, хотя и требует значительных первоначальных вложений, является стратегическим, так как повышает ресурсоэффективность и автономию комбината.

2. *Производство топливных гранул (пеллет)*. Является высокорентабельным направлением переработки отщепа. Это решение особенно актуально для переработки фракций, не пригодных для возврата в производство из-за высокого содержания коры или загрязнений. Технология включает следующие стадии:

- мелкое дробление исходного сырья;
- сушка полученной массы;
- гранулирование массы под высоким давлением;
- охлаждение и просеивание готовой продукции.

Ключевым преимуществом является возможность использования всего объема отходов, включая наименее качественные [4]. Согласно расчетам, инвестиции в организацию мини-завода по производству пеллет составляют около 2 млн руб. При годовом объеме переработки в 320 тонн и расчетном выходе готовой продукции, равном 288 тонн, годовая выручка от

реализации пеллет по рыночным ценам может достигать 5,13 млн руб. при операционных расходах в 1,7 млн руб. Таким образом, чистая годовая прибыль оценивается в 3,43 млн руб., а срок окупаемости проекта не превышает 7 месяцев [5].

Высокая экономическая эффективность обусловлена растущим спросом на биотопливо как на внутреннем, так и на внешнем рынках, а также возможностью использования пеллет для собственных нужд предприятия (например, на ТЭЦ), что обеспечивает значительную экономию на покупке ископаемого топлива (мазута или природного газа). Данное направление активно развивается в странах Скандинавии и Северной Америки, где пеллетные заводы, интегрированные в ЦБК, являются стандартом и вносят существенный вклад в энергетическую независимость и углеродную нейтральность предприятий [6].

3. *Производство строительных материалов.* Была изучена возможность производства арболита, представляющего из себя легкий бетон на основе цементного вяжущего и органического заполнителя, например, древесной щепы. Использование отщепа после его очистки и дробления до размеров 15–20 мм позволяет создавать конструкционно-теплоизоляционные блоки с низкой теплопроводностью [7]. Из 320 тонн ежегодно образующегося у предприятия отщепа, после очистки и сушки, можно произвести около 800 м³ арболита. На российском рынке малоэтажного строительства сформировался устойчивый спрос на предлагаемый строительный материал, показывающий среднегодовой темп роста в диапазоне 10–15 %. Присущие ему экологичность, практичность и относительно невысокая стоимость сделали его востребованным материалом для строительства хозяйственных построек, дачных домов и бань.

Капитальные затраты на организацию линии по производству арболита оцениваются в 2,3 млн руб., эксплуатационные расходы – 2,9 млн руб. Прогнозная величина выручки от продажи арболита составляет 5,2 млн руб., а ожидаемая чистая прибыль – 2 млн руб. Несмотря на то, что капитальные затраты на организацию производства арболита сопоставимы с затратами на реализацию альтернативных решений и узость рынка сбыта, данное решение обладает высоким инновационным потенциалом. Оно позволяет предприятию диверсифицировать свою деятельность, освоить новое направление деятельности и внести вклад в развитие зеленого строительства в России. Мировой опыт показывает успешную практику использования древесных отходов в производстве строительных композитов. Подобные проекты реализуются в Канаде и странах Европейского Союза, где поддерживаются высокие стандарты энергоэффективности зданий и экологичности строительных материалов.

Проведенный в ходе исследования анализ целесообразности переработки отходов отщепа, образующихся на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности, позволил определить ряд экономически эффективных направлений их переработки с учетом экологической составляющей. Полученные результаты свидетельствуют о том, что трансформация данного вида отходов из экологической проблемы в ценный ресурс является не только возможной, но и финансово привлекательной. Реализация одного из предлагаемых решений позволяет достичь существенного экономического эффекта, выраженного в сокращении затрат на размещение отходов, формировании дополнительных источников дохода и реализации принципов бережливого производства и экономики замкнутого цикла.

Наиболее значимым практическим результатом является формирование конкретных технологических решений для предприятий ЦБП, функционирующих в различных условиях внутренней и внешней среды и имеющих различные стратегические ориентиры развития. Для комбинатов, ориентированных на углубление переработки и укрепление сырьевой независимости, оптимальным решением является организация производства термомеханической массы. Предприятия, стремящиеся к быстрой окупаемости инвестиций и диверсификации энергетических источников, могут рассмотреть вариант производства топливных пеллет, характеризующийся минимальными сроками возврата вложенных средств. Для компаний, заинтересованных в освоении новых рынков перспективным направлением, представляется производство арболита, обладающего значительным потенциалом в условиях растущего спроса на экологичные строительные материалы.

Выбор конкретного технологического решения во многом определяется региональной спецификой и сложившейся рыночной конъюнктурой. При оценке целесообразности реализации рассмотренных решений по переработке отщепа следует руководствоваться объективными факторами внутренней и внешней среды предприятия. Развитие логистической инфраструктуры, наличие потенциальных потребителей продукции и государственная поддержка проектов в области переработки отходов могут стать дополнительными факторами, влияющими на конечный выбор технологического решения. Реализация рассмотренных проектов позволит не только улучшить экономические показатели отдельного предприятия, но и внести существенный вклад в решение общепромышленных задач по снижению воздействия на окружающую среду и переходу к модели циркулярной экономики.

В заключение стоит отметить, что представленные в работе технологические решения обладают реальными перспективами внедрения в деятельность целлюлозно-бумажных предприятий страны. Для российских предприятий целлюлозно-бумажной отрасли, стремящихся к повышению эффективности и устойчивости, внедрение технологий переработки отщепа является необходимым шагом в рамках перехода к модели циркулярной экономики, соблюдению принципов бережливого производства, снижению экономического ущерба, наносимого окружающей среде и соответствия национальному экологическому законодательству.

