



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

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

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



**Санкт-Петербург
2024**

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

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

PULPFor 2024



**ВШ
ТЭ** ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ



Материалы

VI Международной научно-технической конференции
учёных и специалистов ЦБП

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

11 – 12 ноября 2024 г.



Санкт-Петербург
2024

УДК 676 (665+378+628)+674.8+502.17

ББК 65.9(2)304.18

С 568

Редакционная коллегия:

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ТЦКМ Э. Л. Аким
доктор технических наук, профессор кафедры ТЦКМ Л. Г. Махотина
кандидат технических наук, доцент кафедры ТБК Е. И. Симонова
кандидат технических наук, зав. кафедрой ПТЭ С. Н. Смородин
кандидат технических наук, зав. кафедрой ПМИ И. В. Ремизова
доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой ОХ Ю. Г. Тришин
кандидат химических наук, доцент кафедры Ф и КХ Е. Ю. Демьянцева
старший преподаватель кафедры ООС и РИПР Е. А. Васильева
доктор технических наук, зав. кафедрой ИГАП Н. П. Мидуков
кандидат химических наук, директор института технологии А. В. Лоренцсон
кандидат технических наук, заместитель директора института технологии И. В. Ключкин

С 568 Материалы VI Международной научно-технической конференции учёных и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (Санкт-Петербург, 11 – 12 ноября 2024 года) / Отв. ред.: О. В. Фёдорова, О. В. Запольская. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 115 с.
ISBN 978-5-91646-414-6

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 978-5-91646-414-6

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ЦБП

Рахманбердиев Г., Хусеинов А. Ш., Холикова С. Дж. Получение целлюлозы из растения топинамбур (<i>Helianthus tuberosus L.</i>) для применения в бумажной промышленности	5
Суслов В. А. Основные положения для проектирования тепловых схем выпарных станций целлюлозно-бумажных предприятий	10
Малютина Д. И., Смирнова Е. Г. Исследование структуры высокозольной бумаги с добавлением модифицированного минерального наполнителя	17
Казаков В. Г., Громова Е. Н., Максимов В. С. Энерготехнологические аспекты выпаривания черного щелока в производстве сульфатной целлюлозы	21
Литвинова М. М., Алашкевич Ю. Д., Марченко Р. А. Влияние отдельных параметров при безножевом размоле на готовую продукцию из однолетних растений	26
Аким Э. Л., Ерохина О. А., Мухина П. М., Федорова О. В. Исследование биоразлагаемости целлюлозных композиционных материалов с полиэтиленовым покрытием	32
Петрова А. А., Воронин И. А., Алашкевич Ю. Д. Использование комбинированной гарнитуры при ножевом размоле волокнистых полуфабрикатов в ЦБП	38
Карелина А. А., Алашкевич Ю. Д., Кожухов В. А., Ушаков А. В. Влияние процесса размola недревесного сырья на отдельные бумагообразующие свойства волокнистого полуфабриката	44
Умарова В., Примкулов М. Получение целлюлозы из рисовой соломы для жидких обоев	49
Хамдамова Д. Ш., Примкулов М. Т. Получение микрокристаллической целлюлозы из лекарственных растений Узбекистана	54
Перескоков И. В., Куцубина Н. В. Динамическое моделирование прессовых валов бумагоделательных машин	59
Балыбердин К. И., Казаков Я. В. Бумагообразующие свойства сульфатной целлюлозы из лиственных лесосечных отходов	65
Бобкова Е. А., Федорова О. В. Получение модифицированного сульфатного лигнина, растворимого в кислой и нейтральной средах	71

Mardonov A. Kh., Abdumavlyanova M. K., Mirsagatova M. A.
Development of technology for obtaining cellulose from hemp plants 75

Sayfutdinov R., Abdumavlyanova M. K., Mukhitdinov U. D., Mirsagatova M. A.
Cellulose extraction from pavlovnia tree and study of quality indicators..... 79

Раздел 2. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Колесников Р. В.
Оценка объемов образования макулатурного сырья в составе ТКО и проблемы его вовлечения в экономический оборот 83

Смирнова А. И., Дягилева А. Б., Присмакова А. Е., Ленивцев П. И., Мазурик Д. И.
Комплексное исследование потенциальных вторичных материалов для решения задач лесопромышленного комплекса в циркулярной экономике 90

Селянкин М. А., Ромашева М. М., Демьянцева Е. Ю., Смит Р. А.
Извлечение глюкозы из отработанного раствора после кислотного гидролиза стеблей топинамбура..... 94

Раздел 3. УСЛОВИЯ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ламбрианиди Е. Ю., Ерохина О. А., Пекарец А. А., Аким Э. Л.
Создание топливных брикетов на основе рисовой соломы и древесных опилок 97

Раздел 4. ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

Рожков В. И., Патракова Е. Д.
Разработка алгоритмов и программного обеспечения для контроля за работой оператора на рабочем месте с использованием системы видеофиксации..... 103

Раздел 5. ЦИФРОВИЗАЦИЯ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

Благодарный Н. С., Кривов М. В., Борко В. В.
Задачи и методики компьютерного тренинга операторов ЦБП 110

РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ЦБП

УДК 666.3.0048

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАСТЕНИЯ ТОПИНАМБУР (*HELIANTHUS TUBEROSUS L.*) ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Г. Рахманбердиев, А. Ш. Хусеинов*, С. Дж. Холикова
Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент
E-mail: khusenov_82@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе приведены некоторые данные о разработке метода получения целлюлозы из растения топинамбура *Helianthus tuberosus L.*, пригодной для применения в бумажной, текстильной и других отраслях химической промышленности. Установлено влияние концентрации гидроксида натрия, температуры и времени на некоторые характеристики полученной целлюлозы. Физико-химическими методами анализа исследованы сорбционные свойства и надмолекулярное строение целлюлозы, выделенной из топинамбура. Доказано, что целлюлоза, выделенная из топинамбура, обладает более высокими сорбционными свойствами и низкой степенью кристалличности по сравнению с хлопковой и древесной целлюлозой.

Ключевые слова: целлюлоза, бумажные изделия, топинамбур, степень кристалличности, сорбционные свойства.

Целлюлоза, как наиболее широко распространенный природный полимерный материал, является одним из важнейших полуфабрикатов, применяемых в бумажной, текстильной и других отраслях химической промышленности. Основным растительным сырьем для получения целлюлозы является древесина хвойных, лиственных пород и хлопковый лент. Однако за последние 20-30 лет широкое распространение находят также и однолетние растения: соломы ржи, ячменя, пшеницы, риса и тростника. За рубежом целлюлозу получают также из бамбука и багассы. Целлюлозу можно также получать из таких не древесных видов растений, как лен, стебли хлопчатника (гуза-пая), конопля, джут, кенаф и др. Наиболее перспективными видами сырья, за счет высоких бумагообразующих свойств и достаточной их сырьевой базы для производства бумаг и картона, являются отходы хлопкоперерабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности в виде хлопкового лент, рисовой соломы, циклонного пуха и др.

В настоящее время доля продукции предприятий бумажной промышленности Республики Узбекистан составляет всего лишь 10-12 %, остальная бумага импортируется в основном из России. Следует подчеркнуть, что количество рисовой соломы в Республике Узбекистан составляет ежегодно не менее 300 тыс. тонн, а хлопкового лент 100-120 тыс. тонн, переработка которых может обеспечить потребность в бумажно-картонных изделиях. Так, например, в ближайшее время намечается строительство завода в городе Ширин Сырдарьинской области по производству бумаги из отходов сельскохозяйственного производства стеблей хлопчатника (гуза-пай) и пшеничной соломы, мощностью 160 тыс. тонн в сутки. Однако, несмотря на наличие значительной сырьевой базы, в последнее время исследователями и технологами ведутся интенсивные поиски новых видов целлюлозосодержащего сырья для получения целлюлозы и разработки на ее основе различных бумажных изделий [1].

Топинамбур, известный как земляная груша, в последнее время широко культивируется с целью получения из ее плодов биологически активного средства – инулин [2]. В настоящее время существуют обширные плантации топинамбура в Берунийском районе Республики Каракалпакстан и Кибрайском районе Ташкентской области и в будущем намечено значительное расширение этих плантаций. После использования плодов топинамбура

оставшиеся стебли (наземная часть) до настоящего времени считаются отходами и не находят практического применения. Однако предварительными исследованиями показано, что в стеблях топинамбура имеется более 40 % целлюлозы. Поэтому проведение научно-исследовательских работ по разработке технологии получения целлюлозы из растения топинамбура, пригодной для дальнейших химических переработок, является актуальной задачей. Исследования в этой области не только дают возможность получить такие важные продукты, как целлюлоза, бумага, искусственные волокна, спирт, лекарственные вещества, но и позволяет очистить орошаемые земли от этих отходов и решить экологическую проблему.

Исходя из вышеизложенного и с целью увеличения ассортимента целлюлозосодержащего сырья, нами были проведены исследования по выделению целлюлозы из многолетнего растения топинамбур (*Helianthus tuberosus L.*). Для достижения цели были проведены исследования по щелочной варке измельченных стеблей топинамбура при различном содержании NaOH в варочном растворе и изучены основные характеристические показатели полученных продуктов. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние концентрации NaOH в варочном растворе на основные характеристики целлюлозы

NaOH г/л	t, °C	τ, час	Выход, %	Влажность, %	Зольность, %	α- цел- люлоза, %	СП
10	150	2	15	-	-	-	-
15	150	2	20,5	3,0	0,90	87,0	1300
20	150	2	42,1	3,0	0,87	90,1	1250
25	150	2	36,9	3,2	0,81	91,2	1040
30	150	2	32,2	3,4	0,79	92,4	870

Из таблицы 1 видно, что при температуре 150 °C, времени 2 часа и при концентрации щелочи до 20 г/л происходит незначительное растворение нецеллюлозных компонентов исходного сырья, что свидетельствует о нехватки количества щелочи для растворения нецеллюлозных веществ. При концентрации NaOH 20 г/л получается полуцеллюлоза с выходом более 42,1 %, с влажностью 3,0 %, зольностью 0,87 %, содержанием α-целлюлозы 90,1 % и степенью полимеризации 1250. С увеличением концентрации щелочи 25 и 30 г/л выход целлюлозы уменьшается (до 36,9 и 32,2 %) за счет роста скорости реакции гидролиза ее макромолекул.

В дальнейшем было исследовано влияние температуры на выход целлюлозы (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние температуры на выход целлюлозы

NaOH г/л	t, °C	τ, час	Выход, %	Влажность, %	Зольность, %	α- цел- люлоза, %	СП
20	130	2	25,0	-	-	-	-
20	140	2	30,0	3,2	0,90	90,0	1340
20	150	2	42,1	3,0	0,87	90,1	1250
20	160	2	38,9	3,0	0,82	91,6	1040
20	170	2	32,4	3,1	0,79	92,3	840

Из таблицы 2 видно, что до достижения температуры 150 °C нецеллюлозные вещества не полностью растворяются и сырье сохраняет свой внешний волокнистый вид (не рассыпается). В процессе варки при температуре 150 °C получается наибольший выход целлюлозы (42,1 %), с влажностью 3,0 % и зольностью 0,87 %. Содержание α-целлюлозы 90,1 % и степень полимеризации 1250. С увеличением температуры качественные показатели целлюлозы заметно ухудшаются за счет увеличения деструкции целлюлозы, что является нежелательным явлением. Поэтому оптимальной температурой варки при концентрации щелочи 20 г/л можно считать 150 °C.

В таблице 3 приведены результаты исследования влияния времени варки на выход целлюлозы при концентрации щелочи 20 г/л и температуре 150 °С.

Таблица 3 – Влияние времени варки на выход целлюлозы и на ее основные показатели

NaOH г/л	Тем- ра °С	τ, час	Выход %	Влажность %	Зольность, %	α- цел- люлоза, %	СП
20	150	1,0	-	-	-	-	-
20	150	1,5	-	-	-	-	-
20	150	2,0	42,1	3,0	0,87	90,1	1250
20	150	2,5	39,6	3,0	0,84	89,6	1100
20	150	3,0	36,8	3,5	0,81	88,9	890

Согласно данным, приведенным в таблице 3, с увеличением продолжительности варки происходит закономерное снижение степени полимеризации выделяемых образцов целлюлозы. При этом выход и зольность целлюлозы по истечении 3 часов составляет 36,8 и 0,81 %.

Из данных таблицы 4 видно, что с увеличением концентрации H_2O_2 в отбеливающей смеси, белизна целлюлозы увеличивается от 71 до 94 %. При таких условиях содержание α-целлюлозы также увеличивается до 94,6 %, но снижается СП целлюлозы до 890, что объясняется деструктурирующим действием атомарного кислорода, образующегося при разложении молекулы перекиси водорода. Поэтому оптимальной концентрацией H_2O_2 можно считать 2 % в отбеливающей смеси.

Таблица 4 – Влияние условий отбеливания на основные показатели целлюлозы

Содержание H_2O_2 , %	Белизна, %	Содержание α-целлюлозы	СП	Зольность, %
0,5	71	91,6	1210	0,86
1,0	78	92,7	1180	0,74
1,5	84	92,8	1100	0,62
2,0	91	93,3	890	0,51
2,5	92	93,8	920	0,48
3,0	94	94,6	890	0,32

Как известно, такие характеристики целлюлозы, как плотность, сорбция, площадь гидроксильных групп, связанные водородной связью ($S_{он}$), и степень кристалличности (СК), связаны с ее надмолекулярной и морфологической структурой. В связи с этим исследование этих параметров целлюлозы, полученной из топинамбура, являются необходимыми при оценке ее реакционной способности. Первоначально образцы целлюлозы были изучены методами сорбции паров воды. Результаты сравнительного анализа, касающиеся сорбционных свойств целлюлозы, выделенные из различных источников, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Сорбция паров воды образцами целлюлоз при 25 °С

Образцы	Хлопковая целлюлоза	Целлюлоза древесины тополя	Целлюлоза топинамбура
Относительная влажность, %	Сорбция, %		
10	0,30	0,40	0,50
30	0,70	1,10	1,30
50	0,90	1,50	2,00
65	1,40	2,10	2,60
80	2,50	3,60	3,80
90	3,90	7,20	5,40
100	8,80	8,30	9,40

Как видно из данных таблицы 5, целлюлоза, полученная из топинамбура, гораздо больше сорбирует пары воды по сравнению с хлопковой и древесной целлюлозой. Также, по уравнению БЭТ, были рассчитаны капиллярно-пористые характеристики, такие как удельная поверхность ($S_{уд} \cdot м^2/г$), суммарный объем пор ($W_0, см^3/2$), радиус капилляра ($R_k, А$), этих образцов целлюлоз, где было установлено, что образцы целлюлоз, полученные из топинамбура, обладают меньше удельной поверхностью по сравнению с хлопковой и древесной целлюлоз, но значительно большим радиусом капилляров, что свидетельствует о ее пористой структуре. Подтверждением этого также является определение степени кристалличности (СК) образцов целлюлоз, полученных из древесины тополя и топинамбура (табл. 6).

Таблица 6 – Значения $S_{он}$ и СК различных образцов целлюлоз

Наименование образцов	$S_{он}, см^2$	СК, %
Стебель топинамбура	30	33
Целлюлоза из топинамбура, после варки и отбелки	69	58
Древесина тополя	32	38
Целлюлоза из древесины тополя	72	71

Из данных таблицы 6 видно, что значения $S_{он}$ и СК исходных стеблей топинамбура и древесины тополя сравнительно низкие, что объясняется содержанием в них значительного количества нецеллюлозных аморфных примесей. После варки и отбелки, в результате удаления нецеллюлозных примесей, значения $S_{он}$ и СК увеличиваются. Также из таблицы видно, что значение СК целлюлозы из топинамбура заметно меньше, чем целлюлоз из древесины тополя, что свидетельствует о более пористой ее структуре по сравнению с другими образцами целлюлоз. Это говорит о том, что целлюлоза, выделенная из топинамбура, более реакционно способна к различным реакциям этерификации и пригодна для дальнейших химических переработок.

Таким образом, в настоящем исследовании нами получена целлюлоза из растения топинамбур. Установлено влияние концентрации гидроксида натрия, температуры и времени на некоторые характеристики полученной целлюлозы. Физико-химическими методами анализа исследованы сорбционные свойства и надмолекулярное строение целлюлозы, выделенной из топинамбура. Поскольку выделенная из растения топинамбур целлюлоза обладает некоторыми преимуществами по сравнению с хлопковой и древесной целлюлозой, ее можно рекомендовать для создания новых бумажных изделий.

Список литературы

1. Рахманбердиев Г.Р., Муродов М.М., Кадыров О.Ш., Ибрагимходжаев А.М. Влияние процесса предсозревания целлюлозы из топинамбура на её фракционный состав. Химия и химическая технология. Т., 2009, №3, 54-57 с.
2. Рахманбердиев Г.Р., Сидиков А.С., Ибрагимходжаев А.М., Хусенов А.Ш. Особенности надмолекулярных структур целлюлоз, полученных из топинамбура (*Helianthus tuberosus* L) и древесины тополя. Химия и химическая технология. Т., 2008, №2, 40-43 с.

OBTAINING CELLULOSE FROM THE JERUSALEM PLANT (*HELIANTHUS TUBEROSUS* L.) FOR APPLICATION IN THE PAPER INDUSTRY

G. Rakhmanberdiev, A. Sh. Khuseinov, S. J. Kholikova

Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent

The abstract. This paper provides some data on the development of a method for producing cellulose from the Jerusalem artichoke plant *HELIANTHUS TUBEROSUS* L. suitable for use in paper,

textile and other branches of the chemical industry. The influence of sodium hydroxide concentration, temperature and time on some characteristics of the resulting cellulose has been established. The sorption properties and supramolecular structure of cellulose isolated from Jerusalem artichoke were studied using physicochemical methods of analysis. It has been proven that cellulose isolated from Jerusalem artichoke has higher sorption properties and a low degree of crystallinity compared to cotton and wood cellulose.

Keywords: cellulose, paper products, Jerusalem artichoke, degree of crystallinity, sorption properties.

References

1. Rakhmanberdiev G.R., Murodov M.M., Kadyrov O.Sh., Ibragimkhodjaev A.M. Influence of the process of pre-ripening of cellulose from Jerusalem artichoke on its fractional composition. Chemistry and chemical technology. T., 2009, №3, 54-57 p.
2. Rakhmanberdiev G.R., Sidikov A.S., Ibragimkhodjaev A.M., Khusenov A.Sh. Peculiarities of supramolecular structures of celluloses obtained from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L) and poplar wood. Chemistry and chemical technology. T., 2008, No. 2, 40-43 p.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ВЫПАРНЫХ СТАНЦИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. А. Суслов

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

E-mail: vyachsuslov@mail.ru

Аннотация. Представлены основные теплотехнические характеристики выпарных станций целлюлозно-бумажных предприятий, определяющие эффективность их работы и выбор технологической схемы. Показаны стенды для изучения вопросов теплообмена и гидродинамики при кипении пенообразующей парорастворной смеси в кипятильных каналах выпарных аппаратов. Приводятся рекомендации для расчета теплообмена в выпарных аппаратах, определяющие выбор технологической схемы станции, полезные как студентам лесотехнических вузов, так и работникам предприятий отрасли.