Список литературы

1. Баруздин, А. А. Перспективы рециклинга в строительстве для создания инновационных композитных материалов / А. А. Баруздин, Л. В. Закревская // Умные композиты в строительстве. – 2023. – № 3. – С. 29-54.
2. Волков, А. Р. Инновационный потенциал экономических систем и механизмы трансфера устойчивых технологий / А. Р. Волков, А. Ю. Смирнов // Экономика, предпринимательство и право. – 2025. – Т. 15, №3. – С. 1417-1432.
3. Дашкевич, А. С. Отходы ЦБП как фактор риска устойчивости региона / А. С. Дашкевич, Н. Г. Занько // Проблемы и перспективы устойчивого развития промышленности в XXI веке: от теории к практике: материалы Международной студенческой конференции, Санкт-Петербург, 18 апреля 2024 года. – СПб.: СПбГЛУ им. С. М. Кирова, 2024. – С. 78-81.
4. Совместная переработка в топливные брикеты твердых древесных отходов и отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры / В. А. Рыжиков, Э. Л. Аким, О. А. Ерохина, А. А. Пекарец // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы V Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2023 года. – СПб.: СПбГУПТД, 2023. – С. 85-89.
5. Оценка целесообразности переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в топливные гранулы / М. А. Рыкова, М. С. Гончугова, А. А. Черменская, Е. В. Кабан, В. В. Козлов // Молодежь, образование и наука XXI века: материалы научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвящённой памяти заслуженного деятеля науки РФ, профессора В.С. Соминского, Санкт-Петербург, 18 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2024.
6. Федорук, С. С. Использование инновационных комбинированных топливных брикетов в энергетике / С. С. Федорук, В. А. Рыжиков // Энергетика и автоматизация в современном обществе: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей, Санкт-Петербург, 11 мая 2023 года. Том. Часть I. – СПб.: СПбГУПТД, 2023. – С. 234–239.
7. Хасаншин, Р. Р. Физико-механические характеристики цементно-стружечных композитов, полученных из отходов древесины, прошедшие процесс экстракции / Р. Р. Хасаншин, И. И. Сахипов, К. В. Валеев // Лесозаготовка и комплексное использование древесины. – 2023. – С. 127–132.

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC FEASIBILITY OF PROCESSING WOOD CHIP WASTES FROM THE PULP AND PAPER INDUSTRY

A. S. Yanchenko*, R. V. Kolesnikov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail: nstsnknk@gmail.com*

Abstract. The article addresses the problem of wood-processing waste utilization at pulp and paper industry enterprises, with a particular focus on wood chips — a fine fraction of wood generated during raw material preparation. The accumulation of this type of waste leads to significant economic costs associated with collection, transportation, and landfilling, while also causing environmental and economic damage. The study analyzes available technological solutions for wood chip processing, taking into account both environmental and economic efficiency. Based on the analysis, three key directions are examined in detail: reintegration into production for thermomechanical pulp, fuel pellet manufacturing, and the production of building materials (arbolite). For each option, capital and operating costs are assessed, alongside potential economic benefits and payback periods. The results demonstrate that wood chip processing is a strategically important direction for Russian pulp and paper mills, enabling not only cost reduction but also the creation of new value-added products.

Keywords: pulp and paper industry (PPI), wood chips, ecology, thermomechanical pulp, fuel pellets, wood concrete (arbolite), woodworking waste recycling, circular economy, waste utilization.

References

1. Baruzdin, A.A. Perspektivy retsiklinga v stroitel'stve dlya sozdaniya innovatsionnykh kompozitsionnykh materialov / A.A. Baruzdin, L.V. Zakrevskaya // *Umnye kompozity v stroitel'stve*. 2023. No 3. P. 29-54. (in Russian)
2. Volkov, A.R. Innovatsionnyy potentsial ekonomicheskikh sistem i mekhanizmy transfera ustoychivyykh tekhnologiy / A.R. Volkov, A.Yu. Smirnov // *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo*. 2025. Vol. 15, no 3. P. 1417-1432. (in Russian)
3. Dashkevich, A.S. Otkhody TsBP kak faktor riska ustoychivosti regiona / A.S. Dashkevich, N.G. Zan'ko // *Problemy i perspektivy ustoychivogo razvitiya promyshlennosti v XXI veke: ot teorii k praktike: materialy mezhdunarodnoy studencheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 18 aprelya 2024 goda. SPB: SPBGLU im. S.M. Kirova, 2024. P. 78-81. (in Russian)
4. Sovmestnaya pererabotka v toplivnye brikiety tverdykh drevesnykh otkhodov i otkhodov kartonno-bumazhnoy makulatury, sodержashchikh tsellyulozu i sinteticheskie polimery / V.A. Ryzhikov, E.L. Akim, O.A. Erokhina, A.A. Pekarets // *Sovremennaya tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost'. Aktual'nye zadachi i perspektivnye resheniya: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov TsBP*, Sankt-Peterburg, 13–14 noyabrya 2023 goda. SPB: SPbGUPTD, 2023. P. 85–89. (in Russian)
5. Ocenka celesoobraznosti pererabotki otkhodov tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti v toplivnye granuly / M.A. Rykova, M.S. Gonchugova, A.A. Chermenskaya, E.V. Kaban, V.V. Kozlov // *Molodezh', obrazovanie i nauka XXI veka: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i aspirantov, posvyashchyonnoy pamyati zaslužennogo deyatelya nauki RF, professora V.S. Sominskogo*, Sankt-Peterburg, 18 aprelya 2024 goda. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologiy i dizajna, 2024. (in Russian)
6. Fedoruk, S.S. Ispol'zovanie innovatsionnykh kombinirovannykh toplivnykh briketov v energetike / S.S. Fedoruk, V.A. Ryzhikov // *Energetika i avtomatizatsiya v sovremennom obshchestve: materialy VI vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii obuchayushchikhsya i prepodavateley*, Sankt-Peterburg, 11 maya 2023 goda. Tom Chast' I. SPB: SPbGUPTD, 2023. P. 234-239. (in Russian)
7. Khasanshin, R.R. Physical and mechanical characteristics of cement-bonded particle composites obtained from wood waste that have undergone the extraction process / R.R. Khasanshin, I.I. Sakhipov, K.V. Valeev // *Forest exploitation and complex use of wood*. 2023. P. 127-132. (in Russian)

МОДУЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЛЕСНЫХ МАШИН НА ПНЕВМАТИКАХ СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ф. В. Свойкин¹, К. В. Россихин^{2*}, И. С. Фролов¹, Е. И. Игнатова¹

¹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ),
Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
(СПбГЛТУ), Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: krossihin@gmail.com

Аннотация. Сфера заготовки круглого лесоматериала является основным элементом для лесопромышленного комплекса страны, поэтому сейчас активно ведется научно-исследовательская деятельность по изучению совершенствования технологических процессов лесосечных работ. В условиях стремительно изменяющейся конъюнктуры рынка особую актуальность приобретает научно обоснованный подход к формированию парка лесозаготовительной техники. Российский рынок специализированного оборудования исторически сложился с высокой зависимостью от импортных поставок (John Deere, Ponsse, Komatsu и др.), что в новых реалиях создает существенные технологические риски для отрасли. Современные требования к лесопользованию акцентируют необходимость минимизации антропогенного воздействия на лесные экосистемы в процессе заготовки древесины. Ключевой проблемой остается негативное влияние тяжелой техники, приводящее к деградации почвенного покрова, нарушению гидрологического режима и снижению биоразнообразия. Интенсивность такого воздействия определяется совокупностью факторов, включая: почвенные характеристики (гранулометрический состав, влажность, содержание органических веществ); технические параметры оборудования (масса и давление на грунт).

Наибольшую уязвимость демонстрируют малонарушенные лесные массивы с грунтами III–IV категорий несущей способности, где традиционные технологии лесозаготовки вызывают наиболее существенные экологические последствия. Это требует разработки специализированных технологических решений, сочетающих производственную эффективность с принципами экологической безопасности. В результате исследования изучены конструктивные особенности техники и опыт ее эксплуатации на территории Республики Коми и ХМАО Югра, помимо этого, приведены данные экономической эффективности.

Ключевые слова: технологический процесс, совершенствование, техника, модульная платформа, пневматики сверхнизкого давления, лесосечные работы, колесный сортиментоподборщик, первичная вывозка, экономическая эффективность, минимизация антропогенного воздействия.

Традиционно для освоения территорий применялись классическая гусеничная техника и тяжелый колесный спецтранспорт. Также привлекались традиционные методы, вроде создания зимников. Однако, в свете климатических изменений, эти технологии и средства часто становятся неработоспособными, не соответствуя современным требованиям в развитии науки и техники. Климатические проблемы работы техники представлены далее (рис.1).

Для освоения территорий применяют классическую гусеничную технику по типу трелевочного трактора ТДТ-55А или тяжелый колесный спецтранспорт, например, форвардеры Ponsse Buffalo 8W или Амкодор 2661.



а)



б)

Рисунок 1 – Климатические проблемы работы техники: а – колесный сортиментоподборщик; б – валочно-сучкорезно-раскряжевальная машина

В освоении труднодоступных лесосек со слабонесущими грунтами III–IV категорий, а также при проведении санитарных рубок (сплошных и выборочных) вышеуказанные решения не работают, т. к. традиционные движители способствуют разрушению земляного покрова и возникновению колеи (рис. 2), что в дальнейшем сказывается на переувлажнении территорий, повторных проездах машин, лесовосстановлении и состоянии почвы. Как следствие, целевые породы находятся в условиях заболоченных лесных участков и рискуют попасть в категорию фауных насаждений [1].



Рисунок 2 – Образование колеи на погрузочном пункте

На данный момент не представляется возможным закупить машины зарубежных и некоторых отечественных производителей по причинам высокой стоимости техники и наличия зарубежных комплектующих в составе машин российских производителей, а часть эксплуатационных лесов участков лесничеств находится на заболоченных территориях.

Для достижения высокой проходимости в проектировании трансмиссии облегченного шасси снегоболотохода ТРОМ используют привода Робсона (роликовый привод), что позволило сделать привод на все 8 колес, имея на борту 1 раздаточную коробку и два моста. Балансирная подвеска позволила данному шасси всегда иметь равномерное сцепление с поверхностью земли всеми восемью колесами независимо от рельефа местности. Учитывая, что вся техника ТРОМ плавающая, шасси состоит из двух сочлененных герметичных лодок. Двигатель, КПП, раздаточная коробка, два моста и все агрегаты размещены внутри герметичных лодок, что не позволяет проливаться маслам и другим техническим жидкостям в почву. Благодаря этому возможно применение машин с минимальным воздействием на экосистему в природных парках, родовых угодьях, заповедниках, заказниках, национальных парках, где, помимо минимального удельного давления на почву и отсутствия возможных утечек жидкостей, учитывается и количество выхлопных газов.

Для лесной промышленности с использованием этой технологии были созданы колесные сортиментоподборщики (далее – КС) разных видов. Например, КС ТРОМ 20 УЭС и КС ТРОМ 20 с двигателем ЯМЗ-534. На ближайшего по стоимости конкурента Амкодор установлен другой агрегат, а именно двигатель Д-260.1. По сравнению с ним Ярославский

мотор имеет более современную экологическую норму: ЕВРО-5 против ЕВРО-3. Такая существенная разница сказывается на расходе потребляемого топлива [2].

Анализируя графики (рис. 3), заметна разница в технических показателях вышеуказанных двигателей. При большей мощности на более высоких оптимальных оборотах ЯМЗ-534 вырабатывает больший крутящий момент, что положительно сказывается на динамике разгона даже при низких оборотах вращения коленчатого вала и увеличит тяговые характеристики, т. е. повысит грузоподъемность и проходимость машины [3].

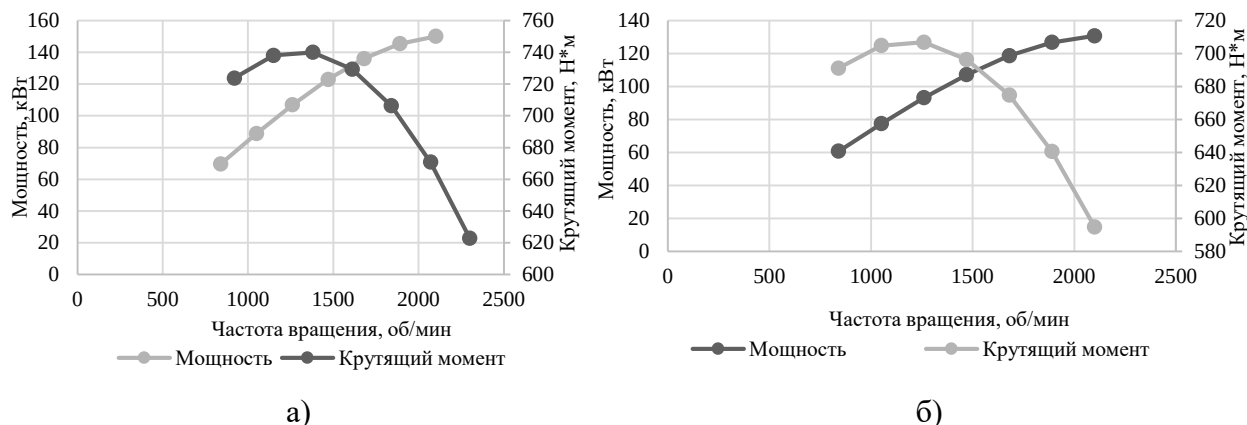


Рисунок 3 – Соотношение крутящего момента и частоты вращения двигателя:
а) ЯМЗ-534, б) Д-260.1