Ключевые слова: выпарные станции и аппараты, теплоотдача, кипение пенных растворов, кризисы теплоотдачи, критические тепловые нагрузки, концентрация, паросодержание.

Замена морально и физически устаревшего «инофирменного» технологического оборудования целлюлозно-бумажных предприятий (ЦБП) потребует воссоздания проектных, научных и производственных организаций, обладающих необходимым опытом работы и знаниями в этой отрасли. Исследовательские работы в ЛТИ ЦБП в области теплообмена при работе оборудования ЦБП были начаты со дня основания кафедры промышленной теплоэнергетики (ПТЭ) и могут быть полезными для специалистов отрасли.

Производительность различных типов выпарных станций (ВС) в значительной мере определяется поверхностью теплообмена выпарных аппаратов (ВА), их режимом работы, количеством ступеней выпаривания, схемой питания раствором.

Расход свежего пара, поступающего на обогрев первого корпуса ВС (греющий пар), когда выпаренный пар из этого корпуса (вторичный пар) используется в качестве греющего в последующем, при постоянной производительности ВС теоретически уменьшается с увеличением количества ступеней выпаривания. Реальное изменение расхода свежего пара, отнесенного к 1 кг выпариваемой ВС воды (удельный расход, $G_{уд}$), в зависимости от количества корпусов, показывает целесообразность использования шести- и даже пятиступенчатых ВС.

Число ступеней выпаривания определяется множеством факторов. Главные из них – стоимость ВС и срок ее амортизации, расход греющего пара на ВС и его стоимость.

Проведенные натурные исследования режимов работы ВС ЦБП [1] показали, что лучшей эффективностью обладали ВС с умеренной производительностью и небольшой поверхностью теплообмена ВА. У ВА с большой поверхностью теплообмена присутствуют неравномерности заполнения кипятильных каналов щелоком и обогрева паром всей теплообменной поверхности, приводящие к снижению производительности, нарушению режима выпаривания и усилению накипеобразования на кипятильной поверхности.

Производительность ВС определяется из уравнения

$$Q = \sum w_i \cdot r_i = \sum k_i \cdot F_i \cdot \Delta t_i, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток; w_i – количество выпаренной в ВА влаги; r_i – теплота парообразования; k_i – коэффициент теплопередачи; F_i – поверхность теплообмена; Δt_i – температурный напор в ВА.

Увеличение производительности действующей ВС при постоянных F_i и Δt_i согласно уравнению (1) достигается с увеличением коэффициента теплопередачи при интенсификации процесса теплообмена и применением эффективных методов борьбы с накипеобразованием. Суммарный температурный напор ВС $\Sigma \Delta t_i$ ограничен температурой греющего пара из-за разложения щелока при $t_{гр} > 140$ °С с образованием ядовитых серосодержащих газов и температурой конденсирующегося пара в конденсаторе ВС.

Для исследования теплообмена в условиях восходящих потоков кипящих отработанных растворов ЦБП автором работы был спроектирован и смонтирован экспериментальный стенд, схема которого представлена на рисунке 1 [1]. Основной рабочей частью стенда являлась экспериментальная труба с паровым обогревом и размерами кипяtilьных труб промышленных ВА.

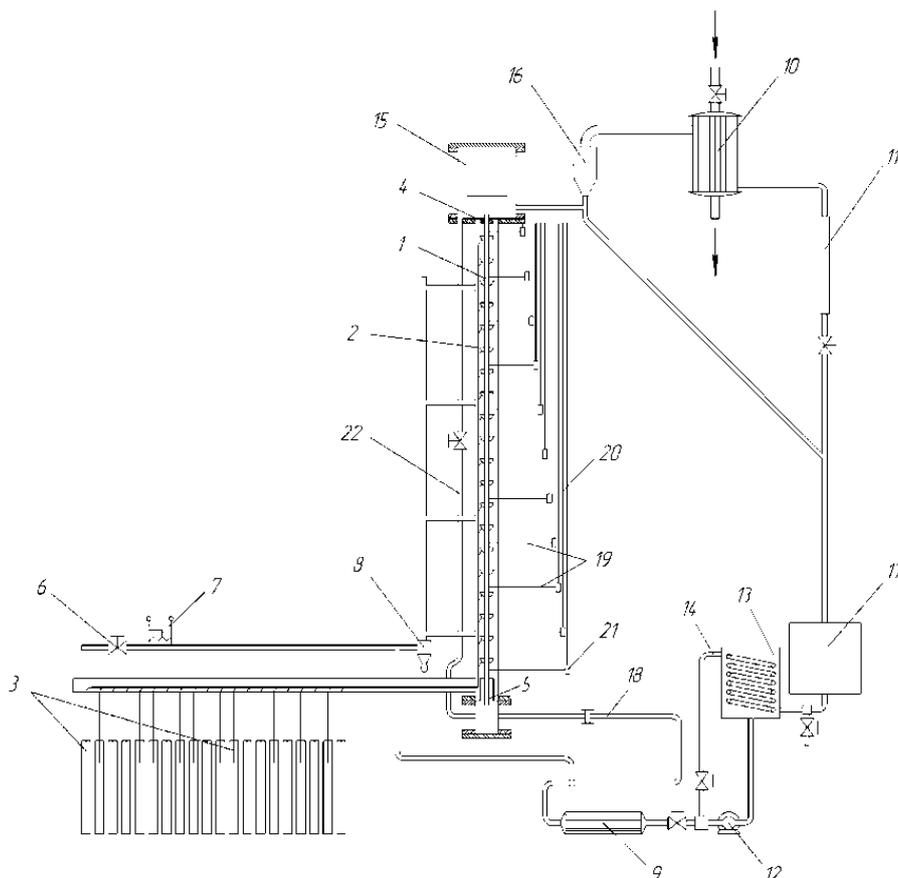


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда:

- 1 – кипяtilьная труба; 2 – конденсаторные стаканы; 3 – мерники конденсата; 4 – конус для отвода конденсата с верхней трубной доски; 5 – стакан отвода конденсата с нижней трубной доски; 6 – дроссельный вентиль; 7 – электрический нагреватель; 8 – водоотделитель; 9 – паровой подогреватель раствора; 10 – конденсатор вторичного пара; 11 – мерник конденсата; 12 – шестеренчатый насос; 13 – питательный бак; 14 – возвратная магистраль; 15 – сепаратор; 16 – тангенциальная щелочная ловушка; 17 – сборный бак; 18 – участок стабилизации для измерения скорости потока раствора; 19 и 20 – импульсные и пьезометрические трубки; 21 – буферные сосуды; 22 – водомерное стекло

Экспериментальная труба состояла из 20 измерительных участков с датчиками для измерения тепловых и гидродинамических параметров, характеризующих процесс кипения. Гидродинамические и теплообменные параметры стенда позволяли охватить весь диапазон

работы ВС. В качестве рабочих растворов использовались вода, черный сульфатный щелок, полученный от варки хвойных пород, и водный предгидролизат.

Коэффициент теплопередачи в ВА рассчитывается как

$$K = \frac{1}{R_{\text{конд}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{нак}} + R_{\text{кип}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{конд}}$; $R_{\text{ст}}$; $R_{\text{нак}}$; $R_{\text{кип}}$ – соответственно термические сопротивления теплообмену при конденсации парогазовой смеси; стенки кипяточного канала; накипи и при кипении растворов.

Теплообмен при кипении растворов при восходящем движении двухфазной смеси исследовался на стенде, схема которого приведена на рисунке 1. Перенос теплоты от поверхности теплообмена в ядро потока, согласно этим исследованиям, осуществляется совместным воздействием режимных параметров (q – плотности теплового потока, w – скорости потока в кипятельном канале, δt_n – температурного недогрева раствора до температуры насыщения, b – концентрации раствора), которое проявляется через механизм формирования и перераспределения по высоте трубы зон с различными режимами кипения – пузырьковым (включая экономайзерный участок), эмульсионным (пенным), дисперсно-кольцевым и зоной ухудшенного теплообмена.

Число образующихся на стенке трубы паровых пузырей и количество теплоты, переносимое паром, возрастает с ростом q . Количество теплоты, переносимое конвекцией жидкости в случае малых паросодержаний, определяется скоростью течения раствора w . В зависимости от соотношения q и w вклад кипения в процесс теплообмена меняется. При малых скоростях потока коэффициент теплоотдачи α определяется в основном механизмом передачи теплоты за счет парообразования и с увеличением плотности теплового потока возрастает. С увеличением скорости потока зависимость $\alpha = f(q)$ становится несущественной на фоне возрастающей зависимости $\alpha = f(w)$. При этом можно выделить три характерных участка: развитого кипения – $\alpha = f(q)$; участка конвективного теплообмена – $\alpha = f(w_{\text{см}})$; участка совместного влияния на теплоотдачу механизмов передачи теплоты за счет парообразования и конвективного обмена за счет скорости движения двухфазного потока. Концентрация и величина недогрева усиливают действие указанных механизмов передачи теплоты.

При низких тепловых нагрузках и значительных скоростях циркуляции большую часть трубы занимает экономайзерный участок, характеризующийся низкими значениями коэффициентов теплоотдачи. При высоких тепловых нагрузках и низких скоростях циркуляции в верхней части канала преобладает режим ухудшенной теплоотдачи, с малой интенсивностью теплообмена, но интенсивным накипеобразованием. Мерой отношения теплового потока от пара к конвективному, определяемому скоростью циркуляции раствора, одновременно учитывающий его недогрев, является комплекс [1]:

$$K_{\Delta i_n} = \frac{q}{\rho' \cdot \Delta i_n \cdot w_0}, \quad (3)$$

где ρ' – плотность раствора; Δi_n – недогрев раствора до состояния насыщения; w_0 – скорость циркуляции.

Показано, что в зависимости от критерия $K_{\Delta i_n}$ устанавливаются две характерные области влияния комплексных переменных. Для первой – при относительно низких тепловых нагрузках и высоких значениях недогрева, определяемой $K_{\Delta i_n} < 0,05$, характерно увеличение интенсивности теплоотдачи с уменьшением величины недогрева и увеличением тепловой нагрузки. Во второй области, характеризующейся высокими тепловыми нагрузками, малыми значениями недогрева и определяемой $K_{\Delta i_n} > 0,05$, интенсивность теплообмена возрастает с увеличением величины недогрева и скорости циркуляции. Полученная зависимость теплообмена описывается уравнением [1]:

$$\frac{\overline{Nu}}{Nu_{\text{конв}}} = AK_w^{0,45} K_{\Delta i_n}^n Pr_{\text{пл}}^{0,6} \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0,93}, \quad (4)$$

где $A = 12,5 \cdot 10^3$, $n = 0,214$ при $K_{\Delta i_n} < 0,05$; $A = 2910$, $n = -0,277$ при $K_{\Delta i_n} > 0,05$.

Кипение раствора неразрывно связано с выпадением из него накипи. Величина среднесуточного прироста термического сопротивления накипи может быть определена по уравнению [1]:

$$R_n = 1,65810^{-3} U \cdot B^{0,37}, \quad (5)$$

где U – испарительная способность поверхности теплообмена ВА; B – концентрация раствора на выходе из ВА.

Уравнение (5) показывает, что прирост термического сопротивления накипи пропорционален испарительной способности поверхности теплообмена ВА и концентрации раствора. Чем интенсивнее кипит раствор в ВА, тем больше накипи отлагается на его поверхности теплообмена, что объясняется резким увеличением концентрации и насыщением раствора в области образования парового пузыря у поверхности теплообмена.

Снижение интенсивности накипеобразования достигается при выпаривании растворов в режиме «падающая пленка». В этом режиме раствор испаряется с поверхности раздела фаз, а не кипит на поверхности теплообмена. Для исследования гидродинамики и теплообмена в данном режиме был смонтирован исследовательский стенд, схема которого представлена на рисунке 2 [1]. Моделирование и исследования гидродинамики и теплообмена в пленочных гравитационных режимах проводились на стенде путем замены экспериментальных труб: стеклянной – для гидродинамики, на стальную – для теплообмена.

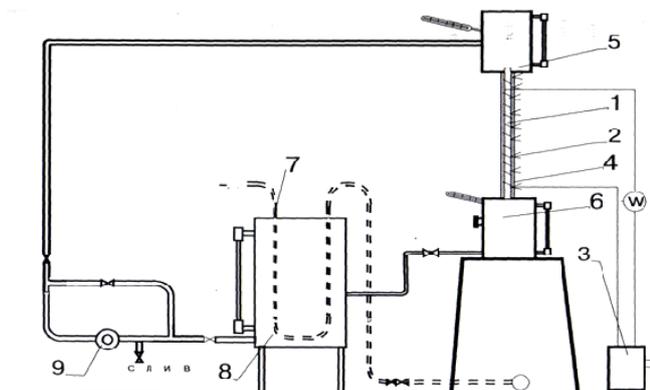


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики и теплообмена гравитационно стекающей пленки жидкости:

- 1 – вертикальная труба; 2 – нихромовая спираль; 3 – вариатор напряжения; 4 – асбестовая изоляция; 5 – верхняя растворная камера; 6 – сепаратор; 7 – труба парового обогрева; 8 – расходный бак; 9 – циркуляционный насос

Теплоотдача по результатам исследований при режиме «падающая пленка» может быть рассчитана по уравнению [1]:

$$Nu_m = 0,0044 Re^{0,37} Pr^{0,75} (K_q)^n, \quad (6)$$

где $Nu_m = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}$; $Re = \frac{4\Gamma}{\mu}$; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – безразмерные комплексы; $\Gamma = \frac{G}{\Pi}$ – массовая плотность орошения; G – расход раствора; Π – периметр канала; $R_{кин} = 1/\alpha_{кин}$; критерий K_q^n учитывает влияние плотности теплового потока.

Режим интенсивного испарения обеспечивается подачей в кипятильные каналы раствора при его недогреве до температуры насыщения примерно на 5-10 °С.

Для проверки эффективности выпаривания в данном режиме был изготовлен и подключен к действующей ВС модуль кипятильника ВА на ОАО «Илим Групп» в г. Котлас. Модуль отработал в течение месяца на крепких щелоках без серьезного образования накипи в кипятильных трубах.

Термическое сопротивление при конденсации $R_{\text{конд}}$ складывается из суммы термических сопротивлений пленки конденсата $R_{\text{пл}}$, диффузионного сопротивления R_D и сопротивления на границе раздела фаз R_{ϕ}

$$R_{\text{конд}} = \frac{t_{\text{нас.о.}} - t_c}{q} = \frac{1}{\alpha_{\text{конд}}} = R_{\text{пл}} + R_{\phi} + R_D,$$

где $t_{\text{нас.о.}}$ – температура насыщенного пара в паровом объеме; t_c – температура стенки поверхности теплообмена; q – плотность теплового потока от конденсирующегося пара к стенке поверхности теплообмена; $\alpha_{\text{конд}}$ – коэффициент теплоотдачи при конденсации парогазовой смеси.

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации чистого водяного пара на вертикальных поверхностях $\alpha_{\text{пл}}$ в определяют по формуле [2]:

$$\alpha_{\text{пл}} = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \lambda^3 g r}{\mu \cdot h \cdot \Delta t}}, \quad (7)$$

где ρ – плотность конденсата; λ – коэффициент теплопроводности; g – ускорение свободного падения; r – теплота парообразования; μ – коэффициент динамической вязкости; h – высота поверхности теплообмена; $\Delta t = t_{\text{нас.о.}} - t_c$ – температурный напор.

Все ВА ВС, кроме ее первой ступени, обогреваются вторичными парами, содержащими неконденсирующиеся газы. Неконденсирующиеся газы парогазовой смеси резко снижают коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{конд}}$ вследствие наличия диффузионного сопротивления, значение которого определяется уравнением

$$R_D = \frac{t_{\text{п.о.}} - t_{\text{п.пов}}}{\alpha_k (t_{\text{п.о.}} - t_{\text{п.пов}}) + r \cdot \beta (m_{\text{п.о.}} - m_{\text{п.пов}}) [r + (i_{\text{ж.пов}} - i_{\text{ж.с}})]},$$

где α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к пленке конденсата; $t_{\text{п.о}}$ и $t_{\text{п.пов}}$ – температуры пара в его объеме и у поверхности; r – теплота парообразования; β – коэффициент массоотдачи; $m_{\text{п.о}}$ и $m_{\text{п.пов}}$ – относительные массовые концентрации пара в объеме и у поверхности; $i_{\text{ж.пов}}$ и $i_{\text{ж.с}}$ – теплосодержания конденсата у поверхности и стенки.

Для расчета диффузионного сопротивления при пленочной конденсации пара из потока паровоздушной смеси на поверхности необходимо найти коэффициент массоотдачи, который определяется с помощью диффузионного критерия Нуссельта

$$Nu_D = \frac{\beta \cdot R_T}{D},$$

где β – коэффициент массоотдачи; R_T – радиус трубы; D – коэффициент диффузии.

Диффузионный критерий Нуссельта для вертикального пучка труб при $Re = 350 - 4800$ на основании промышленных исследований теплообмена при конденсации водяного пара из парогазовых смесей может быть рассчитан по уравнению [1]:

$$Nu_D = 0,46 \frac{\sqrt{Re}}{\varepsilon_{г.о}^{0,5} \cdot \pi_D^{1/3}}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{г.о} = p_{\text{н.о.}}/p = 0,01 - 0,7$ – начальное содержание воздуха в водяном паре; число Re рассчитывается по скорости парогазовой смеси перед пучком; в качестве определяющего размера в критериях подобия уравнения используется эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}} = 4f/\Pi$; f – проходное сечение канала; Π – периметр канала; $\pi_D = (p_{\text{н.о.}} - p_{\text{н.пов}})/p$.

Сопротивление R_{ϕ} обусловлено скачком температуры на границе раздела фаз. Из ряда исследований [2] следует, что при конденсации чистого водяного пара давлением $P > 10^4$ Па (область работы ВС ЦБП) с достаточным приближением можно считать, что температурный скачок R_{ϕ} отсутствует.

Термическое сопротивление стенки кипящего канала $R_{\text{ст}}$ может не учитываться в виду малости величины.

Натурные исследования режимов работы ВС ЦБП показали [1], что черный щелок из

отстойных баков для экономии теплоты поступает в 4 ВА, в котором его температура приблизительно соответствует температуре кипения. Далее щелок, выпариваясь, прямоточно поступает в пятый корпус, а затем – в шестой, где температуры его кипения значительно ниже. Вследствие этого перегретый щелок адиабатно вскипает при входе в кипяtilьные каналы этих ВА. При этом на поверхности теплообмена образуются сухие пятна, являющиеся центрами накипеобразования. Для избежания подобного эффекта в ВС должна применяться противоточная схема питания корпусов, при которой в ВА поступает недогретый до состояния насыщения раствор. Для сохранения теплоты щелока, поступающего на ВС из отстойных баков, можно заменить часть существующих парожидкостных подогревателей щелока на жидкостно-жидкостные, подогревая при этом поступающий противоточно из 6 ВА щелок слабым

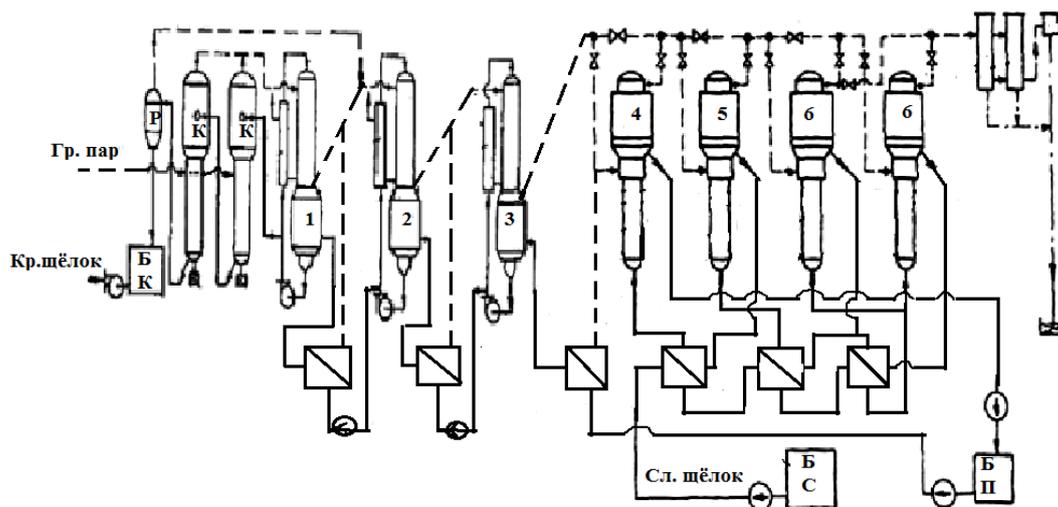


Рисунок 3 – Схема рекомендуемой выпарной батареи

При адиабатном, объемном вскипании черного щелока образующаяся пена мгновенно заполняет объем кипяtilьного канала, образуя «сухие пятна» на поверхности теплообмена, являющиеся местом накипеобразования. В длиннотрубных ВА и восходящим движением раствора пены разрушаются, теряя энергию [3, 4]. Поэтому черный сульфатный щелок с концентрацией до 35 % абсолютно сухого вещества (а.с.в.) для избежания вспенивания и интенсивного накипеобразования должен выпариваться в длиннотрубных ВА с восходящим движением раствора и противоточной схемой питания корпусов.

При выпаривании щелоков с концентрацией более 35 % а.с.в. в ВА при высоких тепловых нагрузках и низких скоростях циркуляции в кипяtilьных каналах может образовываться зона ухудшенной теплоотдачи, когда поверхность оголяется вследствие полного испарения или срыва пленки раствора. Для исключения подобных зон необходимо ВА перевести на работу в режим «падающая пленка» с принудительной циркуляцией выпариваемого раствора, когда выпариваемый раствор с нисходящим течением не кипит, а испаряется с поверхности пленки.

Список литературы

1. Суслов В. А., Поздняков А. А. Тепловые процессы в выпарных установках ЦБП. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 400 с.
2. Теплообмен при плёночной конденсации и плёночном кипении в элементах оборудования АЭС / И. И. Гогонин и др.; под ред. В. Е. Накорякова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 208 с.

3. Горянов Ю. А. Гидродинамика вспененных потоков в трубах различной ориентации и гibaх // Тез. докл. 8-й Всесоюзн. конф. «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах». – Т.2. – Л., 1990. – С. 191.
4. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. – М.: Химия, 1975. – 262 с.

BASIC DOCTRINALS FOR THE DESIGN OF THERMAL CIRCUITS EVAPORATOR STATIONS OF PULP AND PAPER ENTERPRISES

V. A. Suslov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, St. Petersburg

E-mail: vyachsuslov@mail.ru

The abstract. The main thermal characteristics of evaporation stations of pulp and paper enterprises are presented, which determine the efficiency of their operation and the choice of technological scheme. The issues of heat transfer and hydrodynamics during the boiling of a foam-forming steam-solution mixture in the boiling channels of evaporators, which are fundamental in their design, are considered. Recommendations are given for calculating heat transfer in evaporators and choosing a technological scheme of the station, useful both for students of forestry universities and employees of industry enterprises.

Keywords: evaporation stations and apparatus; heat transfer; boiling of foam solutions; heat transfer crises; critical thermal loads; concentration; steam content.

References

1. Suslov V.A., Pozdnyakov A.A. Teplovye processy v vyparnykh ustanovkakh CBP [Thermal processes in evaporation plants of pulp and paper industry]. SPb., POLYTECH-PRESS Publ., 2022, 400 p. (In Russian).
2. Teploobmen pri plyonochnoj kondensacii i plyonochnom kipenii v elementah oborudovaniya AES / I.I. Gogonin i dr.; pod red. V.E. Nakoryakova. M.: Energoatomizdat, 1993. 208 s.
3. Goryanov Yu.A. Gidrodinamikavspennyikhpotokovvtrubakhrazlichnoyorientatsiiigibakh [Hydrodynamics of foam flows in pipes of various orientations and bends]. V sbornike: Tez. dokl. 8-j Vsesoyuzn. konf. Two-phase flow in energy machines and devices.1990. [Abstract. report 8th All-Union Conf., “Two-phase flow in energy machines and devices” 1990], vol.2. L., 1990. pp. 191.
4. Tikhomirov V.K. Foam. Teoriya i praktika ih polucheniya i razrusheniya [Theory and practice of their production and destruction]. M., Chemistry. Publ., 1975. 262 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЗОЛЬНОЙ БУМАГИ С ДОБАВЛЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

Д. И. Малютина*, Е. Г. Смирнова

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

*E-mail: malyutinadarya20@gmail.com

Аннотация. Для модификации минерального наполнителя использовали суспензию бактериальной целлюлозы, синтезированную отечественным штаммом бактерий *Komagataeibacter rhaeticus* (ранее *Gluconacetobacter xylinus*, ранее *Acetobacter xylinum*). Образцы бумаги с добавлением 30 и 50 % модифицированного минерального наполнителя продемонстрировали высокие показатели индекса форования, определенного с помощью анализатора РТА-Line Formation Tester, что свидетельствует о высокой равномерности просвета бумаги, за счет высокого удержания минерального наполнителя.

Ключевые слова: минеральный наполнитель, бактериальная целлюлоза, зольность, белизна, карбонат кальция.

Введение

Минеральные наполнители широко используются в производстве бумаги, особенно для писчей и бумаги для печати, поскольку наличие наполнителей положительно влияет на оптические показатели, такие как белизна, яркость, непрозрачность и восприятие печатной краски бумагой. Однако существует ряд проблем при использовании минеральных наполнителей, как с точки зрения качества готовой продукции – снижение прочности бумаги, так и с точки зрения технологического процесса – необходимость применения удерживающих систем, негативное влияние на работу мокрой части БДМ.

Целью работы являлось: изучить влияние введения модифицированного бактериальной целлюлозой наполнителя с расходом 30 и 50 % от массы а.с.в. на оптические показатели бумаги.

Материалы и методы исследования

Бумагу изготавливали из сульфатной беленой лиственной целлюлозы (ЛЦ) марки ЛС-1 Архангельского ЦБК. В качестве наполнителя применяли химически осажденный мел (карбонат кальция) Calpreg PA, для удержания наполнителя катионный крахмал (*Albicat H42*). В качестве модифицирующего агента наполнителя применяли бактериальную целлюлозу, синтезированную отечественным штаммом *Komagataeibacter rhaeticus* (ранее *Gluconacetobacter rhaeticus*, ранее *Acetobacter xylinum*) в Институте высокомолекулярных соединений РАН [1]. *Komagataeibacter rhaeticus* относится к группе аэробных, грамотрицательных бактерий и является наиболее изученным с точки зрения биотехнологии. В работе использовали суспензию бактериальной целлюлозы (БЦ) концентрацией 1 %, размолотую в дезинтеграторе при 15000 ± 10 об/мин, в течение 10 ± 1 мин.

В настоящее время применение экологически чистых, возобновляемых и устойчивых материалов становится все более важным для производства различных высококачественных продуктов. Для модификации наполнителя БЦ концентрацией 1 % вводили в суспензию наполнителя, перемешивали в течение 1-2 минут, затем полученный модифицированный минеральный наполнитель вводился в бумажную массу из размолотой до 30°ШР лиственной целлюлозы. Расход БЦ для модификации наполнителя составил 3 % и 5 % от массы а.с. волокна лиственной целлюлозы. Лабораторные образцы бумаги изготавливали с добавлением модифицированного бактериальной целлюлозой наполнителя, в количестве 30 % и 50 % от массы а.с.в. Для сравнения были изготовлены образцы с добавлением минерального

наполнителя в количестве 30 и 50 %, где в качестве удерживающего агента использовали катионный крахмал (КК) с расходом 3 % от массы а.с.в.

Количественная оценка неоднородности структуры бумаги производилась с помощью анализатора РТА-Line Formation Tester (рис.1).

Результаты и обсуждения

При прочих равных условиях (постоянство композиции, концентрации бумажной массы, степени разработки волокон, массы 1 м², конструкции напускного устройства и формующей части БДМ и др.) обеспечение равномерности макро- и микроструктуры бумажного листа является приоритетным условием достижения высокого уровня потребительских характеристик продукции [2].

Индекс формования является основным количественным показателем оптической неоднородности структуры бумаги, измеряемой с помощью анализатора формования РТА-Line Formation Tester, который рассчитывается как интегральная характеристика совокупности флокул по шести классам размеров: 1, 2, 3, 6, 10, и 16 мм. Оценка формования структуры бумаги анализатором РТА-Line Formation Tester основана на получении цифрового изображения участка образца, размером 120x120 мм в поляризованном проходящем свете при помощи встроенного стробоскопа (источника светового потока) и цифровой фотокамеры (приемник прошедшего сквозь образец светового потока).

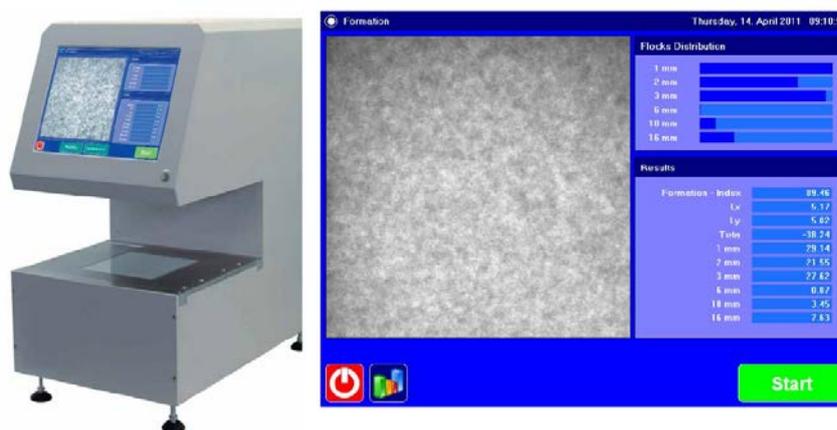


Рисунок 1 – Анализатор формования РТА-Line Formation Tester:
а – внешний вид; б – встроенный экранный интерфейс

Интенсивность оптического светового потока регулируется таким образом, чтобы на снимке всегда был одинаковый усредненный уровень серого цвета, что дает возможность сопоставлять качество формования бумаги с разной массой 1 м² или с различной непрозрачностью. Диапазон исследуемых разновидностей массы 1 м² составляет от 5 до 600 г.

Полученные изображения анализируются при помощи встроенного компьютера, результаты отображаются на мониторе. Количественными параметрами равномерности формования являются:

- 1) Индекс формования I_f , характеризующий сумму интенсивности колебаний неоднородности яркости пикселей, рассчитываемый как интегральная характеристика совокупности размеров флокул по шести классам (1, 2, 3, 6, 10, и 16 мм);
- 2) Совокупность размеров флокул в каждом из классов;
- 3) Средний размер флокул в направлении осей OX и OY , L_x и L_y , мм;
- 4) Средний угол ориентации флокул θ .

В соответствии с использованным методом оценки оптической неоднородности структуры бумаги, равномерность формирования тем выше, чем выше значение индекса формирования. В работе было исследовано 9 образцов бумаги с разной композицией (рис. 2).

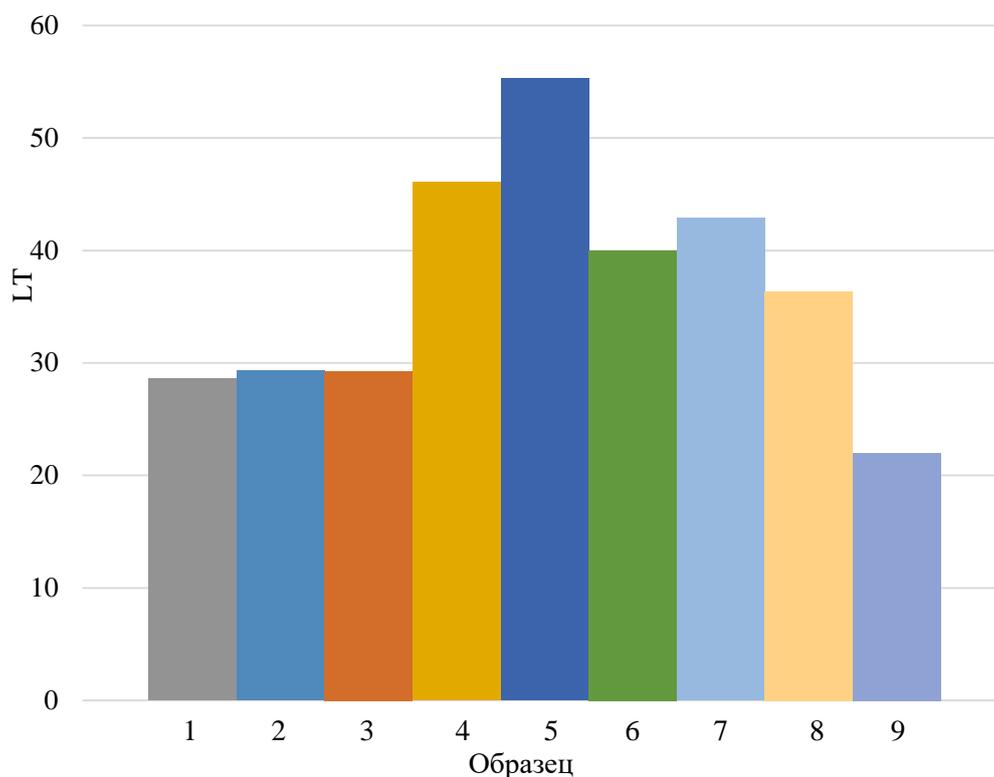


Рисунок 2 – Индекс формирования лабораторных образцов бумаги:

- 1 – Образец из лиственной целлюлозы (ЛЦ);
- 2 – ЛЦ+ 30 % CaCO₃;
- 3 – ЛЦ +50 % CaCO₃;
- 4 – ЛЦ+ БЦ 5 % + CaCO₃ 30 %;
- 5 – ЛЦ+ БЦ 5 % + CaCO₃ 50 %;
- 6 – ЛЦ+ БЦ 3 % + CaCO₃ 30 %;
- 7 – ЛЦ+ БЦ 3 % + CaCO₃ 50 %;
- 8 – ЛЦ+КК 3 % + CaCO₃ 30 %;
- 9 – ЛЦ+КК % + CaCO₃ 50 %

Образцы 1, 2, 3 по индексу формирования не отличаются друг от друга, потому что добавление минерального наполнителя без применения удерживающих систем приводит к потере минерального наполнителя при лабораторном отливе более чем на 50 %. Наиболее равномерной структурой характеризуются образцы модифицированные БЦ (№ 4 и № 5), это объясняется высоким удержанием модифицированного наполнителя в бумаге. При добавлении в бумажную массу КК как удерживающего реагента в количестве 3 % к массе а.с.в., видимо, недостаточно для высокого удержания наполнителя (50 %), поэтому образец № 9 обладает наиболее низкой равномерностью структуры.

Заключение. Одним из важных показателей бумаги, обуславливающих качество готовой продукции, является равномерность формирования. Так, недостаточная равномерность просвета офисной бумаги, как правило, приводит к снижению качества печати, воспроизводимости копий, нестабильности прохождения бумаги через печатные устройства, приостановке и необходимости перезагрузки процессов и др. Полученные данные по образцам с добавлением модифицированного наполнителя показывают высокий индекс формирования, что позволит улучшить качество дальнейшей обработки бумаги.

Список литературы

1. EA 201700517 A2, C12N 1/20, Штамм Komagataeibacter (Gluconacetobacter) rhaeticus CALU-1629, синтезирующий наноцеллюлозу /Ткаченко А. А., Райко М. П., Мигунова А. В. Бюл. ЕАРВ 06.2018г.
2. Абрамова В. В., Гурьев А. В., Казаков Я. В. Оценка равномерности формирования дисперсно-изотропной макроструктуры бумажного листа в двухмерной системе координат // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2011. – июнь. – С. 50-53.

STUDY OF THE STRUCTURE OF HIGH-ASH PAPER WITH THE ADDITION OF A MODIFIED MINERAL FILLER

D. I. Malyutina*, E. G. Smirnova

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, St. Petersburg

**E-mail: malyutinadarya20@gmail.com*

The abstract. To modify the mineral filler, a suspension of bacterial cellulose synthesized by the domestic bacterial strain Komagataeibacter rhaeticus (formerly Gluconacetobacter xylinus, formerly Acetobacter xylinum) was used. Paper samples with the addition of 30 and 50% modified mineral filler showed high values of the foration index determined using the PTA-Line Formation Tester analyzer, which indicates a high uniformity of the paper lumen due to high retention of the mineral filler.

Keywords: mineral filler, bacterial cellulose, ash content, whiteness, calcium carbonate

References

1. EA 201700517 A2, C12N 1/20, Strain Komagataeibacter (Gluconacetobacter) rhaeticus CALU-1629 synthesizing nanocellulose /Tkachenko A. A., Raiko M. P., Migunova A.V. Byul. EARB 06.2018
2. Abramova V.V., Guryev A.V., Kazakov Ya.V. Assessment of the uniformity of the formation of a dispersed isotropic macrostructure of a paper sheet in a two-dimensional coordinate system – Pulp Magazine. Paper. Paperboard. June 2011. pp.50-53

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫПАРИВАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА В ПРОИЗВОДСТВЕ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

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

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

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

Аннотация. Выпарные станции для концентрирования черного щелока являются основными потребителями пара низкого давления на ЦБК. Учитывая сложность тепловых процессов в выпарных батареях, осложненных массообменом и накипеобразованием теплообменных поверхностей, расход пара от ТЭЦ и их производительность не соответствуют расчетным параметрам и часто сдерживают выпуск основной продукции. В связи с этим поиск решений по повышению эффективности (снижению расхода пара и повышению производительности) выпарной станции актуален и сейчас.