Эксплуатация транспортных средств ТРОМ на протяжении многих лет подтверждает их благоприятное воздействие на ПГУ. Корневая система травяного покрова остается неповрежденной, а стебли поднимаются через два дня после проезда вездехода. Уплотнение почвы под колесами в два раза меньше, чем при движении человека. Удельное давление вездехода ТРОМ с полной загрузкой составляет $0,12 \text{ кг/см}^2$, в то время как человек оказывает давление $0,25\text{--}0,3 \text{ кг/см}^2$ на слабом грунте. Итогом таких значений является отсутствие разрушения почвы на погрузочном пункте (рис. 4).



Рисунок 4 – Состояние почвы на погрузочном пункте при вывозке древесины с использованием техники ТРОМ

Последняя модификация форвардеров представлена моделью ТРОМ 4 (рис. 5), которая имеет более классическую компоновку и улучшенные технические характеристики по сравнению с предыдущими моделями.



Рисунок 5 – КС ТРОМ, модель 4

Данная машина проходила испытания в условиях незамерзших болот зимой 2024–2025 года в районе пос. Салым ХМАО-Югра в ООО «Лесные технологии». Большой опыт предыдущих разработок позволил создать машину, приближенную по скорости работы, удобству, надежности к импортным аналогам. В сегодняшней геополитической ситуации важным аспектом становится комплектация техники отечественными узлами и агрегатами, техника ТРОМ на 80 % состоит из отечественных комплектующих, что позволяет снизить затраты на эксплуатацию (расходники) и ремонт подобной техники.

Производство лесной техники не останавливается на производстве колесных сортиментоподборщиков, на данный момент ведутся работы по разработке валочно-сучкорезно-раскряжевной машины на базе данной технологии с собственной харвестерной головкой.

Помимо этого, предлагается на базе отечественной модульной системы, по аналогии с советскими гусеничными решениями, в процессе эволюции проекта покрытие всех кластеров лесной отрасли на основании пневматики сверхнизкого давления.

На данный момент имеются работоспособные экземпляры форвардера, которые проходят испытания на лесозаготовительных производствах.

На этапе разработки находится сразу несколько машин, а именно:

- грузопассажирская платформа («летучка»);
- мульчер;
- дробилка;
- посевной агрегат для минерализованных полос;
- лесовоз;
- автопоезд.

Одними из основных аргументов внедрения подобной техники является опыт эксплуатации и расчет экономической эффективности. Модель 4 внедрена в технологические процессы в организациях, чья деятельность осуществляется в Республике Коми и ХМАО Югра. По опытам эксплуатации имеются технические данные (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Технические данные при трелевке древесины на расстояние 400 метров в Республике Коми

Наименование параметра	Значение искомого параметра
Объем трелюемой пачки, м ³	10
Расстояние вывозки, км	0,4
Время цикла, мин.	44
Часовая производительность, м ³ /ч	13,63
Сменная производительность, м ³ /см	139,03
Производительность за 1 моточас, м ³ /мч	11,59

Таблица 2 – Технические данные при трелевке древесины на расстояние 12 километров в Ханты-Мансийском автономном округе

Наименование параметра	Значение искомого параметра
Объем вывозимого КЛМ, м ³	280
Расстояние вывозки, км	12
Работа двигателя при оборотах коленвала в пределах 1500–1600 об/мин, мч	500
Часовая производительность, м ³ /ч	0,66
Сменная производительность, м ³ /см	6,72
Производительность за 1 моточас, м ³ /мч	0,56

В условиях слабонесущих грунтов III–IV категорий возникает сложность в освоении лесных территорий. В связи с этим принято решение осуществлять вывозку шестиметрового круглого лесоматериала (далее – КЛМ) на расстояние от 4 до 17 км, так как на вышеуказанных территориях машина вынуждена работать в сложных почвенно-грунтовых условиях (далее – ПГУ), которые представлены в виде болота, болотных кочек, крупной гальки и глины. Рельеф местности встречается разнообразный – от затяжных подъемов и спусков до боковых уклонов. Однако на некоторых лесосеках расстояние первичной вывозки составляет 400 метров. Техника проходит как порожней, так и с грузом.

Опираясь на опытные данные и методику расчета [4, 5], составлена таблица показателей экономической эффективности (табл. 3).

Таблица 3 – Показатели экономической эффективности

Показатель	Республика Коми	ХМАО Югра
Годовая производительность, м ³	28887,13	1396,26
Сменная производительность, м ³	139,03	6,72
Капитальные вложения, тыс. руб.	25000,00	25000,00
Себестоимость заготовки сортиментов, заготовки, руб. на м ³	1157,66	24714,24
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, руб./маш.-см.	316,07	6969,57
Годовой текущий эффект (сальдо потока), тыс. руб.	8798,70	9278,38
Чистый дисконтированный доход (Т = 5 лет, а = 20 %), тыс. руб.	8347,08	10165,05
Индекс доходности дисконтированных инвестиций	1,33	1,40
Срок окупаемости инвестиций с учетом дисконтирования, лет	3,52	3,31

По данным расчета срок окупаемости каждого варианта находится в районе 3,5 лет, что допустимо и укладывается в период полезного использования техники. В связи с этим использование ТРОМ 20 УЭС, модель 4 на разных расстояниях вывозки древесины считается экономически эффективным. Стоит отметить, что себестоимость услуг зависит от нескольких факторов, поскольку, в зависимости от региона, изменяется МРОТ и региональный коэффициент, влияющие на затраты на оплату труда основных рабочих. В технологическом плане имеются различия в расстоянии вывозки, что напрямую влияет на производительность техники и годовую выработку.