Целью представленной работы является разработка технических решений по повышению эффективности работы выпарных станций на основе научно обоснованного анализа, в том числе оценки ее термодинамической эффективности.

Ключевые слова: *черный щелок, энергоэффективность, производство сульфатной целлюлозы, выпарные аппараты.*

Выпарные станции для концентрирования черного щелока являются основными потребителями пара низкого давления на ЦБК. Сложность физико-химических и тепловых процессов в выпарных батареях вызывает эксплуатационные трудности в поддержании расчетных параметров и часто сдерживают выпуск основной продукции [1].

К работе выпарных батарей предъявляются следующие основные требования:

- стабильность тепловых и технологических характеристик выпаривания в процессе эксплуатации;
- варьирование в широких пределах производительности выпарных установок при заданных концентрационных режимах раствора на выходе из выпарной батареи;
- повышение энергетической эффективности работы регенеративных теплообменников и выпарных аппаратов выпарной станции;
- повышение качества вторичного пара.

Стабильность тепловых и технологических характеристик выпаривания в процессе эксплуатации. Нестабильность режимных параметров в процессе эксплуатации выпарных батарей в основном является следствием зарастания теплообменных поверхностей выпарных аппаратов. Раствор черного щелока является сложной химико-технологической системой. В процессе выпаривания образуется накипь различного минералогического и фазового состава с низкой теплопроводностью. Осложнения в процессе переноса теплоты вызывает также образование во вторичном паре неконденсирующихся газов, имеющих низкую теплопроводность. Решение этой проблемы возможно с применением высокоэффективного ингибитора образования накипи. К такому ингибитору можно отнести полиалкилсиликонат натрия [2].

Ингибитор образования накипи на основе полиалкилсиликоната натрия, например, полиэтилсиликоната натрия, вводится непосредственно в кристаллизующийся раствор. Он адсорбируется на поверхности теплообмена. Учитывая малую работу адгезии силиконовой пленки, следует ожидать разрушения адсорбционного слоя. Срыв силикона с поверхности усиливается с увеличением скорости потока и твердой фазы. Достаточно большой избыток полимера в растворе приводит к образованию мицелл, уплотненных у поверхности, из

которых пополняется возникающий дефицит силикона на ограничивающей поток стенке. Концентрация полимера в растворе должна быть такова, чтобы скорость образования адсорбционного слоя превышала скорость образования кристаллов на теплообменной поверхности. На основе изложенных представлений предполагается, что существенного замедления или предотвращения инкрустирования теплообменной поверхности можно достичь при совместном влиянии достаточного избытка полимера (против насыщенного адсорбционного слоя) и гидродинамических факторов, которые могут быть установлены экспериментально.

В многочисленных экспериментах установлено, что для широкого класса накипеобразующих компонентов удается существенно замедлить или предотвратить образование накипи на теплообменных поверхностях в кристаллизующихся растворах при концентрации полиэтилсиликоната натрия (на сухое вещество) в количестве 30 ppm.

Возможность варьирования в широких пределах производительности выпарных установок при заданных концентрационных режимах раствора на выходе из выпарной станции.

В практике эксплуатации выпарных батарей встречаются ситуации, когда исходного раствора на выпаривание наработано больше, чем предусмотрено проектным режимом. Такая проблема возникает чаще всего из-за зарастания накипью или механическими загрязнениями кипятильников выпарной батареи. Единственно возможным решением здесь является увеличение полезного температурного напора по выпарной батарее. Этого можно достигнуть путем вывода одного или более выпарных аппаратов из работы, т.е. сократить число ступеней выпаривания. Наиболее энергетически эффективным вариантом увеличения полезного температурного напора, является повышение давления греющего пара. Однако такое решение возможно лишь при решении проблемы образования накипи [3, 4].

В некоторых случаях исходного раствора вырабатывается меньше, чем предусмотрено проектным режимом. В такой ситуации сбалансированный режим может быть обеспечен регулированием расхода раствора на выпарную батарею.

Повышение энергетической эффективности работы регенеративных теплообменников и выпарных аппаратов выпарной установки.

Выпарные установки.

Выпарные установки ЦБП до последнего времени были укомплектованы выпарными аппаратами с восходящей пленкой. Как известно, эти конструкции выпарных аппаратов не рекомендуются для выпаривания пенящихся растворов и подверженных инкрустированию теплообменных поверхностей. В последнее время стали проектировать выпарные установки, укомплектованные выпарными аппаратами с падающей пленкой и пластинами на основе ламелей (по типу концентраторов). Без решения проблемы образования накипи, пенообразования, удаления не конденсирующихся газов и удовлетворительной способности к ремонту, аппараты на основе ламелей вряд ли найдут широкое распространение в выпарной технике ЦБП [4].

Следует отметить, что выпарные аппараты с падающей пленкой в России стали разрабатываться в 60-х годах прошлого столетия. Они были освоены на выпарных батареях большой единичной мощности. Техническое решение было принято на основе трубчатого выпарного аппарата с гравитационным течением раствора и принудительной циркуляцией. Распределительным устройством раствора служили шнековые вставки. Они по одной вставлялись в каждую кипятильную трубку, что при входе позволяло формировать циклонно-пленочное течение раствора. Почти идеальная гидродинамика распределения раствора по трубкам обеспечивала предотвращение зарастания кипятильных трубок в местах большого выделения твердой фазы. При этом выпарные аппараты имели принудительную циркуляцию. В зарубежных аналогах также была предусмотрена принудительная циркуляция. Однако ее применение основывалось на других предпосылках: в зарубежных аппаратах введение принудительной циркуляции раствора обосновывалось предотвращением режима «сухой стенки» для выпарных аппаратов большой единичной мощности и, как следствие,

кипятильных труб большой длины. В отечественном варианте принудительная циркуляция раствора применялась исходя из следующих соображений:

- с увеличением числа Re увеличивается коэффициент теплоотдачи к выпариваемому раствору;
- увеличение скорости гравитационного течения пленки замедляет инкрустирование теплообменной поверхности.

По этим причинам была принята скорость пленки раствора 2,5 м/с. Оптимизация параметров выпаривания раствора, исходя из приведенных затрат, также подтвердила эту величину скорости потока – 2,0-2,5 м/с.

Регенеративные теплообменники.

Теплообменники регенеративного контура играют большую роль в работе выпарной установки. Хорошая организация их работы позволяет:

- снизить удельный расход греющего пара на выпарную установку;
- повысить производительность выпарной установки путем снижения или исключения экономайзерной зоны в выпарных аппаратах.

В реальных условиях эксплуатации выпарных батарей работа теплообменников не удовлетворяет предъявляемым требованиям по ряду причин:

- теплообменники регенеративного контура представлены трубчатыми рекуперативными подогревателями;
- в межтрубную поверхность теплообменников направляют вторичный пар, содержащий неконденсирующиеся газы с низкой теплопроводностью;
- в трубной и межтрубной части теплообменников на поверхности теплообмена выделяется накипь органической и неорганической природы с низкой теплопроводностью [5, 6].

Причины, упомянутые выше, привели к усложнениям их эксплуатации, вследствие чего на некоторых целлюлозных заводах они выведены из эксплуатации.

Решение проблемы мы видим в замене рекуперативных теплообменников на теплообменники смешения. Учитывая особенности поведения растворов черного щелока при выпаривании, на кафедре промышленной теплоэнергетики разработан теплообменник смешения кавитационно-вихревого типа [7]. Этот теплообменник успешно испытан в условиях работы на выпарной установке Архангельского ЦБК. В эксперименте установлено:

- теплообменник не зарастает накипью и целлюлозным волокном. При этом этот недостаток, являющийся принципиальным для теплообменника рекуперативного типа, не имеет большого значения в предложенной конструкции;
- отвод части неконденсирующихся газов из выпарной установки с вторичным паром через теплообменник смешения в предложенной конструкции теплообменника является преимуществом. Неконденсирующиеся газы, содержащиеся во вторичном паре способствуют лучшему перемешиванию закрученного потока раствора при конденсации вторичного пара. Интенсификация тепло- и массообмена приводит к стабилизации нагрева раствора при малых величинах недогрева между конденсирующимся паром и нагретым раствором.

Однако недостатком предложенного теплообменника является разбавление раствора конденсатом водяного пара. Следовательно, для получения заданной концентрации крепкого раствора на выходе из выпарной установки необходимо дополнительно выпарить массовое количество воды, эквивалентное введенному с конденсатом греющего пара.

Таким образом, предложенные авторами технические решения по повышению эффективности работы выпарных станций целлюлозно-бумажных производств позволят сократить затраты тепловой и электрической энергии на производство сульфатной целлюлозы, а, следовательно, приведут к снижению себестоимости выпускаемой продукции.

Список литературы

1. Луканин П. В. Проблемы энергосбережения на целлюлозно-бумажных предприятиях России // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы IV научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 22–25 мая 2019 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. – С. 304-307.
2. Патент SU 500290 А1. Ингибитор накипеобразования / Г. А. Казаков, В. Г. Казаков; патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности. Заявлено 27.12.1971; опубл. 24.01.1976, Бюл. № 3. 3 с.
3. Казаков В. Г., Луканин П. В., Громова Е. Н. Выпаривание растворов целлюлозного производства. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – 192 с.
4. Бойков Л. М., Нечаев Н. С. Теплотехника целлюлозно-бумажного производства. Теплоэнергетические и теплотехнологические установки. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД ВШТЭ, 2017. – 383 с.
5. Мовсесян В. Л., Суслов В. А. Выпарные аппараты и схемы выпарных станций ЦБП. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1980. – 53 с.
6. Перцев Л. П., Ковалев Е. М., Фокин В. С. Трубчатые выпарные аппараты для кристаллизующихся растворов. – М.: Машиностроение, 1982. – 136 с.
7. Патент на полезную модель РФ 176732 U1, МПК F28C 3/00. Кавитационно-вихревой теплообменник / В. Г. Тарасовский, В. Г. Казаков, М. Н. Чайка, О. А. Светличная; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Предприятие группы «Городской центр экспертиз» – «Городской центр экспертиз – энергетика» (ООО «ГЦЭ – энерго»). Заявлено 21.04.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 3. 6 с.

ENERGY TECHNOLOGICAL ASPECTS OF EVAPORATION BLACK LIQUOR IN THE PRODUCTION OF SULFATE PULP

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

Higher School of Technology and Energy of SPbGUPTD, St. Petersburg

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

The abstract. Evaporation stations for the concentration of black liquor are the main consumers of low-pressure steam at the Central processing Plant. Given the complexity of thermal processes in evaporative batteries complicated by mass transfer and scale formation of heat exchange surfaces, steam consumption from thermal power plants and their performance do not correspond to the calculated parameters and often restrain the production of basic products. In this regard, the search for solutions to improve the efficiency (reduce steam consumption and increase productivity) of the evaporation station is still relevant. The purpose of the presented work is to develop technical solutions to improve the efficiency of evaporation plants based on a scientifically based analysis, including an assessment of its thermodynamic efficiency.

Keywords: black liquor, energy efficiency, production of sulfate cellulose, evaporators.

References

1. Lukanin P. V. Problemy` e`nergosberezheniya na cellyulozno-bumazhny`x predpriyatiyax Rossii [Problems of energy saving at pulp and paper enterprises in Russia]. *Lesa Rossii: politika, promy`shlennost`, nauka, obrazovanie: Materialy` IV nauchno-texnicheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 22–25 maya 2019 goda* [Forests of Russia: politics, industry, science, education: Proceedings of the IV Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, May 22-25, 2019]. Sankt-Peterburg: Federal`noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego

- obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij politexnicheskij universitet Petra Velikogo", 2019, pp. 304-307. (In Russian).
2. Kazakov G.A., Kazakov V.G. *Ingibitor nakipeobrazovaniya* [Scale formation inhibitor]. Patent SU no 500290 A1, 1976. (In Russian).
 3. Kazakov V. G., Lukanin P.V., Gromova E.N. *Vy`parivanie rastvorov cellyuloznogo proizvodstva* [Evaporation of cellulose production solutions]. Sankt-Peterburg: Izdatel`sko-poligraficheskaya asociaciya vy`sshix uchebny`x zavedenij, 2022. 192 p. (In Russian).
 4. Bojkov L.M., Nechaev N.S. *Teplotexnika cellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Teploe`nergeticheskie i teplotexnologicheskie ustanovki* [Thermal engineering of pulp and paper production. Thermal power and thermal technology installations]. Sankt-Peterburg: SPbGUPTD VShTE`, 2017. 383 p. (In Russian).
 5. Movsesyan V.L., Suslov V.A. *Vy`parny`e apparaty` i sxemy` vy`parny`x stancij CzBP* [Evaporators and schemes of evaporation stations of the pulp and paper industry]. M.: CINTIximneftemash, 1980. 53 p. (In Russian).
 6. Percev L.P., Kovalev E.M., Fokin V.S. *Trubchaty`e vy`parny`e apparaty` dlya kristallizuyu`shhix rastvorov* [Tubular evaporators for crystallizing solutions]. M.: Mashinostroenie, 1982. 136 p. (In Russian).
 7. Tarasovskij V.G., Kazakov V.G., Chajka M.N., Svetlichnaya O.A. *Kavitacionno-vixrevoj teploobmennik* [Cavitation vortex heat exchanger]. Patent RF no176732 U1 (In Russian).

ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ БЕЗНОЖЕВОМ РАЗМОЛЕ НА ГОТОВУЮ ПРОДУКЦИЮ ИЗ ОДНОЛЕТНИХ РАСТЕНИЙ

М. М. Литвинова*, Ю. Д. Алашкевич, Р. А. Марченко

*Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
Красноярск*

**E-mail: marg32883@gmail.com*

Аннотация. Как известно, основным сырьем целлюлозно-бумажной промышленности используется, как правило, древесина хвойных и лиственных пород, но наиболее часто в технологии используют первый вариант. Учитывая особенности физико-механических характеристик готовых изделий из хвойной древесины по сравнению с древесиной лиственных пород, известно, что в сравнении этих двух видов древесины у хвойной древесины пород волокна более длинные. А, как известно, длина волокон имеет весомое значение, как для на бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов, так и физико-механические характеристики готовых изделий целлюлозно-бумажного производства. Учитывая необходимость использования в технологии целлюлозно-бумажного производства однолетних растений, естественно появляется необходимость исследования процессов волокнистых полуфабрикатов из однолетних растений, в сравнении с механизмом размол волокнистых полуфабрикатов из древесины, и в первую очередь их древесины хвойных пород.

Ключевые слова: размол, растительные полимеры, бумажная продукция, размол технической конопли.

На производство бумаги большое влияние оказывает процесс размол, который играет важную роль в определении основных свойств бумаги. Во-первых, волокна, которые не подвергаются размолу, приводят к получению листов бумаги низкого качества с пониженной гибкостью волокон. Кроме того, недостаточная гидратация этих непромолотых волокон ограничивает их способность эффективно встраиваться в структуру бумажного листа. Хотя основной целью размол является не укорачивание волокон, а их расщепление на фибриллы по длине. Этот процесс повышает гибкость, пластичность и набухание волокон, что в конечном итоге улучшает их адгезию. Адгезия является важнейшим свойством, влияющим на механическую прочность и впитывающую способность бумаги [1].

При обработке волокон в различных технологиях используются механические или гидродинамические воздействия. В процессе размол волокна подвергаются резке, дроблению и расчесыванию и разделяются на пряди. В конических и дисковых мельницах размол происходит за счет перемещения ножей в пространстве между неподвижными ножами статора и вращающимися ножами ротора. Эти установки предназначены для работы на высоких окружных скоростях, что приводит к увеличению напряжения сдвига, перепадам давления и сильным ударам [2].

При использовании установок ножевого типа для размол волокнистых полуфабрикатов в процессе вторичной переработки могут возникнуть проблемы, особенно для коротковолокнистых пород древесины, таких как лиственные породы. Чтобы преодолеть эти проблемы, рекомендуется использовать метод размол, при котором не используются ножи. Одним из таких методов является экспериментальная установка «Струя-преграда», которая используется на кафедре машин и аппаратов промышленных технологий в Сибирском государственном университете науки технологий имени М.Ф. Решетнёва [3].

В безножевой установке процесс размол волокнистых материалов в основном зависит от сочетания нескольких физических факторов, которые можно разделить на четыре основных типа.

Во-первых, возникает эффект кавитации, при котором в текучей среде образуются и схлопываются кавитационные пузырьки, взаимодействующие с волокнистым материалом. Во-вторых, эффект пульсации возникает из-за неограниченного потока струи суспензии. В-третьих, когда струя суспензии соприкасается с поверхностью, она воздействует на нее с определенной силой. Наконец, эффект гидродинамического трения возникает из-за различий в вязкости и скорости движения жидкости, создавая силы трения, которые способствуют процессу размола [4].

В течение значительного периода времени бумажные изделия изготавливались в основном из древесины хвойных и лиственных пород, что привело к широкомасштабной вырубке лесов и существенному воздействию на окружающую среду. Эта проблема возникает из-за того, что деревья проходят длительный процесс созревания, обычно от 80 до 100 лет, прежде чем их можно будет использовать в качестве сырья для производства бумаги. Однако в последние годы предпринимаются усилия по изучению альтернативных источников целлюлозы с целью смягчения негативных последствий вырубки лесов. К таким вариантам относятся недревесные материалы, такие как сельскохозяйственные отходы, однолетние культуры и синтетические волокна, а также внедрение методов устойчивого лесоводства для минимизации ущерба окружающей среде.

По мере роста озабоченности по поводу изменения климата и экологической устойчивости переход к более экологичным материалам и методам в целлюлозно-бумажной промышленности приобретает все большее значение.

В последние годы наблюдается растущая тенденция к использованию технической конопли в качестве сырья для производства целлюлозы и бумаги. Использование технической конопли в этой отрасли дает ряд преимуществ, в том числе быстрый рост, высокое содержание целлюлозы и минимальное воздействие на окружающую среду.

Техническая конопля – это травянистое растение, которое может достигать высоты от 1 до 6 метров, в зависимости от таких факторов, как генетическая изменчивость, условия окружающей среды и методы ведения сельского хозяйства. По мере созревания у этого вида развиваются прочные деревянистые стебли диаметром от 2,5 до 5 см [5]. Помимо использования в целлюлозно-бумажном производстве, техническая конопля демонстрирует замечательную универсальность для различных промышленных применений. Стебель технической конопли состоит из двух основных компонентов: внутренней сердцевины, на которую приходится примерно 65-75 % общей структуры стебля, обычно называемой «древесной частью» или «кострой». Этот древесный компонент содержит примерно 40-48 % целлюлозы и значительное количество лигнина, аналогичного тому, который содержится в лиственных породах, примерно 20 %. Внешний компонент, волокнистая часть, составляет оставшуюся часть стебля, содержащую приблизительно 62,4 % целлюлозы при сравнительно более низком содержании лигнина, составляющем около 5-7 %. Этот уникальный состав подчеркивает потенциал технической конопли как важного источника целлюлозы для различных промышленных применений, таких как целлюлозно-бумажное производство, поддерживая при этом экологически чистые и устойчивые производственные процессы. При изучении свойств волокнистого полуфабриката, получаемого из промышленной конопли, одной из его наиболее примечательных особенностей является повышенная прочность, в частности, высокий предел прочности при растяжении. Кроме того, годовой цикл роста конопли обеспечивает ее легкодоступным источником сырья, что отличает ее от других древесных ресурсов. Потенциал производства бумаги и последующей переработки тесно связан с длиной волокна, поскольку более длинные волокна из промышленной конопли могут эффективно удвоить объем производственных циклов по сравнению с теми, в которых используются материалы на основе древесины [6].

На начальном этапе обработки значительная часть растительного сырья измельчается. Это важный этап, поскольку волокна конопли могут быть довольно длинными, от 2 до 4 метров, что делает непрактичным их непосредственный размол на безножевой установке. Поэтому первый этап включает в себя процесс предварительного измельчения на более мелкие

фрагменты. Для этой цели в упомянутом исследовании использовалась дробилка-дезинтегратор, известная как «Рекорд». Это устройство помогало измельчать материал из стеблей конопли [7].

Последующий этап включал размол обработанного материала с использованием экспериментальной безножевой установки типа «Струя-преграда» [3]. Этот эксперимент проводился при давлении в рабочем цилиндре 12 МПа. Устройство оснащалось соплом с внутренним диаметром 2 мм, предназначенным для распыления струи волокнистой суспензии на преграду, при этом струя суспензии выбрасывалась со скоростью 130 м/с. Для сравнения качественных и количественных показателей при размолу использовали три вида концентрации суспензии: 0,5; 1; 1,5 %. Для исследования размолу волокнистых полуфабрикатов более высоких концентраций, используемых в промышленности, возможно за счет увеличения диаметра сопла выбрасываемой струи.

На рисунке 1 показана зависимость степени помола от времени размолу по шкале Шоппер-Риглера.

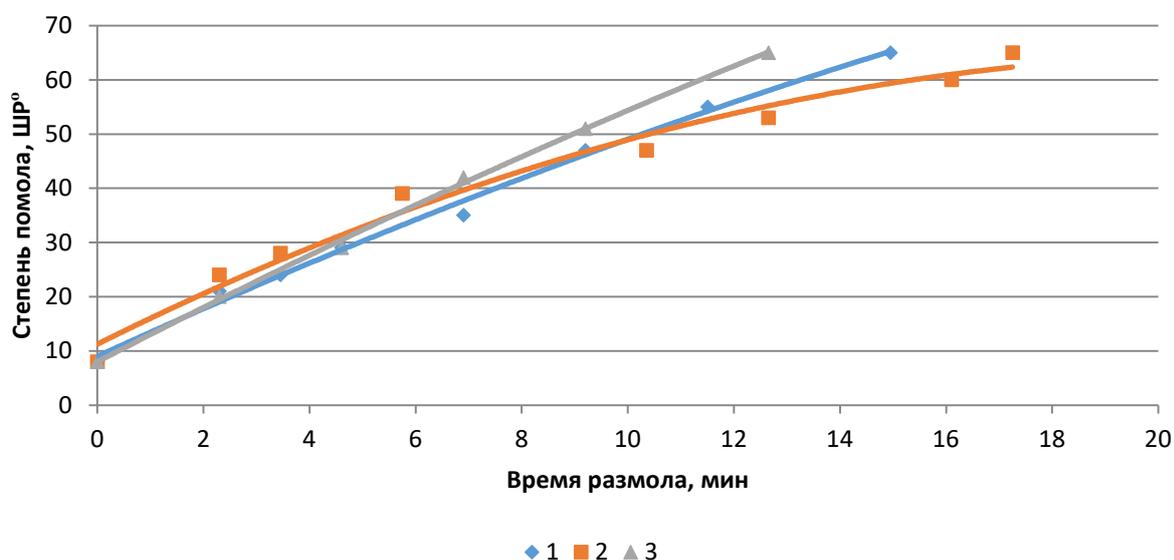


Рисунок 1 – Зависимость степени помола по шкале Шоппер-Риглера от времени размолу:

1 – размол технической конопли при концентрации 1 %; 2 – размол технической конопли при концентрации 1,5 %; 3 – размол технической конопли при концентрации 0,5 %

Как показано на рисунке, во всех случаях размолу происходят изменения, как в качественном, так и в количественном виде. Независимо от конкретных условий размолу или типа полуфабриката, время, необходимое для обработки волокон, увеличивается, что потенциально может повлиять на общую производительность процесса размолу.

Качественные характеристики процесса размолу проявляют параболическую тенденцию при концентрации 1,5 %. И наоборот, при концентрациях 1 % и 0,5 % качественные характеристики имеют линейный характер. Кроме того, независимо от типа обрабатываемого полуфабриката, количественные показатели остаются относительно неизменными при безножевом размолу. Исследования Ю. П. Лосева показывают, что с увеличением концентрации суспензии воздействие кавитации уменьшается [8]. Представленные выше графические данные подтверждают эти выводы, демонстрируя, что с увеличением концентрации интенсивность процесса размолу снижается. Это связано с тем, что при более низких концентрациях суспензии эффекты кавитации более значительны.

На рисунке 2 представлены зависимости сопротивления продавливанию готовых изделий от степени помола при различных концентрациях.

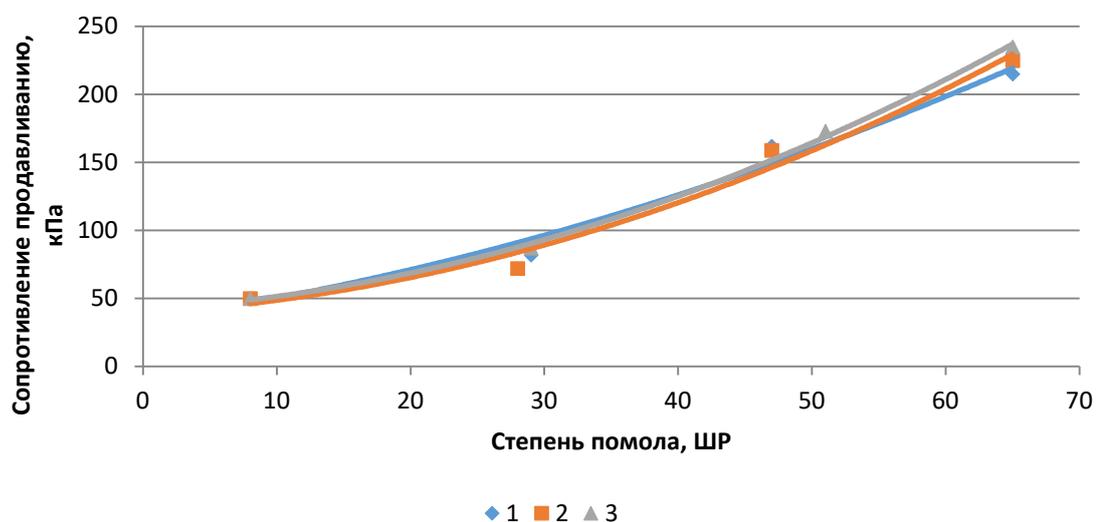


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления к продавливанию от степени помола по шкале Шоппер-Риглера:

1 – размол технической конопли при концентрации 1 %; 2 – размол технической конопли при концентрации 1,5 %; 3 – размол технической конопли при концентрации 0,5 %

Сопротивление продавливанию – это сложное явление, которое включает в себя как способность материала сопротивляться разрушению, так и удлинению. Это сопротивление в первую очередь определяется длиной волокон и силой сцепления между ними. На графике показано, что качественные показатели для всех концентраций являются близкими друг к другу. Количественные показатели показывают схожие результаты по всем концентрациям.

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления к излому готовых изделий от степени помола при различных концентрациях.

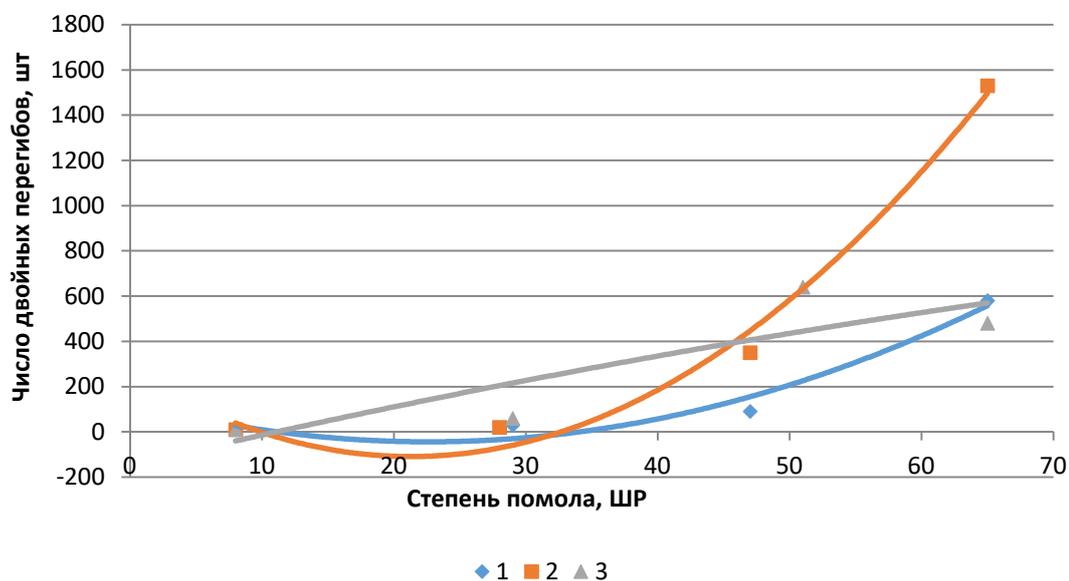


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления к излому от степени помола по шкале Шоппер-Риглера:

1 – размол технической конопли при концентрации 1 %; 2 – размол технической конопли при концентрации 1,5 %; 3 – размол технической конопли при концентрации 0,5 %

На рисунке 3 видно, что при изменении концентрации волокнистой суспензии графические данные имеют различный характер. Качественные показатели схожи для концентраций волокнистых суспензий для 1 % и 1,5 % и имеют параболический характер. И

наоборот, для концентрации 0,5 % качественные показатели имеют близкий к линейному. Количественные данные демонстрируют различный вид. При размолу массы с концентрацией в 1,5 % наблюдается более высокие количественные значения, значительно отличающиеся от размолу массы с концентрациями 0,5 % и 1 %. Как видно из рисунка, при размолу массы с концентрацией 1,5 % значения сопротивления к излому увеличиваются в 3 раза по сравнению с более низкими концентрациями.

Исходя из исследования намечаются следующие выводы:

1. Степень помола от времени размолу по шкале Шоппер-Риглера при показателях концентрации от 0,5 % до 1,5 % практически не отличается друг от друга.
2. Аналогичная ситуация наблюдается при изменении сопротивлению продавливания о степени помола по шкале Шоппе-Риглера.
3. Что касается физико-механического показателя числа двойных перегибов от степени помола по шкале Шоппе-Риглера, то наблюдается значительное изменение как качественных, так и количественных зависимостей, особенно качественные зависимости изменяются с повышением концентрации.

Список литературы

1. Корда, Ж. Размол бумажной массы / Ж. Корда, З. Либнар, Ю. Прокоп. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 421 с.
2. Алашкевич, Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах [Текст] : дис. ... док. техн. наук: 05.21.03 / Ю. Д. Алашкевич. – Красноярск, 1987. – 361 с.
3. Патент № 2363792 С1 Российская Федерация, МПК D21C 1/00. установка для измельчения волокнистого материала: № 2008119775/12: заявл. 19.05.2008: опубл. 10.08.2009 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, А. И. Невзоров, Р. А. Марченко; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет».
4. Марченко Роман Александрович. Интенсификация безножевого размолу волокнистых полуфабрикатов в целлюлозно-бумажном производстве: диссертация ... кандидата Технические наук: 05.21.03 / Марченко Роман Александрович; [Место защиты: Сибирский государственный технологический университет], 2016.- 161 с.
5. Koren, A.; Sikora, V.; Kiproviski, B.; Brdar-Jokanovi´c, M.; A´cimovi´c, M.; Konstantinovi´c, B.; Latkovi´c, D. Controversial taxonomy of hemp. *Genetika* 2020, 52, 203–212.
6. J. Fike, Industrial hemp: renewed opportunities for an ancient crop, *Crit. Rev. Plant Sci.* 35 (2016) 406–424, <https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1257842>.
7. Влияние концентрации волокнистой массы из технической конопли на физико-механические характеристики готовой продукции / А. А. Карелина, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, К. А. Хохлов // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов : Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – Архангельск, 2023.
8. Лосева Ю. П. Использование электрогидравлического эффекта в бумажной промышленности // Бум. пром-сть. – 1957. – № 9. – С. 8-9.

THE IMPACT OF INDIVIDUAL VARIABLES DURING NON-ZERO MILLING ON FINISHED PRODUCTS FROM ANNUAL PLANTS

M. M. Litvinova*, Yu. D. Alashkevich, R. A. Marchenko
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
**E-mail: marg32883@gmail.com*

The abstract. As is known, the main raw material of the pulp and paper industry is usually coniferous and deciduous wood, but the first option is most often used in technology. Taking into account the features of the physical and mechanical characteristics of finished products made of coniferous wood compared to deciduous wood, it is known that in comparison with these two types of wood, coniferous wood has longer fibers. And as is known, the length of the fibers is of significant importance, both for the paper-forming properties of fibrous semi-finished products, and the physical and mechanical characteristics of finished products of pulp and paper production. Taking into account the need to use annual plants in the technology of pulp and paper production, it is natural that there is a need to study the processes of fibrous semi-finished products from annual plants, in comparison with the mechanism of grinding fibrous semi-finished products from wood, and primarily their coniferous wood.

Keywords: grinding, vegetable polymers, paper products, grinding of technical hemp.

References

1. Korda, J. Grinding of paper pulp / J. Korda, Z. Libnar, Y. Prokop. M.: Forest industry, 1967. 421 p.
2. Alashkevich, Yu. D. Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines [Text]: dis. ... doctor of Technical Sciences: 05.21.03 / Yu. D. Alashkevich. Krasnoyarsk, 1987. 361 p.
3. Patent No. 2363792 C1 Russian Federation, IPC D21C 1/00. installation for crushing fibrous material: No. 2008119775/12: application. 05/19/2008: publ. 08/10/2009 / Yu. D. Alashkevich, V. I. Kovalev, A. I. Nevzorov, R. A. Marchenko; applicant State Educational Institution of Higher Professional Education "Siberian State Technological University".
4. Roman Alexandrovich Marchenko. Intensification of knife-free grinding of fibrous semi-finished products in pulp and paper production: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.21.03 / Marchenko Roman Alexandrovich; [Place of protection: Siberian State Technological University], 2016. - 161 p.
5. Koren, A.; Sikora, V.; Kiproviski, B.; Brdar-Jokanovi'c, M.; A'cimovi'c, M.; Konstantinovi'c, B.; Latkovi'c, D. Controversial taxonomy of hemp. *Genetika* 2020, 52, 203–212.
6. J. Fike, Industrial hemp: renewed opportunities for an ancient crop, *Crit. Rev. Plant Sci.* 35 (2016) 406–424, <https://doi.org/10.1080/07352689.2016.1257842>.
7. The influence of the concentration of fibrous mass from technical hemp on the physical and mechanical characteristics of finished products / A. A. Karelina, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov, K. A. Khokhlov // Problems of mechanics of pulp and paper materials: Materials of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V.I. Komarov, Arkhangelsk, September 14-16, 2023 / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov".
8. Loseva Yu.P. The use of the electrohydraulic effect in the paper industry // *Boom. prom.* 1957. No. 9. pp. 8-9.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Э. Л. Аким, О. А. Ерохина*, П. М. Мухина, О. В. Федорова

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

**E-mail: art-stones@bk.ru*

Аннотация. Широкое применение целлюлозных композиционных материалов с полимерными покрытиями в качестве упаковки предполагает разработку новых видов композиционных материалов с высокой степенью биоразложения. В данной работе исследовано влияние природного полимера – арабиногалактана (АГ) и технологической добавки А-Len ТЕСН на физико-механические свойства композитов, и изучена устойчивость этих материалов к естественному воздействию почвенной среды.

Ключевые слова: биоразлагаемая упаковка, арабиногалактан, технологические добавки

Введение

Спрос на упаковочные материалы с каждым годом возрастает. Наиболее широко используются материалы с полимерным покрытием, обладающие всем комплексом требуемых свойств для упаковки. Важным критерием для таких упаковочных материалов является их биоразложение [1, 2]. По прогнозам экспертов, к концу 2025 г. доля экоупаковки достигнет более 50 % от всего объема выпускаемой тары. В связи с этим является актуальным создание новых видов композиционных материалов с полимерным покрытием с высокой степенью биоразлагаемости [3-5].

В СПбГУПТД ВШТЭ в течение нескольких лет проводятся работы в рамках программы «Приоритет-2030» по направлению «Биоразлагаемая упаковка». В рамках исследований по биоразлагаемой упаковке были проведены работы по получению целлюлозного композиционного материала (ЦКМ) с полиэтиленовым покрытием (ПЭ) и биоразлагаемыми добавками; методом инкубации в почвенную среду изучена их устойчивость к деградации под воздействием естественных условий [6, 7].

Методическая часть

Образцы ЦКМ с ПЭ получали на пилотной экструзионной ламинаторной установке (ПЭЛУ, Россия, 2004 г.). Рабочая температура экструдера при работе с гранулами ПЭ составляет 260 °С, а рабочая температура при работе со смесью гранул ПЭ и технологической добавки А-Len ТЕСН – 240 °С. Скорость шнека составляет 60 об/мин.

Для исследований использовали:

- бумагу мешочную SKI80 масса 1 м² – 80 г/м² (ПАО «Сегежа Групп», Россия);
- полиэтилен низкой плотности 11503-070, показатель текучести 7 г/10 мин (ПАО «Сибур-Холдинг», Россия);
- технологическую добавку А-Len ТЕСН, показатель текучести 17-33 г/10 мин (АПО «Алеко-Полимеры», Россия);
- арабиногалактан, полученный путем экстракции из опилок лиственницы с последующей вакуумной сушкой (СПбГУПТД ВШТЭ, Россия).

На мешочную бумагу с помощью экструдера через шелевую головку наносили расплав ПЭ или смесь ПЭ и технологической добавки А-Len ТЕСН (Пр), которая смешивается с гранулами исходного ПЭ в количестве 6 % от массы.

Для придания биоразлагаемости на поверхность полученных образцов ЦКМ наносили водный раствор АГ (16 %) [4], а затем высушивали при комнатной температуре до постоянной массы. Для более полного проникновения АГ в ПЭ перед нанесением поверхность обрабатывали этиловым спиртом.

Для исследования использовали следующие методы:

- Деформационно-прочностные характеристики измеряли 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 $W=50\pm 2$ %;
- Устойчивость к воздействию естественного комплекса почвенной среды на ЦКМ оценивали методом инкубации материалов в почву в течение 20, 40 и 60 дней с последующим сопоставлением их физико-механических и упруго-релаксационных свойств с аналогичными свойствами исходных образцов.