Список литературы

1. Россихин, К. В. Усовершенствование первичной вывозки древесины методом замены техники на зарубежных комплектующих на отечественную / К. В. Россихин, Ф. В. Свойкин,

- С. А. Угрюмов // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ-2021. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 80–85.
2. Россихин, К. В. Изучение конструктивных особенностей отечественной техники ТРОМ для работы в условиях труднодоступных лесосек / К. В. Россихин // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2023 года. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – С. 94–99.
3. Россихин, К. В. Совершенствование технологического процесса первичной вывозки древесины путем применения отечественных решений на базе снегоболотоходной техники ТРОМ / К. В. Россихин, Ф. В. Свойкин, В. А. Кацадзе: материалы XX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». – Вологда: ВоГУ, 2022. – С. 328–332.
4. Svoikin, F.V. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions / F. V. Svoikin, V. F. Svoikin, K. V. Rossikhin [et al.] // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 515. P. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022.
5. Determining the economic efficiency of operating modern forestry machines / F. V. Svoikin, K. V. Rossikhin, M. V. Taraban [et al.] // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 145. P. 05012. DOI: 10.1051/bioconf/202414505012.

MODULAR PLATFORM OF MODERN DOMESTIC LOGGING MACHINES POWERED BY ULTRA-LOW PRESSURE PNEUMATICS

F. V. Svoikin¹, K. V. Rossikhin^{2*}, I. S. Frolov¹, E. I. Ignatova¹

¹*St. Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg*

²*St. Petersburg State Forestry University, Saint Petersburg, Russian Federation*

**E-mail: krossihin@gmail.com*

Abstract. The round timber harvesting sector is the main element for the country's forest industry complex, therefore, research and development activities are currently actively underway to study the improvement of technological processes for logging operations. In the context of rapidly changing market conditions, a scientifically based approach to the formation of a fleet of logging equipment is becoming especially relevant. The Russian market for specialized equipment has historically developed with a high dependence on imported supplies (John Deere, Ponsse, Komatsu, etc.), which in the new reality creates significant technological risks for the industry. Modern requirements for forest management emphasize the need to minimize the anthropogenic impact on forest ecosystems in the process of timber harvesting. The key problem remains the negative impact of heavy equipment, leading to soil degradation, disruption of the hydrological regime and a decrease in biodiversity. The intensity of such impact is determined by a combination of factors, including: soil characteristics (particle size distribution, humidity, organic matter content); technical parameters of the equipment (weight and ground pressure) [1]. The greatest vulnerability is demonstrated by intact forest areas with soils of III-IV categories of bearing capacity, where traditional logging technologies cause the most significant environmental consequences. This requires the development of specialized technological solutions that combine production efficiency with the principles of environmental safety. As a result of the study, the design features of the equipment and the experience of its operation in the Komi Republic and the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug Yugra were studied, in addition, economic efficiency data are provided.

Keywords: technological process, improvement, technology, modular platform, ultra-low pressure tires, logging operations, wheeled timber picker, primary haulage, economic efficiency, minimization of anthropogenic impact.

References

1. Rossikhin, K.V. Uovershenstvovanie pervichnoy vyvozki drevesiny metodom zameny tekhniki na zarubezhnykh komplektuyushchikh na otechestvennyu / K.V. Rossikhin, F.V. Svoikin, S.A. Ugryumov // Sbornik statey po materialam nauchno-tekhnicheskoy konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot-2021. – Sankt-Peterburg, 2022. P. 80-85.
2. Rossikhin, K. V. Izuchenie konstruktivnykh osobennostey otechestvennoy tekhniki TROM dlya raboty v usloviyakh trudnodostupnykh lesekh, K. V. Rossikhin, Sbornik statey po materialam nauchno-tekhnicheskoy konferentsii instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot 2023 goda. Sankt-Peterburg: SPbGLTU, 2024. P. 94-99.
3. Rossikhin, K.V. Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa pervichnoy vyvozki drevesiny putem primeneniya otechestvennykh resheniy na baze snegobolotokhodnoy tekhniki TROM / K.V. Rossikhin, F.V. Svoikin, V.A. Katsadze: materialy XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa". Vologda: VoGU, 2022. P. 328-332.
4. Svoikin, F.V. Modernization of skidding and primary removal of wood in the Vologda Region through the use of relevant domestic solutions, F. V. Svoikin, V. F. Svoikin, K. V. Rossikhin [et al.], E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 515. P. 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202451503022.
5. Determining the economic efficiency of operating modern forestry machines, F. V. Svoikin, K. V. Rossikhin, M. V. Taraban [et al.], BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 145. P. 05012. DOI: 10.1051/bioconf/202414505012.

Раздел 4. ЦИФРОВИЗАЦИЯ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 676.2
ГРНТИ 81.95.61

ЦИФРОВОЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН В СОВРЕМЕННОЙ ИНДУСТРИИ

О. В. Ильина

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: olga-ilina5656@mail.ru

Аннотация. Помимо придания формы изделию, цифровой промышленный дизайн в современной промышленности ставит во главу угла безопасность его эксплуатации. Современные локальные информационные технологии позволяют по-новому проводить соматографический анализ в виртуальном прототипировании. Создавать реалистичную трехмерную визуализацию деятельности человека на рабочем месте. В масштабе провести обзор с рабочего места, оценить удобство подхода, оптимальные размеры проходов и коммуникаций. Провести проверку соотношения пропорций человеческой фигуры; формы и размеры рабочего места. Системы автоматизированного проектирования дают большие возможности практически оценить зонирование рабочих пространств на предприятиях, включая целлюлозно-бумажные комбинаты. В статье представлены диаграммы показателей комфорта в цехе производства бумаги БДМ. В ходе дизайнерских исследований были по-новому изучены общие принципы проектирования пользовательского интерфейса.

Ключевые слова: эргономика, проектирование системы «человек – машина – среда», диспетчерская, технологическое производство.

Элементарные технические приспособления появились с древнейших времен. «Прошло немало времени, пока человек научился применять при своей работе технические приспособления, которые использовались не только при помощи человеческого усилия, но и другими движущими силами. Менялись конструкции и принцип работы на них (табл. 1) [1].