Экспериментальная часть

На рисунке 1 представлены диаграммы растяжения различных композиционных материалов:

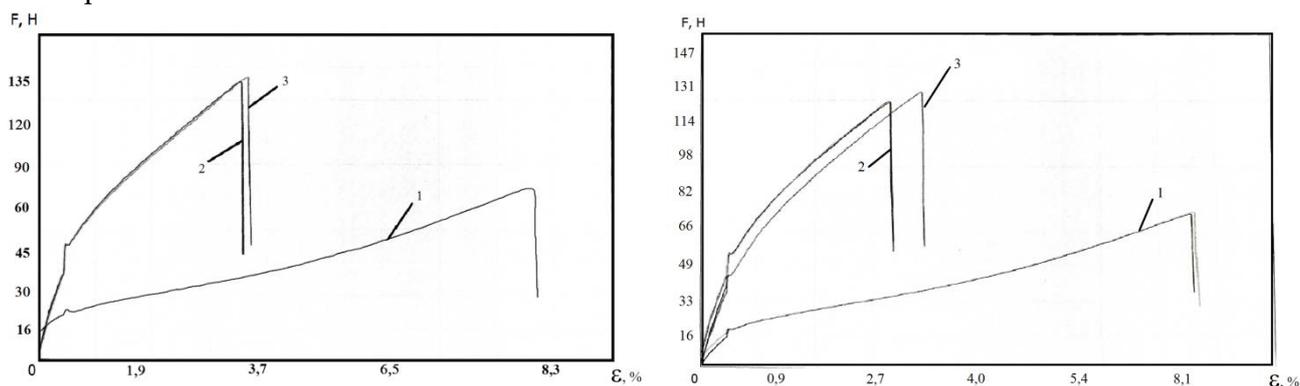


Рисунок 1 – Диаграммы растяжения различных композиционных материалов:

А

1 – бумага (Б); 2 – бумага + полиэтилен (Б+ПЭ); 3 – бумага + полиэтилен с арабиногалактаном (Б+ПЭ+АГ)

Б

1 – бумага (Б); 2 – бумага + полиэтилен (Б+ПЭ); 3 – бумага + полиэтилен с технологической добавкой А-Len ТЕСН (Б+ПЭ+Пр)

Из данных, представленных на рисунке 1 (А), видно, что кривая 1 представляет собой типичную для мешочной бумаги зависимость нагрузки от деформации, состоящую из 3-х характерных областей: упругой, высокоэластической и вынужденно-эластической. Нанесение на поверхность бумаги полиэтилена придает КМ (Б+ПЭ) более высокую прочность и жесткость материалу, усилие при разрыве увеличивается примерно в 2 раза, модуль эластичности увеличивается в 1,5 раза, относительная деформация при разрыве снижается примерно вдвое (кривая 2). Форма кривой несколько меняется: увеличивается упругая область за счет влияния на структуру образца полиэтилена и практически отсутствует третий участок, что характерно для хрупкого разрушения образцов ЦКМ. Обработка поверхности КМ арабиногалактаном незначительно повышает прочностные и деформационные свойства (кривая 3), что объясняется свойствами жесткоцепного полимера (АГ) [1, 2]. В то же время вид кривой не меняется.

На рисунке 1 (Б) представлены диаграммы растяжения композиционного материала (Б+ПЭ+Пр) в сравнении с другими материалами. Из данных, представленных на рисунке 1, видно, что использование в композиции технологической добавки А-Len ТЕСН приводит к формированию структуры материала с прочностными характеристиками, примерно на 10 % выше, чем у образцов Б+ПЭ, что объясняется составом и свойствами этой добавки. Технологическая добавка А-Len ТЕСН представляет собой продеградант – металлическую соль, которая оказывает влияние на структуру материала как наполнитель и реагирует на определенные условия.

Исследование скорости биологического разложения разработанных композиционных материалов оценивали методом почвенного воздействия в течение 20-60 дней, путем

сопоставления характеристик образцов после воздействия почвенной среды с исходными. В таблице 1 представлено изменение (потеря) массы образцов после почвенного воздействия.

Таблица 1 – Изменение массы образцов ЦКМ после почвенного воздействия

Время почвенного воздействия, дней	Вид образца					
	ПЭ	ПЭ+АГ	Б+ПЭ	Б+ПЭ+АГ	Б+ПЭ+Пр	Б+ПЭ+Пр+АГ
	Изменение массы образцов ЦКМ Δ , %					
20	2,4	9,3	38,1	48,7	35,1	48,7
40	2,5	7,0	50,0	53,2	36,5	54,9
60	2,5	6,0	53,9	54,1	41,7	55,6

Из таблицы видно, что у всех образцов ПЭ по-разному происходит незначительное снижение веса с течением времени. Это связано с его химической структурой и устойчивостью к биологическому разложению.

У образцов Б+ПЭ и Б+ПЭ+Пр наблюдается активное снижение веса в течение первых 20 дней, вследствие расщепления бумаги на фракцию около 1-2 мм, а образцы бумаги, покрытые АГ, – на фракцию менее 1 мм. При увеличении времени почвенного воздействия до 40-60 дней масса изменялась незначительно.

На рисунке 2 представлены результаты влияния почвенного воздействия на напряжение при разрушении у различных образцов ЦКМ:

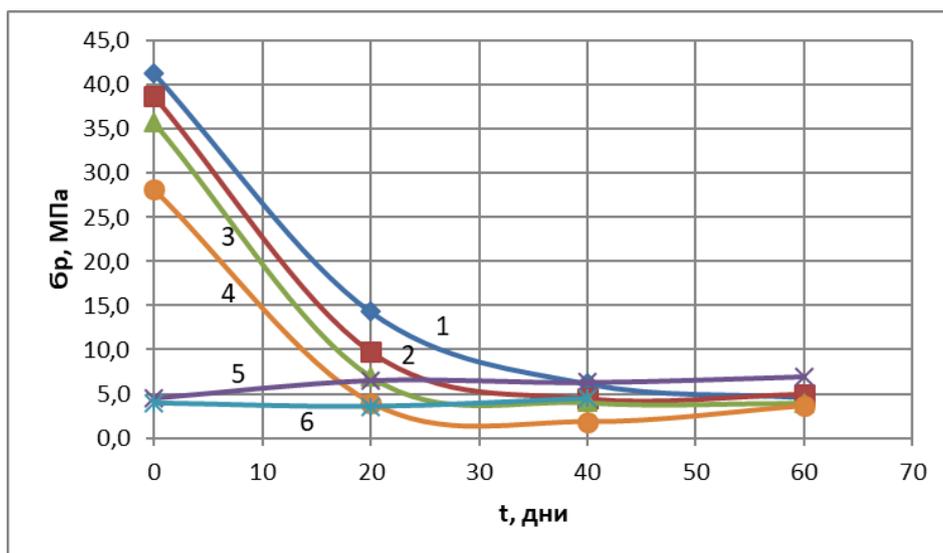


Рисунок 2 – Влияние почвенного воздействия на напряжение при разрушении у образцов ЦКМ:

1 – Б+ПЭ; 2 – Б+ПЭ+АГ; 3 – Б+ПЭ+Пр; 4 – Б+ПЭ+Пр+АГ; 5 – ПЭ; 6 – ПЭ+АГ

Из данных, представленных на рисунке 2, видно, что после биологического воздействия в течение 20 дней прочность образцов Б+ПЭ существенно падает, что, вероятно, связано с биологическим разложением в первую очередь слоя бумаги и слоя композита – Б+ПЭ, а также механодеструкцией в земле ПЭ. Такое изменение структуры композита также подтверждает изменение массы и толщины образцов, затем в интервале 20-60 дней. В дальнейшем через 40-60 дней величина разрывной прочности у образцов ПЭ+АГ изменяется незначительно.

У образцов Б+ПЭ+АГ разрывное напряжение падает еще на 10 % по сравнению с образцами без АГ, что объясняется деструкцией поверхности полиэтилена и

микробиологическим воздействием на поверхность образца. На поверхности с АГ за 20 дней вырастают споры грибов.

На рисунке 3 представлено влияние почвенного воздействия на поглощающую энергию при разрушении различных образцов ЦКМ:

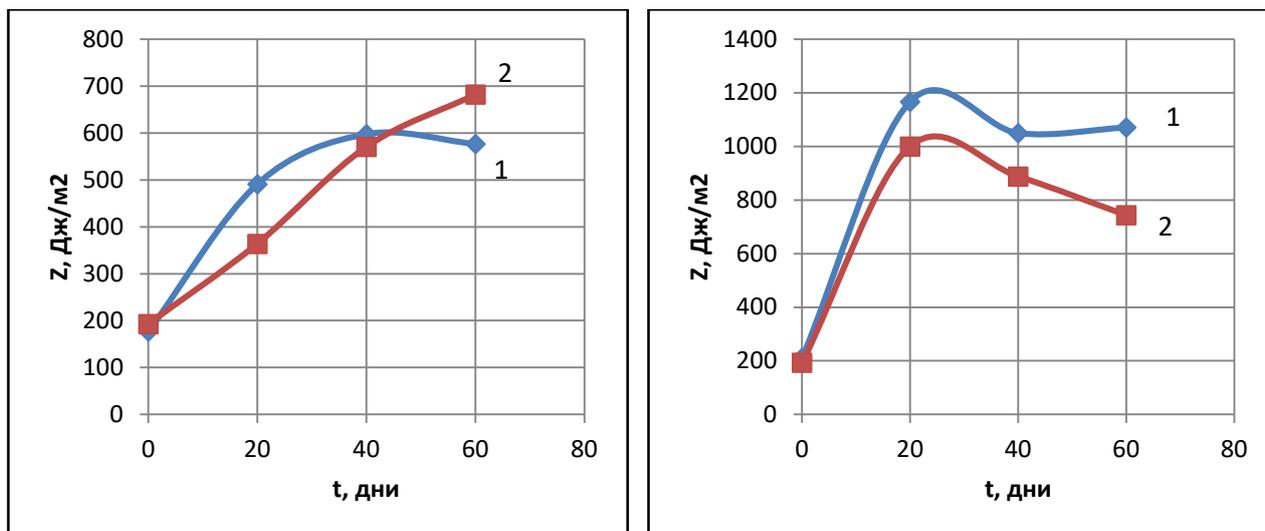


Рисунок 3 – Влияние почвенного воздействия на поглощающую энергию при разрушении у образцов ЦКМ:

А
1 – Б+ПЭ; 2 – Б+ПЭ+АГ

Б
1 – Б+ПЭ+Пр; 2 – Б+ПЭ+Пр+АГ

Поглощающая энергия при разрушении у образцов Б+ПЭ и Б+ПЭ+АГ с увеличением времени почвенного воздействия от 20 до 60 дней возрастает (рис. 3, А), что объясняется расщеплением бумаги, биоразложением слоя Б+ПЭ, и деструкцией ПЭ. Действие АГ активизирует процесс биоразложения.

Из рисунка 3 (А и Б) видно, что влияние почвенного воздействия в течение 20 дней на образцы композита Б+ПЭ+Пр оказывает большее влияние на величину поглощающей энергии при разрушении, чем на образцы Б+ПЭ. При этом величина поглощающей энергии разрушения в течение первых 20 дней увеличивается. Затем, в течение 40-60 дней у Б+ПЭ величина поглощающей энергии продолжает возрастать за счет увеличения разрывной деформации, а у образцов Б+ПЭ+Пр она снижается на 17 %, за счет специфических свойств технологической добавки А-Len ТЕСН, которая при почвенном воздействии запускает процесс реакции деструкции в структуре полимера, что связано с разрушением его цепочек.

Кроме того, у композитов при комплексном воздействии технологической биоразлагаемой добавки А-Len ТЕСН и арабиногалактана (рис. 3, Б) наблюдается снижение поглощающей энергии разрушения и модуля упругости еще на 10 % по сравнению с материалом Б+ПЭ+Пр, что свидетельствует о более активной биодеградации за счет АГ.

Выводы:

1. Установлено, что обработка композита Б+ПЭ арабиногалактаном (АГ) оказывает более активное воздействие на его биодеградацию при почвенном воздействии в течение 40-60 дней, что подтверждается снижением разрывного напряжения и работы разрушения примерно на 10 %, по сравнению с материалом без АГ, объясняется деструкцией поверхности полиэтилена и микробиологическим воздействием на поверхность образца.

2. Композит с биоразлагаемой добавкой Б+ПЭ+Пр активнее разлагается в почвенной среде, чем композит Б+ПЭ, что определяется способностью реагировать на определенные условия: воздействие почвы, тепла или света.

3. Обработка композита с биоразлагаемой добавкой Б+ПЭ+Пр арабиногалактаном усиливает его разложение ПЭ, что видно из результатов измерения прочностных и деформационных свойств.

4. Исследования показали, что введение в синтетические полимеры добавок, обеспечивающих биodeградируемость, меняют скорость выделения углекислого газа, но не меняют общую величину карбонового следа.

***Работа выполнена в рамках стратегического проекта «Развитие производства биоразлагаемой упаковки на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП)» по программе «Приоритет 2030».*

Список литературы

1. Аким Э. Л., Пекарец А. А., Розов Е. Ю. Курындин И. С., Ельяшевич Г. К. / Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2022. – Том 64, № 4. – С. 280-286.
2. Роговина С. З. Биоразлагаемые полимерные композиции на основе синтетических и природных полимеров различных классов // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2016. – № 1. – С. 68-80.
3. Роговина С. З., Аким Э. Л., Берлин А. А. Использование природного полисахарида арабиногалактана в композиционных материалах // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2021. – № 3. – С. 2-8.
4. Ельяшевич Г. К., Ерохина О. А., Сергеева Е. В., Розова Е. Ю., Курындин И. С., Пекарец А. А., Аким Э. Л. Физико-механические и релаксационные свойства композитов на основе арабиногалактана и пористых полиэтиленовых пленок // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова. – 2023. – № 7. – С. 316-321.
5. Лешина А. Пластики биологического происхождения // Химия и жизнь – XXI век: ежемесячный научно-популярный журнал. – 2012. – № 9. – С. 2-5.
6. Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 02 04 «Технология пластических масс» / Э. Т. Крутько, Н. Р. Прокопчук, А. И. Глоба. – Минск: БГТУ, 2014. – 105 с.
7. Борисов, Е. В центре внимания – биоразлагаемые полимеры / Е. Борисов // The Chemical Journal. – 2005. – № 5. – С. 68-71.

INVESTIGATION OF BIODEGRADABILITY OF CELLULOSE COMPOSITE MATERIALS WITH POLYETHYLENE COATING

E. L. Akim, O. A. Erokhina*, P. M. Mukhina, O. V. Fedorova
Higher School of Technology and Energy of SPbSUITE, St. Petersburg

*E-mail: art-stones@bk.ru

The abstract. The widespread use of cellulose composite materials with polymer coatings as packaging involves the development of new types of composite materials with a high degree of biodegradation. In this paper, the influence of a natural polymer - arabinogalactan (AG) and a technological additive A-Len TECH on the physical and mechanical properties of composites is investigated, and the resistance of these materials to the natural effects of the soil environment is studied.

Keywords: biodegradable packaging, arabinogalactan, technological additives.

References

1. Akim E. L., Pekarets A. A., Rozov E. Yu. Kuryndin I. S., El'yashevich G. K. *Vysokomolekulyarnye soedineniya [High molecular weight compounds]. Seriya A, tom 64, 2022, № 4, pp. 280-286. (In Russian).*

2. Rogovina S.Z. *Biorazlagaemye polimernye kompozitsii na osnove sinteticheskikh i prirodnykh polimerov razlichnykh klassov* [Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya S.]. 2016, № 1, pp. 68–80. (In Russian).
3. Rogovina S.Z., Akim E.L., Berlin A.A. *Ispol'zovanie prirodnogo polisakharida arabinogalaktana v kompozitsionnykh materialakh* [Biodegradable polymer compositions based on synthetic and natural polymers of various classes]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [High molecular weight compounds]. 2021. № 3. pp. 2–8. (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 arabinoglaktana i poristykh polietilenovykh plenok* [Physico-mechanical and relaxation properties of composites based on arabinoglactane and porous polyethylene films]. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov. Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni professora V.I. Komarova* [Problems of mechanics of pulp and paper materials. Materials of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V.I. Komarov]. 2023, №7, pp. 316-321. (In Russian).
5. A. Leshina *Plastiki biologicheskogo proiskhozhdeniya* [Plastics of biological origin]. *Khimiya i zhizn' - XXI vek, ezheemesyachnyy nauchno-populyarnyy zhurnal* [Chemistry and life - XXI century: monthly popular science journal]. 2012, № 9, pp. 2-5. (In Russian).
6. E. T. Krut'ko, N. R. Prokopchuk, A. I. Globa *Tekhnologiya biorazlagaemykh polimernykh materialov ucheb.-metod. posobie dlya studentov spetsial'nosti 1-48 01 02 Khimicheskaya tekhnologiya organicheskikh veshchestv, materialov i izdeliy spetsializatsii 1-48 01 02 04 «Tekhnologiya plasticheskikh mass* [Technology of biodegradable polymer materials: textbook.- the method. manual for students of specialty 1-48 01 02 "Chemical technology of organic substances, materials and products" specialization 1-48 01 02 04 "Technology of plastic masses"]. Minsk, BGTU, 2014, 105 p. (In Russian).
7. Borisov, E. V *Tsentre vnimaniya — Biorazlagaemye polimery* [In the center of attention — Biodegradable polymers]. *The Chemical Journal* [The Chemical Journal]. 2005, № 5, pp. 68-71. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАРНИТУРЫ ПРИ НОЖЕВОМ РАЗМОЛЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В ЦБП

А. А. Петрова*, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич
*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск*
*E-mail: www.sss19951@gmail.com

Аннотация. В целлюлозно-бумажном производстве процесс размол волокнистых полуфабрикатов является одной из важнейших технологических операций. Немаловажное влияние на характер процесса размол оказывает конструкция рабочих органов дисковой мельницы, которая при классическом подходе требует изготовления новых дисков гарнитур для изменения их рисунка. Представленная конструкция комбинированной гарнитуры позволяет менять рисунок гарнитуры с использованием имеющегося набора концентрических колец с изменением их установки и отдельных углов поворота, что позволяет получить различные характеристики разрабатываемого полуфабриката с использованием одного набора гарнитур и снижает затраты на изготовление новых рисунков гарнитур. В данной статье рассматриваются конструктивные особенности комбинированной гарнитуры дисковой мельницы, проводится сравнение волнообразной и конической полостей размол, а также влияние изменения рисунка гарнитуры на процесс размол. В ходе исследований получены и проанализированы основные бумагообразующие свойства волокнистого полуфабриката и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок.

Ключевые слова: волокнистый полуфабрикат, размол, дисковая мельница, размалывающая гарнитура.

В технологическом цикле производства бумажной продукции важное место занимает этап подготовки волокнистого материала, а именно его размол до необходимых показателей. В процессе размол волокно подвергается обработке как в продольном, так и в поперечном направлениях, приобретая необходимые бумагообразующие характеристики. На характер процесса размол влияет множество факторов, таких как зазор между ножами диска ротора и статора, скорость вращения ротора, концентрация волокнистой массы и вид используемого сырья. Перечисленные факторы являются управляемыми и могут настраиваться в зависимости от требуемых характеристик готовой продукции.