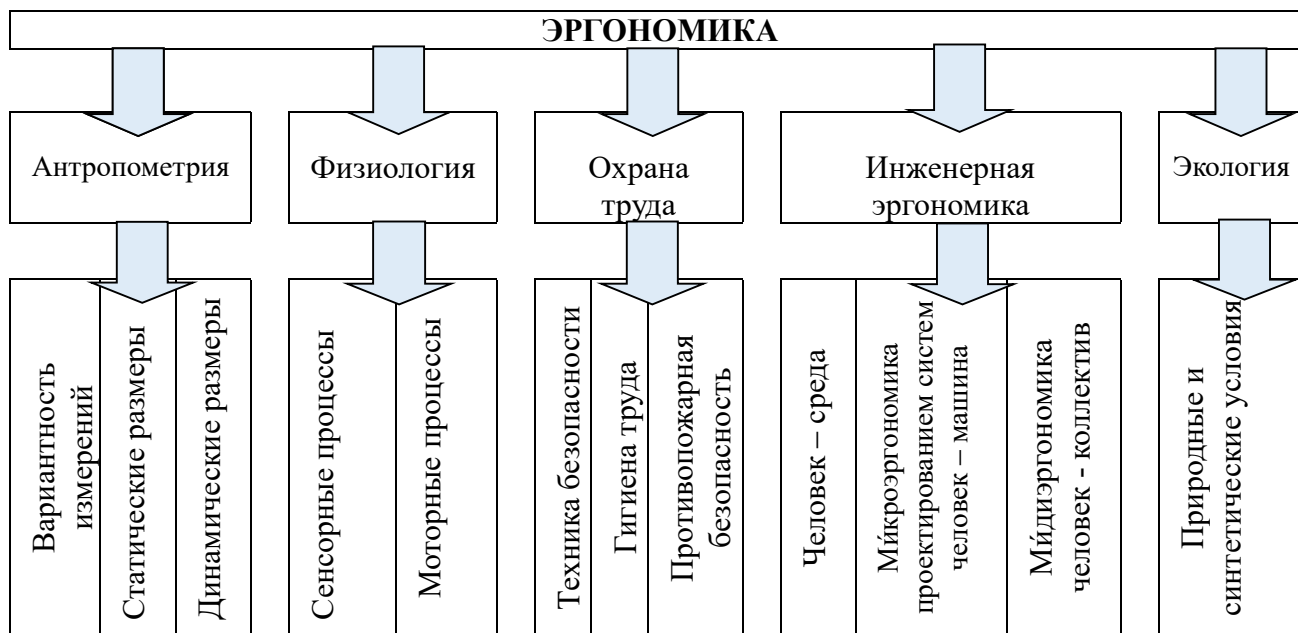
Таблица 1 – Схема эволюции движущей силы в технике [1]

Движущая сила техники	Изобретения	Принцип работы человека с механизмами	Типы конструкций
Первобытное время. Мускульная сила человека	Зернотерка; проколка; скребки; простейшие механизмы	Захватывание камня рукой	Одноэлементы
1-1800 гг. Кинетика энергии воды, ветра и животных	Водоподъемное деревянное колесо	Черпальщик; укладчик. Винтовой пресс	Простейшие технические приспособления
1880 – 1900 гг. Паровой двигатель	Паровой двигатель Уатта	Частичная механизация с применением ручной заправки	Открытая конструкция
1900 – 1950 гг. Электрические двигатели	Преобразовательные подстанции	Операторы-машинисты	Увеличение габаритов
1950 – 1990 гг. Двигатели внутреннего сгорания	Пульты управления	Работники специализированного обслуживания и ремонта	Машины объединены в единую систему
1990 – 2010 гг. Газотурбинные двигатели	Единый пульт управления(сервер)	Специалист оператор	Закрытые конструкции

Современное оборудование и автоматические устройства промышленной индустрии оснащаются сложными техническими системами, поэтому требования к человеку, работающему на автоматизированном оборудовании, резко возрастают. Это вызывает необходимость всестороннего учета возможностей человеческого организма как при конструировании техники, так и при проектировании организации рабочего пространства. Уже несколько десятилетий назад, в пятидесятые годы XX века, стали вырисовываться контуры новой науки эргономики, основным содержанием которой стало изучение функциональных возможностей человека, создание орудий труда и рабочей среды, наиболее соответствующих ему. Кроме исследований общетеоретического порядка, проектировщики стали располагать конкретными методическими указаниями и методами проектирования, такими как соматографический анализ, с помощью масштабированных чертежей с фигурой человека, объемных моделей и 3D-визуализации. К ним добавились также методы моделирования пользовательского опыта (UX-моделирование), прототипирование и тестирование, что способствует повышению эффективности проектных решений, минимизации ошибок на ранних стадиях разработки наглядно их демонстрировать.

Эргономика – это научная дисциплина, комплексно изучающая возможности человека в конкретных условиях его деятельности. Основной объект исследования эргономики – система «человек – машина – среда». При дизайне и проектировании учитываются следующие требования: антропометрия, физиология, охрана труда, инженерная эргономика (человек – среда), экология (табл. 2) [2].

Таблица 2 – Основные направления исследований эргономики [2]



Комплекс внешних условий, удовлетворяющих человеческому фактору, объединяется в одном понятии комфорт. Различают 4 типа условий: невыносимые, некомфортные, комфортные, высший комфорт. Невыносимые условия – это условия, в которых человеческий организм существовать не может. В этих условиях работа может производиться при полной или частичной герметизации, или изоляции организма от таких условий (с помощью водолазного скафандра, костюмов пилотов истребительной авиации, кессонов и т. п.). Некомфортные условия, при которых имеется существенное отклонение от нормы одного из элементов внешней среды. Такие элементы имеются в литейных, термических, гальванических цехах и на целлюлозно-бумажном производстве. Для промышленных предприятий, где работает в основном высокоскоростное агрегатированное оборудование, кроме этих показателей, также учитываются вибрация, тепловое излучение, концентрация пыли, концентрация углекислого газа. Основными показателями при определении

комфортности рабочих помещений являются шум, освещенность, температура, влажность, благоприятность окраски помещений и оборудования, чистота стекол и светильников, не загроможденные проходы и переходы. В эргономике, рассматривающей человека (группу людей), машину и среду как сложное, функционирующее целое, уделяется большое внимание изучению факторов среды. Для большинства людей комфортными являются условия при температуре окружающей среды примерно на уровне 20–22 °С, влажности в пределах 30–60 % и скорости движения воздуха не более 0,2 м/с. На графике показаны замеры показателей комфортности на производстве в зале БДМ (рис 1.) [3].