Немаловажным управляемым фактором является конструкция размалывающей гарнитуры дисковой мельницы. В связи с этим актуально исследование и создание принципиально новых видов размалывающих гарнитур, позволяющих снизить энергетические затраты и повысить качество размол, без значительного увеличения себестоимости продукции и модернизации производственных процессов. Созданию и изучению влияния на размол конструкции гарнитур дисковых мельниц посвящено большое количество научных работ учеников школы академика РАО Ю.Д. Алашкевича [1-4].

Гарнитуры дисковых мельниц отличаются рисунком ножевой поверхности, углом установки ножей и профилем размольной полости, которая у традиционных гарнитур чаще всего выполнена плоской. Однако на кафедре «Машины и аппараты промышленных технологий» СибГУ была сконструирована и изготовлена комбинированная гарнитура (рис. 1) с усложненным профилем размалывающей полости [5].

Комбинированная размалывающая гарнитура состоит из пяти разновысоких концентрических колец на диске ротора и статора, что позволяет в одной гарнитуре сочетать как традиционное плоское исполнение, так и элементы конической гарнитуры. Данная конструктивная особенность позволяет, путем перестановки второго и четвертого колец диска ротора на диск статора, создавать коническую (рис. 1, а) и волнообразную (рис. 1, б) полость размол.

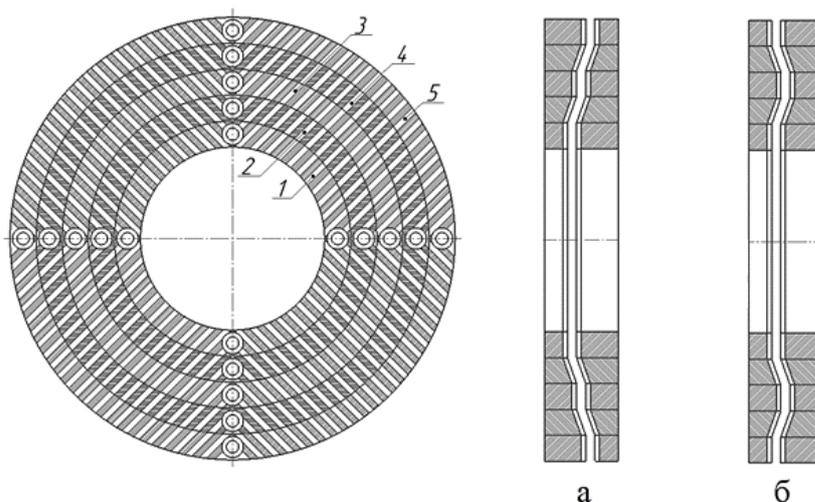


Рисунок 1 – Комбинированная гарнитура дисковой мельницы:
а – коническая полость размола; б – волнообразная полость размола

В ходе изучения влияния полости размола на бумагообразующие свойства, такие как прирост степени помола (СП), водоудерживающая способность, средняя длина волокна, и физико-механические характеристики готовых бумажных отливок, такие как разрывная длина, число двойных перегибов, сопротивление раздиранию, был проведен размол белой сульфатной целлюлозы производства ОАО «Группа «Илим» (г. Братск) при следующих параметрах:

- концентрация волокнистой массы – 2 %;
- межножевой зазор – 0,2 мм;
- частота вращения ротора – 2000 об/мин;
- рисунок ножевой поверхности – прямолинейные однонаправленные ножи (рис. 1).

В результате проведенных исследований [6, 7] было установлено, что:

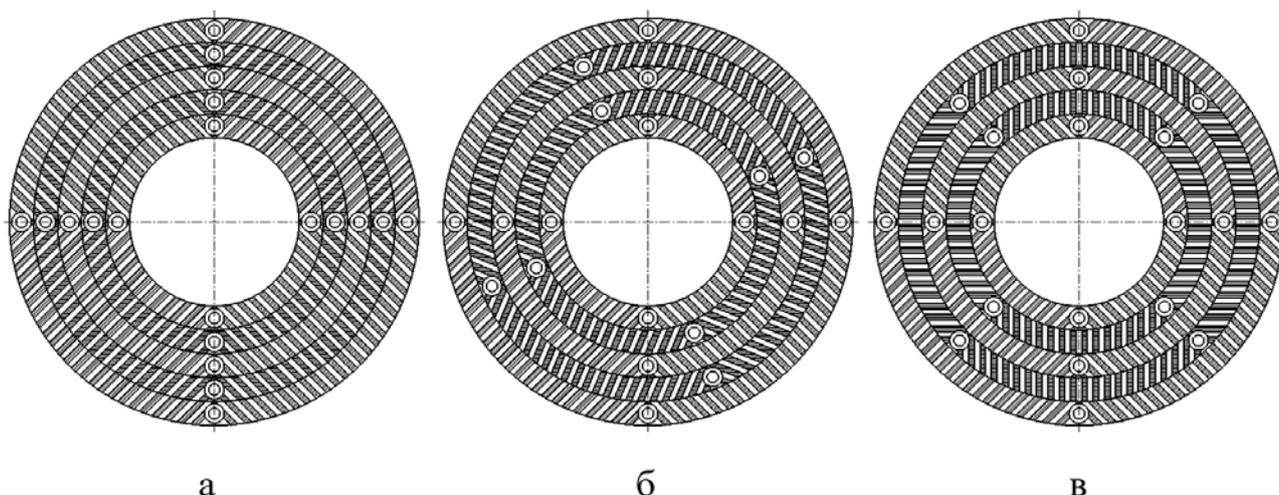
- *прирост степени помола* для обеих полостей размола идентичен;
- *показатель водоудерживающей способности* в обоих случаях увеличивается с приростом СП до 60°ШР, с дальнейшим увеличением СП количественные значения данного показателя для конической полости размола снижаются;
- *средняя длина волокна* с приростом СП уменьшается более интенсивно при использовании конической полости размола, чем при использовании волнообразной полости;
- *показатель разрывной длины* в обоих случаях увеличивается с ростом СП до 60°ШР, с дальнейшим ростом СП данный показатель при использовании волнообразной полости размола увеличивается, а при использовании конической уменьшается;
- *показатель числа двойных перегибов* с ростом СП увеличивается для обеих полостей размола, а количественные значения при размоле до 30°ШР близки друг к другу, с дальнейшим ростом СП данный показатель при использовании волнообразной полости размола увеличивается более интенсивно и при достижении 75°ШР превышает значения для конической полости размола в 2 раза;
- *показатель сопротивления раздиранию* имеет большие количественные значения при использовании волнообразной полости размола, в обоих случаях увеличение этого показателя сохраняется с ростом СП до 50°ШР, при дальнейшем увеличении СП показатель сопротивления раздиранию снижается.

Конструкция комбинированной гарнитуры также позволяет изменять рисунок ножевой поверхности путем поворота отдельных концентрических колец на заданный угол (рис. 2), что позволяет изменять угол установки ножей на выбранных для поворота кольцах относительно радиуса гарнитуры.

В ходе изучения влияния рисунка гарнитуры дисковой мельницы на процесс размола

был проведен ряд экспериментов по размолу белой сульфатной целлюлозы. Исходя из представленных выше данных для размолы была выбрана волнообразная полость. Размол производился при следующих параметрах:

- концентрация волокнистой массы – 2 %;
- межножевой зазор – 0,15 мм;
- частота вращения ротора – 2000 об/мин;
- рисунок ножевой поверхности – прямолинейные однонаправленные (рис. 2, а) и прямолинейные разнонаправленные ножи с поворотом 2 и 4 кольца на 22,5° и 45° (рис. 2, б, в).



а б в
Рисунок 2 – Вариации исполнения рисунка ножевой поверхности статора:
а – прямолинейные однонаправленные ножи; б, в – прямолинейные разнонаправленные ножи

На рисунке 3 представлен график зависимости степени помола от времени размолы. Как видно из графиков, при размолу волокнистой массы на комбинированной гарнитуре с прямолинейными однонаправленными ножами для достижения степени помола 80°ШР потребовалось 40 минут. При использовании рисунков гарнитуры с прямолинейными разнонаправленными ножами количество времени, необходимое для достижения данной степени помола, сокращается в 2 раза. Данную особенность можно объяснить изменением формы рисунка ножей от центра к периферии дисков, за счет которой изменяется траектория движения волокнистой суспензии, увеличивается время ее нахождения в полости размолы и сокращается количество циклов прохождения через размалывающую полость, что позволяет интенсифицировать процесс размолы и уменьшить его продолжительность.

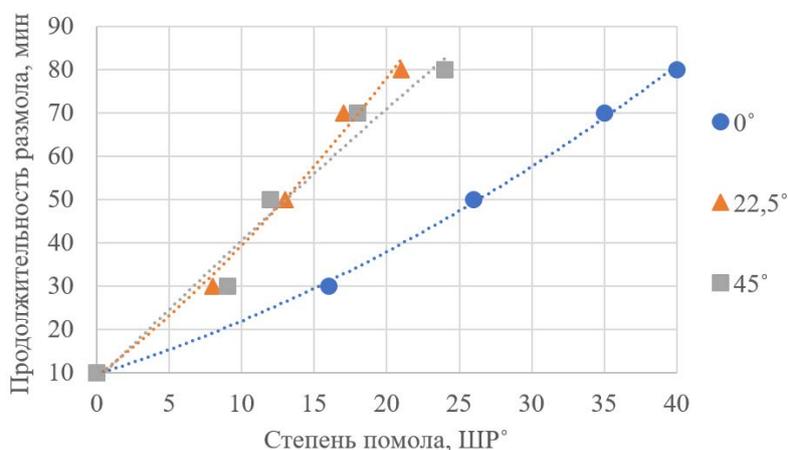


Рисунок 3 – Зависимость степени помола от времени размолы

На рисунке 4 представлен график зависимости разрывной длины бумаги от степени помола. Качественные зависимости для данного показателя во всех представленных случаях имеют параболический характер. Наибольшие значения показателя разрывной длины наблюдаются при использовании гарнитуры с прямолинейными разнонаправленными ножами при повороте колец на 45° , при повороте колец на $22,5^\circ$ количественные значения близки, а при использовании гарнитуры с прямолинейными однонаправленными ножами количественные значения уменьшаются.

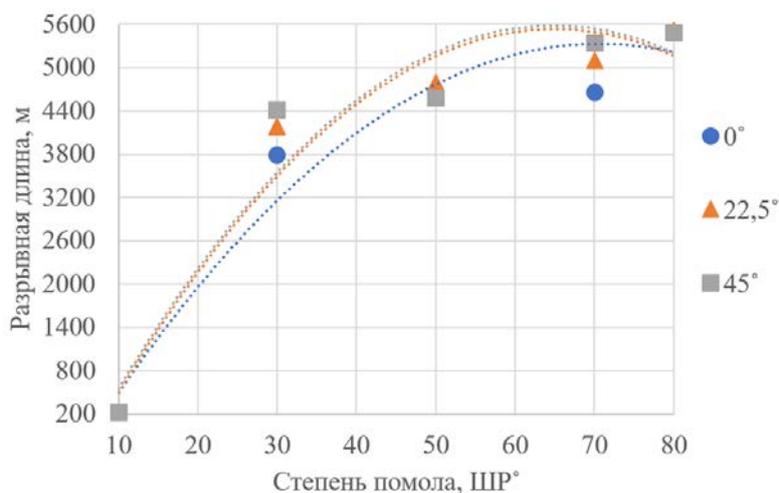


Рисунок 4 – Зависимость разрывной длины бумаги от степени помола

На рисунке 5 представлен график зависимости разрывной длины бумаги от степени помола. Из рисунка видно, что для всех вариантов качественные зависимости носят параболический характер, а наибольшие количественные зависимости наблюдаются у гарнитуры с прямолинейными однонаправленными ножами. При использовании гарнитуры с прямолинейными разнонаправленными ножами количественные значения близки друг к другу, однако показатель сопротивления продавливанию при повороте колец на 45° имеет большие значения, чем при повороте колец на $22,5^\circ$.

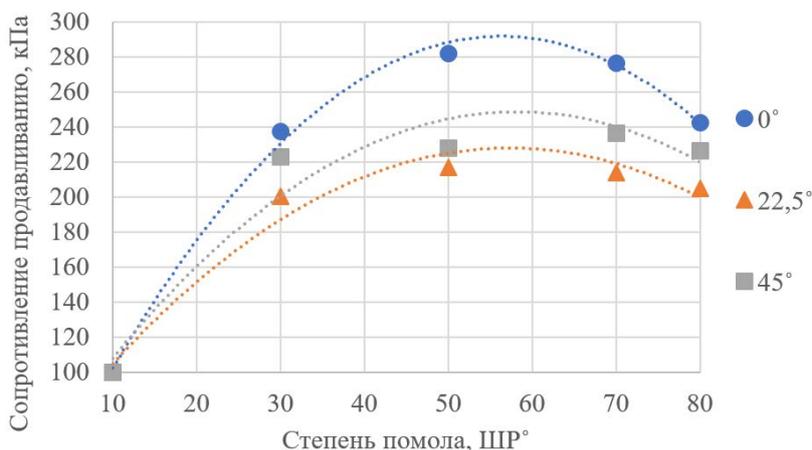


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления продавливанию бумаги от степени помола

Таким образом в ходе проведенных исследований было установлено, что использование волнообразной полости размола при подготовке волокнистого полуфабриката позволяет получить лучшие значения показателей средней длины волокна, разрывной длины, числа двойных перегибов, сопротивления продавливанию и раздиранию в сравнении с конической полостью размола.

Изменение рисунка ножевой поверхности путем поворота колец влияет на процесс размола следующим образом: при использовании рисунка гарнитуры с прямолинейными

однаправленными ножами наблюдаются лучшие значения показателя сопротивления продавливанию, однако меньшее время размола и большие количественные значения показателя разрывной длины присущи рисункам комбинированной гарнитуры с прямолинейными разнонаправленными ножами.

По сравнению с существующими конструкциями гарнитур дисковых мельниц комбинированная гарнитура дает возможность многовариантного исполнения рисунка ножевой поверхности и полости размола с использованием имеющегося набора колец без дополнительных затрат, что позволяет изменять технологические параметры, влияющие на процесс размола и свойства готового продукта.

Список литературы

1. Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Набиева А. А. Влияние рисунка гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов: монография. В 2-х частях. – Ч. 1. – Красноярск: СибГТУ, 2010. – 168 с.
2. Ковалев В. И. Размол волокнистых полуфабрикатов при различном характере построения рисунка ножевой гарнитуры: дис... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 26.10.07. – Красноярск: СибГТУ, 2007. – 209 с.
3. Набиева А. А. Оценка влияния и совершенствования технологических параметров ножевых размалывающих машин: дис... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.21.03. – Красноярск: СибГТУ, 2004. – 156 с.
4. Шуркина, В. И. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. И. Шуркина. – Красноярск, 2016. – 22 с.
5. Патент № 2314380 С1 Российская Федерация, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы: № 2006121708/12: заявл. 19.06.2006: опубл. 10.01.2008 / Ю. Д. Алашкевич, В. И. Ковалев, М. А. Карбышев [и др.]; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет».
6. Петрова, А. А. Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на отдельные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готового продукта / А. А. Петрова, Ю. Д. Алашкевич, И. А. Воронин. Текст: электронный // Химия растительного сырья. – 2023. – № 4. – С. 429-435.
7. Влияние рисунка наборной гарнитуры на процесс размола волокнистого полуфабриката / А. А. Петрова, И. А. Воронин, Ю. Д. Алашкевич [и др.] // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы IV Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 14-15 ноября 2022 года / Отв. редактор О. В. Фёдорова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 57-62.

USING A COMBINED SET FOR KNIFE GRINDING OF FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

A. A. Petrova*, I. A. Voronin, Yu. D. Alashkevich

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

**E-mail: www.sss19951@gmail.com*

The abstract. In pulp and paper production, the process of grinding fibrous semi-finished products is one of the most important technological operations. The design of the disk mill set has an

important influence on the nature of the grinding process, however, despite the variety of designs of grinding sets, some issues still require refinement and changes. This article discusses the design features of a combined disk mill set.

Keywords: fibrous semi-finished product, refining, disk mill, grinding set.

References

1. Alashkevich Yu. D., Kovalev V. I., Nabieva A. A. Vliyanie risunka garnitury na protsess razmola voloknistykh polufabrikatov [Influence of the headset pattern on the process of grinding fibrous semi-finished products]: monografiya. – V 2-kh chastyakh. – Ch. 1. Krasnoyarsk, SibGTU, 2010. – 168 p. (In Russian).
2. Kovalev V. I. Razmol voloknistykh polufabrikatov pri razlichnom kharaktere postroeniya risunka nozhevoy garnitury [Grinding of fibrous semi-finished products with different nature of the construction of the pattern of the knife set]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.21.03. Krasnoyarsk, SibGTU, 2007. – 209 p. (In Russian)
3. Nabieva A. A. Otsenka vliyaniya i sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh parametrov nozhevyykh razmalyvayushchikh mashin [Evaluation of the impact and improvement of technological parameters of knife grinders]: dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk: 05.21.03. Krasnoyarsk, SibGTU, 2004. – 156 p. (In Russian)
4. Shurkina, V. I. Sovershenstvovanie nozhevogo razmola voloknistykh rastitel'nykh polimerov v tsellyulozno-bumazhnom proizvodstve [Improvement of knife grinding of fibrous vegetable polymers in pulp and paper production]: spetsial'nost' 05.21.03 "Tekhnologiya i oborudovanie khimicheskoy pererabotki biomassy dereva; khimiya drevesiny": avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, Shurkina Valentina Ivanovna, Krasnoyarsk, 2016. – 22 p. (In Russian).
5. Alashkevich Yu. D., Kovalev V.I., Karbyshev M.A. [i dr.] Razmalyvayushchaya garniture diskovoy mel'nitsy [Grinding set for disc mill] Patent RF no. 2314380 C1, 2008. (In Russian).
6. Petrova, A. A., Alashkevich Yu. D., Voronin I. A. Vliyanie risunka kombinirovannoy garnitury diskovoy mel'nicy na otdel'nye bumagoobrazuyushchie svoystva voloknistykh polufabrikatov i fiziko-mekhanicheskie harakteristiki gotovogo produkta [Influence of the pattern of the combined grinding set of the disc mill on individual paper-forming properties of fibrous semi-finished products and the physical and mechanical characteristics of the finished product]. Himiya rastitel'nogo syr'ya. – 2023. – № 4. – pp. 429-435. (In Russian)
7. Petrova A. A., Voronin I. A., Alashkevich Yu. D. [i dr.] Vliyanie risunka nabornoj garnitury na process razmola voloknistogo polufabrikata [The influence of the typesetting pattern on the process of grinding fibrous semi-finished products]. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2023. – pp. 57–62. (In Russian)

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМОЛА НЕДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ НА ОТДЕЛЬНЫЕ БУМАГООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТОГО ПОЛУФАБРИКАТА

А. А. Карелина*, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов, А. В. Ушаков

Сибирский государственный университет науки и технологий

имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

**E-mail: karelina.alexandra@mail.ru*

Аннотация. Бумагообразующие свойства волокнистой массы являются фактором, влияющим на формирование бумажного листа. Эти свойства определяют качество и характеристики конечного продукта. Тем важнее иметь возможность контролировать их путем регулировки факторов процесса размол. Поскольку в настоящее время недревесные растения не являются общеупотребимым сырьем для ЦБП, необходимо установить закономерности его обработки и то, какие свойства при этом получает волокнистый полуфабрикат.