Рисунок 1 – График замеров комфортности на бумагоделательном производстве в зале БДМ (ЗАО «Выборгская целлюлоза», Балахнинский ЦБК)

На производствах тяжелого машиностроения человек практически выполняет функции контроля и управления технологическим процессом. До появления ЭВМ в реализации этих функций ему помогали устройства локальной автоматики, распределенные по всему производству. Представление информации оператору осуществлялось показывающими и регистрирующими приборами, устанавливаемыми на щитах и пультах. В период 1970–1990-х годов использовались централизованные АСУ ТП. В этих системах на одной-двух вычислительных машинах реализовывались как функции автоматического, так и оперативного управления. В настоящее время наметились тенденции связывать между собой функции отдельных АСУ ТП с системами общезаводского уровня (АСУП). Такие системы называют интегрированными. В интегрированных системах управления предприятием часть информации из АСУТП передается на уровень общезаводского управления для отделов заводоуправления (технологических, планирования, сбыта, маркетинга и других). Обратно в

АСУ ТП поступает информация, необходимая для принятия оперативных решений по управлению технологическим процессом (рис. 2) [3, 4].

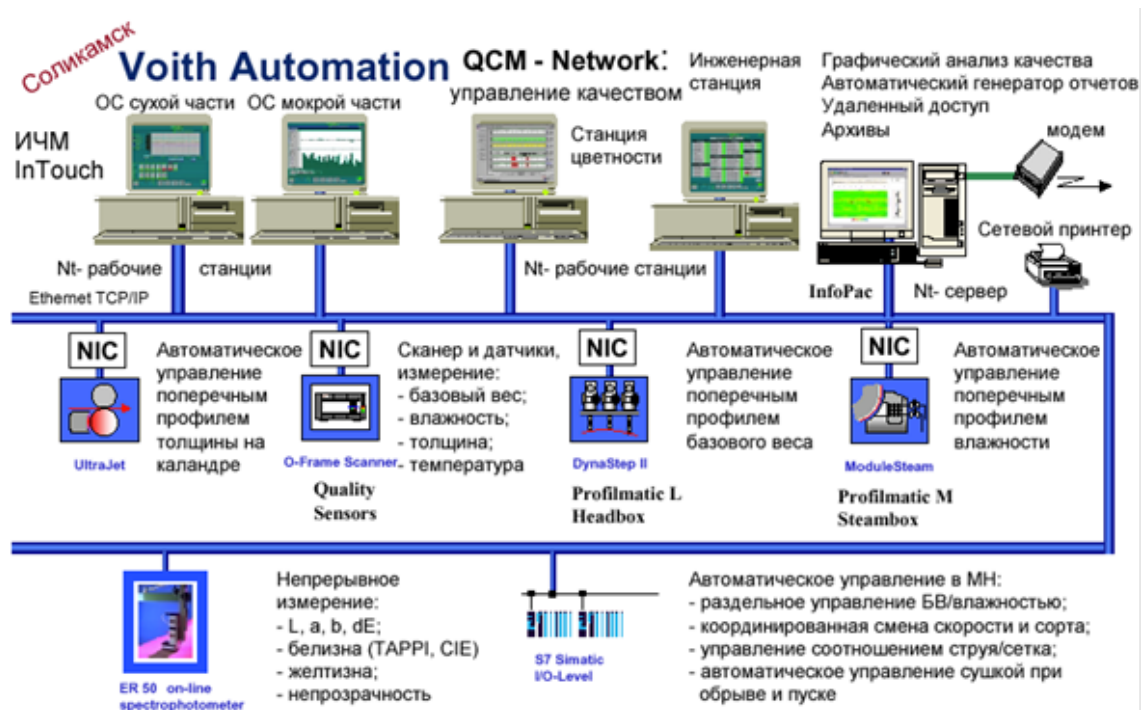


Рисунок 2 – Организационная структура АСУ ТП на Соликамском комбинате

Современные технологии дают возможность пересмотреть привычные формы организации рабочего пространства, которое обеспечивает совместную работу и эффективное использование технологий и инноваций. На Кондопожском целлюлозно-бумажном комбинате создана единая база оборудования и нормативов на пилотном объекте – бумажном цехе № 7. Это позволяет своевременно проводить анализ коренных причин отказов оборудования и оценку эффективности основных процессов ТОиР для оптимизации стратегии технического обслуживания предприятия. Оборудованы диспетчерские (рис. 3).

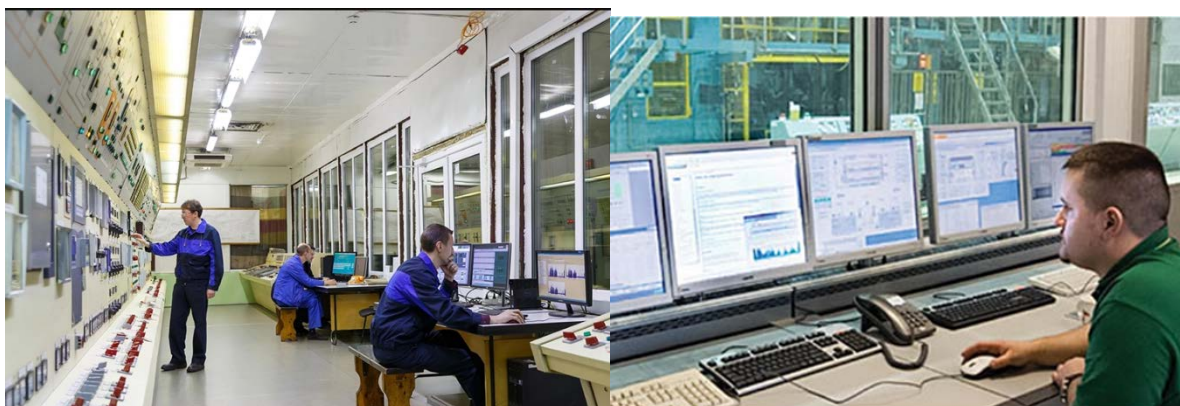


Рисунок 3 – Помещение диспетчерского центра Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината

Создание операторского интерфейса требует от проектировщика знаний не только о технологическом процессе, системах управления, но и владения дизайнерским искусством. Можно указать несколько общих принципов проектирования пользовательского интерфейса. Интерфейс должен быть всегда дружелюбным: не злословить и не хамить. Не усложнять интерфейс: чем проще, тем эффективнее воздействие. Стремиться к оптимуму информации: избыток информации также не желателен, как и ее недостаток. Максимум комфортности для оператора: учитывать психофизиологические особенности восприятия человеком видеоинформации. Графика должна быть когнитивной, т. е. способствовать обнаружению закономерностей (лат. *cognito* – познание, осознание). Большое внимание уделяется плотности заполнения экрана, определению визуального восприятия с точки зрения размещения элементов, реализующих основную идею шага работы в той части, которая визуальнo отличается, или в верхнем левом углу экрана, так как глаз сканирует эту часть экрана. Следует визуальнo объединять логически взаимосвязанные элементы. Текстовые сообщения группировать справа, изображения – слева, это объясняется особенностями восприятия соответствующей информации левым и правым полушариями мозга. Использовать ограниченное количество шрифтов и стилей. Учитывать влияние цвета на работоспособность оператора: голубой и зеленый успокаивают, желтый вселяет оптимизм, коричневый угнетает, красный и фиолетовый вызывают тревогу, черный способствует возникновению головных болей, но снижает число ошибок; ограничивать количество применяемых цветов. Иногда снижение числа видеogramм за счет повышения плотности заполнения экрана приводит к слишком мелкому изображению объектов. Это увеличивает нагрузку на глаза операторов и затрудняет позиционирование маркеров при вводе данных. При проектировании АРМ оператора-технолога не следует забывать об его основной задаче: повысить качество управления технологическим процессом. При разработке и проектировании диспетчерских пультов дизайнеры учитывают утверждённые стандарты и нормы эргономики в соответствии с ГОСТ, и международные (ANSI, BIFMA, EN) (рис. 4).



Рисунок 4 – Варианты компоновки рабочего места оператора диспетчерской технологического производства

Техническое и технологическое развитие сопровождается передачей человеку все большего числа управляющих функций, позволяя ему все больше отдаляться от ручных орудий труда и превращаться из исполняющего в управляющий орган системы производства. Однако при этом значительно возрастает нагрузка на психику человека, которому приходится решать задачи оценки и прогнозирования эффективности работы оборудования и других людей, надежного взаимодействия с различными элементами систем производственного механизма, а также оптимизации производственных процессов для достижения максимального комфорта для человека на рабочем месте и производительности.

Список литературы

1. Ильина, О. В. Эргономика и эргономические параметры в промышленном дизайне: учебное пособие. Часть 2. Физиология / О. В. Ильина. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 128 с. – ISBN 978-5-91646 -195-4.
2. Ильина, О. В. Инженерная экология в промышленном дизайне / О. В. Ильина // Сборник трудов материалов конференции XXI Международного БИОС-форума и XXI Молодежной БИОС-олимпиады. – СПб., 2016. – С. 71-77. – ISBN 978-5-86983-735-6.
3. Ильина, О. В. Человеческий фактор и дизайн в бумагоделательном производстве: учебное пособие. 2-е издание, испр. и доп. / О. В. Ильина / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2017. – С.17-89. – ISBN 978-5-91646-126-8.
4. Жукова, Ю. С. Конспект лекций по курсу: Автоматизация технологических процессов отрасли: учебное пособие / Ю. С. Жукова / СибГТУ. – Красноярск, 2007. – с. 21. – ISBN 978-107464-065-1.

DIGITAL INDUSTRIAL DESIGN IN THE MODERN INDUSTRY

O. V. Ilyina

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: olga-ilina5656@mail.ru

Abstract. In modern industry, digital industrial design not only shapes the product, but also pays great attention to ensuring its safe operation. Modern domestic information technologies allow for a new approach to somatographic analysis in virtual prototyping. This approach enables the creation of realistic three-dimensional images of human activities in the workplace. It allows for a comprehensive review of the workplace, including the assessment of accessibility, optimal dimensions of passageways, and communication routes. Additionally, it enables the verification of human body proportions and the shapes and dimensions of the workplace. Computer-aided design systems provide ample opportunities for the practical assessment of workplace zoning in enterprises, including pulp and paper mills. The article presents diagrams of comfort indicators in the BDM paper production workshop. During the project research, the following were developed

Keywords: ergonomics, human-machine-environment system design, technological production control room.

References

1. Ilyina, O.V. Ergonomics and Ergonomic Parameters in Industrial Design: Textbook. Part 2. Physiology / O.V. Ilyina; VSTE SPbGUPTD, 2019. P.128. ISBN 978-5-91646-195-4
2. Ilyina, O.V. Engineering Ecology in Industrial Design / O.V. Ilyina // Collection of Papers from the Conference of the XXI International Biosphere Forum and the XXI Youth Biosphere Olympiad, 2016. ISBN 978-5-86983-735-6. Pp. 71-77.

3. Ilina, O.V. Human Factor and Design in Paper Production: Textbook. 2nd Edition, Revised and Expanded. / O.V. Ilina / VSTE SPbGUPTD. St. Petersburg, 2017. Pp. 17-89 ISBN 978591646-126-8/
4. Zhukova, Yu.S. Lecture notes on the course: Automation of technological processes in the industry: a textbook. / Yu.S. Zhukova / SibSTU. Krasnoyarsk, 2007. p. 21 ISBN: 978-107464-065-1.

МАТЕРИАЛЫ

**VII Международной научно-технической конференции
учёных и специалистов ЦБП**

«СОВРЕМЕННАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ»

**MODERN PULP AND PAPER INDUSTRY.
CURRENT CHALLENGES AND PROMISING SOLUTIONS**

2025

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Технический редактор Д. А. Романова

Научное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 17.11.2025 г. Рег. № 5290/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.