Ключевые слова: размол, масса высокой концентрации, техническая конопля, лен, сельскохозяйственные отходы.

Концепция устойчивой экономики все шире реализуется в различных производственных отраслях. Примером устойчивой экономики является экономика, основанная на надлежащем использовании природных ресурсов, при котором используются все их компоненты. Одним из способов реализации этой концепции является повышение ценности побочных продуктов или отходов, образующихся в результате сельскохозяйственной или промышленной деятельности.

В России сельскохозяйственные отходы широко представлены такими лубяными культурами, как лен и техническая конопля. После заготовки этих растений на семена невостребованным остается стебель. Наибольшую ценность в таком случае представляет лубяное волокно (пенька), составляющая наружную часть стебля. Помимо традиционных применений в качестве текстильного и масличного сырья, пенька представляет особый интерес для целлюлозно-бумажной промышленности. Лубяное волокно является превосходным волокнистым материалом, поскольку такие волокна длиннее древесных (20-28 мм), а также содержат больше целлюлозы (до 80 %) [1, 3, 6].

По состоянию на 2023 год объемы заготовки льна-долгунца и технической конопли составляют 50,4 тыс. га, а льна-кудряша – 2,104 млн. га. Лен возделывается в 57 субъектах РФ, а конопля в 31 субъекте. Основными сферами применения являются пищевое, текстильное, медицинское. Такой объем возделывания неизбежно влечет за собой большое количество отходов [5].

Помимо большой длины и высокого содержания целлюлозы заинтересованность в использовании лубяных волокон в качестве альтернативного сырья связана с рядом факторов: ежегодная возобновляемость, более легкая подготовка для обработки, более низкое содержание лигнина и высокие годовые урожаи [11].

В связи с этим расширение применения недревесных растений в качестве сырья для ЦБП является целесообразным.

Основной операцией при производстве бумажной продукции является размол. На данный момент наибольшее распространение получил размол массы низкой концентрации (3-4 %). Однако все большее значение приобретает размол массы высокой концентрации (5-30 %). При выборе концентрации волокнистой массы необходимо учитывать как свойства полуфабриката, так и желаемые характеристики готовой продукции. Учитывая то, что полуфабрикат из недревесного сырья является длинноволокнистым, целесообразно обрабатывать его при высокой концентрации. При таком размоле между ножами ротора и статора образуется толстая волокнистая прослойка, которая позволяет в значительной степени

сохранить исходную длину волокна, направив процесс в сторону фибрилляции, а не укорочения. К другим преимуществам процесса размол массы высокой концентрации относится более низкое энергопотребление в сравнении с размол массы низкой концентрации, рост удельной поверхности волокон и, как следствие, усиление межволоконных связей, увеличение внутреннего фибриллирования, повышение показателей прочности бумаги [8].

Для оценки качества помола в исследовании анализировались такие факторы, как фракционный состав волокнистой массы и индекс фибрилляции.

Размолу на лабораторной дисковой мельнице подвергалась предварительно укороченная волокнистая масса из технической конопли и льна при концентрации 10 %, межножевом зазоре 1,5 мм и скорости вращения ротора 2500 об/мин. На рисунках 1 и 2 представлены изменение фракционного состава волокнистого полуфабриката в процессе размолы и изменение индекса фибрилляции соответственно.

Фракционный состав характеризует соотношение волокон разной длины в волокнистом полуфабрикате. Бумага представляет собой волокнистую сеть, где длинные волокна создают каркас бумажного листа, а короткие волокна заполняют межволоконное пространство, тем самым обеспечивая при этом высокий потенциал связываемости [9].

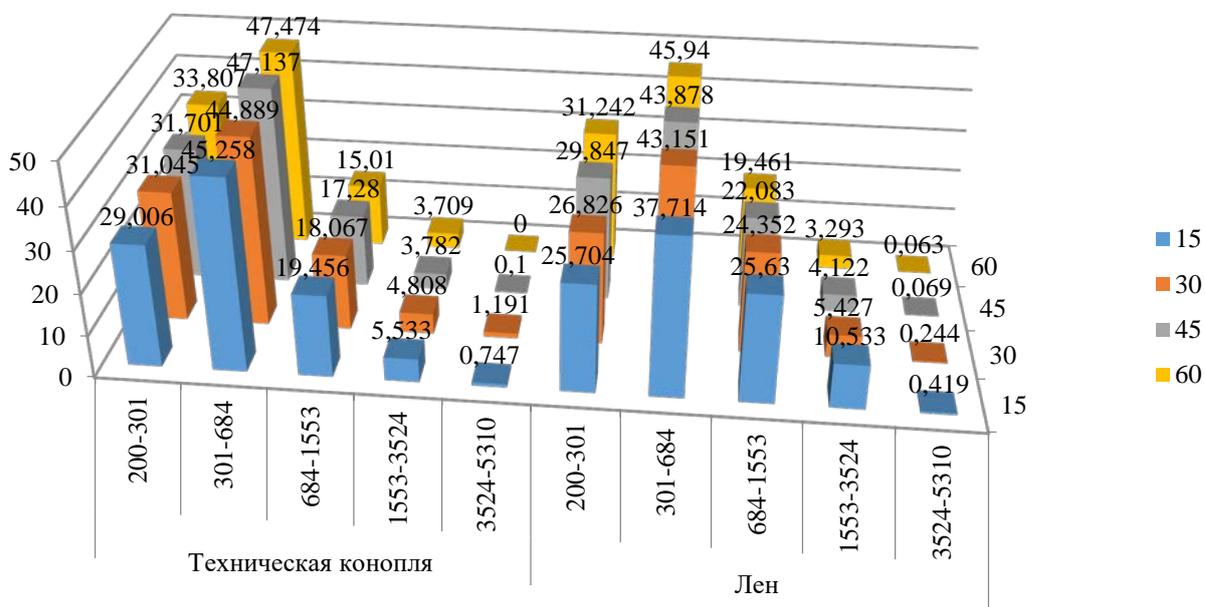


Рисунок 1 – Фракционный состав лубяных полуфабрикатов

Изменение фракционного состава волокнистых полуфабрикатов из технической конопли и льна демонстрирует преимущества размолы при высокой концентрации. На гистограмме видно, что происходит незначительное снижение процентного содержания длинных волокон с одновременным незначительным увеличением коротковолокнистых фракций. Это указывает на преимущественную сохранность исходной длины волокон в процессе обработки для обоих видов лубяного сырья.

В это же время в процессе размолы происходит интенсивное фибриллирование волокон, вызванное большим межволоконным трением. Кроме того, отмечается, что при размолы массы высокой концентрации в межножевом зазоре размалываются не только отдельные волокна, но и пучки волокон, соответственно, при пересечении ножей внутренние волокна в пучке разрушаются по слабым связям вдоль волокон, наблюдается процесс фибрилляции [7].

Фибрилляция относится к процессу разрушения целлюлозных волокон на более тонкие структуры, именуемые фибриллами. Этот процесс увеличивает потенциал связываемости волокон за счет увеличения площади склеивания, вызванный ростом наружной поверхности волокна, а также увеличением числа свободных гидроксильных групп [10].

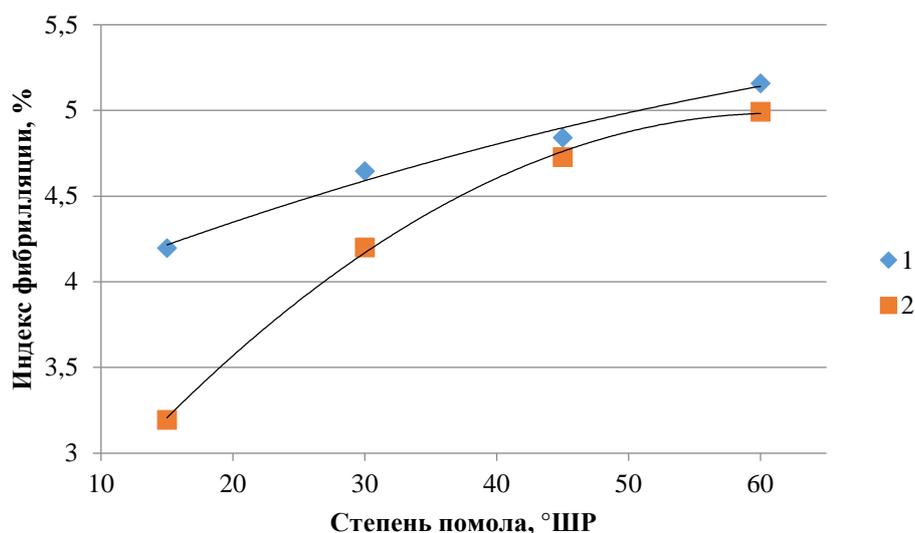


Рисунок 2 – Зависимость индекса фибрилляции волокна от степени помола при использовании различных видов сырья:
1 – техническая конопля; 2 – лен

Анализируя абсолютные значения можно сказать, что наибольшему фибриллированию подверглись волокна технической конопли. При этом индекс фибрилляции конопляных волокон увеличивается постепенно и характер его наиболее близок к линейному.

Первоначальный индекс фибрилляции льняных волокон несколько ниже, чем конопляных. Однако в процессе размола их значения практически сравниваются. Развитие высокой степени фибрилляции и преимущественная сохранность исходной длины волокон обусловлена их морфологией. По сведениям Иванова С.Н. и Матвеева Б.П. лубяные волокна имеют высокую способность к размолу, что связано с почти параллельным расположением фибрилл в волокне. Благодаря этому волокна легко расщепляются и фибриллируются при размоле, образуя жирную массу. Помимо того, получаемая бумага имеет высокую механическую прочность и эластичность [2, 4].

Как показали результаты исследования, лубяные волокна льна и технической конопли являются подходящим альтернативным сырьем для ЦБП. Их природные характеристики, такие как высокое содержание целлюлозы, большая прочность и длина способствуют получению качественной бумажной продукции. Применение размола массы высокой концентрации способствует сохранению преимуществ недревесного сырья и дальнейшему внедрению его в производство бумажной продукции.

Список литературы

1. Актуальные направления селекции конопли посевной для решения современных проблем отечественной экономики и импортозамещения (обзор) / В. А. Серков, Р. О. Белоусов, М. Р. Александрова, О. К. Давыдова // Нива Поволжья. – 2019. – № 3(52). – С. 38-47. – EDN SHGNOM.
2. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – Изд. 2-е, переработ. – Москва: Лесная промышленность, 1970. – 720 с.
3. Лаврентьева, Е. П. Глубокая переработка лубяных волокон - путь к возрождению национальных традиций России / Е. П. Лаврентьева, О. К. Санина, Р. О. Белоусов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 3(399). – С. 130-139. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_3_130. – EDN GLLRRJ.

4. Матвеев Б. П. Исследование основных факторов процесса размола сульфатной небеленой целлюлозы в дисковой мельнице при высокой концентрации: дис. ... кандидата технических наук. – Л., 1971. – 112 с.
5. Национальный союз селекционеров и семеноводов. Статистика Минсельхоза по посевным площадям [электронный ресурс]. – URL: <https://www.nsss-russia.ru/2023/01/31/statistika-minselhoza-po-posevnyum-ploshhadyam/>.
6. Серков, В. А. История коноплеводства в России / В. А. Серков, А. А. Смирнов, М. Р. Александрова // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. – 2018. – № 3(175). – С. 132-141. – DOI: 10.25230/2412-608X-2018-3-175-132-141. – EDN LRDTJQ.
7. Ушаков, А. В. Изменение средней длины волокна при размоле массы высокой концентрации с использованием различных конструкций гарнитур / А. В. Ушаков, Ю. Д. Алашкевич, В. А. Кожухов // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы IV Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 14-15 ноября 2022 года / Отв. редактор О. В. Фёдорова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 87-92. – EDN CWITXH.
8. Ushakov, A., Alashkevich, Y., Kozhukhov, V., and Marchenko, R. (2023). "Role of external fibrillation in high-consistency pulp refining," *BioResources* 18(3), 5494-5511. DOI: 10.15376/biores.18.3.5494-5511.
9. Nazhad, M.M., Harris, E.J., Dodson, C.T., & Kerekes, R.J. (2000). The influence of formation on tensile strength of papers made from mechanical pulps. *Tappi Journal*, 83.
10. Richard, J., Kerekes., David, B., McDonald., Frank-Peter, Meltzer. (2023). External fibrillation of wood pulp. *FiTUA*. DOI: 10.32964/tj22.6.363.
11. Sadrmanesh V., Chen Y. Bast fibres: structure, processing, properties, and applications // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 64. Pp. 381-406. DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171.

INFLUENCE OF THE REFINING NON-WOOD RAW MATERIALS ON INDIVIDUAL PAPER-FORMING PROPERTIES OF FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCT

A. A. Karelina*, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov, A.V. Ushakov
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk
**E-mail: karelina.alexandra@mail.ru*

The abstract. The paper-forming properties of the pulp are a factor influencing the formation of the paper sheet. These properties determine the quality and characteristics of the final product. It is all the more important to be able to control them by adjusting the factors of the milling process. Since non-woody plants are not currently a commonly used raw material for the pulp and paper industry, it is necessary to establish the patterns of its processing and what properties the fibrous semi-finished product receives.

Keywords: refining, high consistency pulp, industrial hemp, flax, agricultural waste.

References

1. Aktual'nye napravleniya selektsii konopli posevnoy dlya resheniya sovremennykh problem otechestvennoy ekonomiki i importozameshcheniya (obzor) / V. A. Serkov, R. O. Belousov, M. R. Aleksandrova, O. K. Davydova // *Niva Povolzh'ya*. – 2019. – № 3(52). – С. 38-47. – EDN SHGNOM. (In Russian).
2. Ivanov, S. N. *Tekhnologiya bumagi* / S. N. Ivanov. – Izd. 2-e, pererabot. – Moskva: Lesnaya promyshlennost', 1970. – 720 s. (In Russian).

3. Lavrent'eva, E. P. Glubokaya pererabotka lubyanykh volokon - put' k vozrozhdeniyu natsional'nykh traditsiy Rossii / E. P. Lavrent'eva, O. K. Sanina, R. O. Belousov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. – 2022. – № 3(399). – S. 130-139. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_3_130. – EDN GLLRRJ. (In Russian).
4. Matveev B.P. Issledovanie osnovnykh faktorov protsessa razmola sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy v diskovoy mel'nitse pri vysokoy kontsentratsii: dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk. L., 1971. 112 s. (In Russian).
5. Natsional'nyy soyuz selektsionerov i semenovodov. Statistika Minsel'khoza po posevnyam ploshchadyam [elektronnyy resurs]. URL: <https://www.nsss-russia.ru/2023/01/31/ctatistika-minselkhoza-po-posevnyam-ploshchadyam/>. (In Russian).
6. Serkov, V. A. Istoriya konoplevodstva v Rossii / V. A. Serkov, A. A. Smirnov, M. R. Aleksandrova // *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiiy byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur*. – 2018. – № 3(175). – S. 132-141. – DOI: 10.25230/2412-608X-2018-3-175-132-141. – EDN LRDTJQ. (In Russian).
7. Ushakov, A. V. Izmenenie sredney dliny volokna pri razmole massy vysokoy kontsentratsii s ispol'zovaniem razlichnykh konstruktsiy garnitur / A. V. Ushakov, Yu. D. Alashkevich, V. A. Kozhukhov // *Sovremennaya tsellyulozno - bumazhnaya promyshlennost'. Aktual'nye zadachi i perspektivnye resheniya: Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov TsBP, Sankt-Peterburg, 14–15 noyabrya 2022 goda / Otv. redaktor O.V. Fedorova*. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologiy i dizayna, 2023. – S. 87-92. – EDN CWITXH. (In Russian).
8. Ushakov, A., Alashkevich, Y., Kozhukhov, V., and Marchenko, R. (2023). “Role of external fibrillation in high-consistency pulp refining,” *BioResources* 18(3), 5494-5511. DOI: 10.15376/biores.18.3.5494-5511.
9. Nazhad, M.M., Harris, E.J., Dodson, C.T., & Kerekes, R.J. (2000). The influence of formation on tensile strength of papers made from mechanical pulps. *Tappi Journal*, 83.
10. Richard, J., Kerekes., David, B., McDonald., Frank-Peter, Meltzer. (2023). External fibrillation of wood pulp. *FiTUA*, DOI: 10.32964/tj22.6.363.
11. Sadrmanesh V., Chen Y. Bast fibres: structure, processing, properties, and applications // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 64. Pp. 381-406. DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171.

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РИСОВОЙ СОЛОМЫ ДЛЯ ЖИДКИХ ОБОЕВ

В. Умарова, М. Примкулов

Ташкентский химико-технологический институт, г. Ташкент (Узбекистан)

Аннотация. В данной статье представлено получение целлюлозы из рисовой соломы. Изучена кинетика изменения оптической плотности экстракта плотности при гидролизе стеблей риса в щелочной и кислой средах, а также влияние времени варки на полученный состав. Изучены технические характеристики композиционных добавок для жидких обоев. В ходе исследований было изучено влияние длины целлюлозных волокон на рельеф жидких обоев, образующихся на поверхности стены.

Ключевые слова: целлюлоза, гидролиз целлюлозы, полосы поглощения, влияние времени варки, экстракт.

Введение. На сегодняшний день в мире природные полимеры используются в качестве сырья в химической, пищевой, нефтегазовой, фармацевтической, текстильной промышленности; в качестве материалов для машиностроения, самолетостроения, строительства. Вместе с тем разработка технологий производства гигроскопичной, нерастворимой в воде и органических растворителях, термостойкой, химически стабильной, бактериологически чистой и физиологически инертной целлюлозы без запаха и вкуса имеет большое значение в современном мире.

В мире уделяется особое внимание синтезу целлюлозы и ее алкил-, ацил-, алкоксипроизводных из стеблей однолетних растений, изучению их физико-химических и эксплуатационных свойств [1]. В связи с этим приобретают важное значение исследования в области получения биологически чистых наполнителей и связующих для применения в качестве антиоксидантов, создания нетрадиционных композиций с улучшенными техническими и специфическими свойствами, разработки технологий получения микрокристаллической целлюлозы [2-4].

Получение целлюлозы из рисовой соломы проводили в кислой и щелочной среде.

Цвет продукта гидролиза резко отличается от цвета щелочи в кислой среде, что объясняется максимальным выделением полисахаридов из стеблей риса в жидкость. Изменение оптической плотности экстракта рисовых стеблей при гидролизе в щелочной и кислой средах показано на рисунке 1.

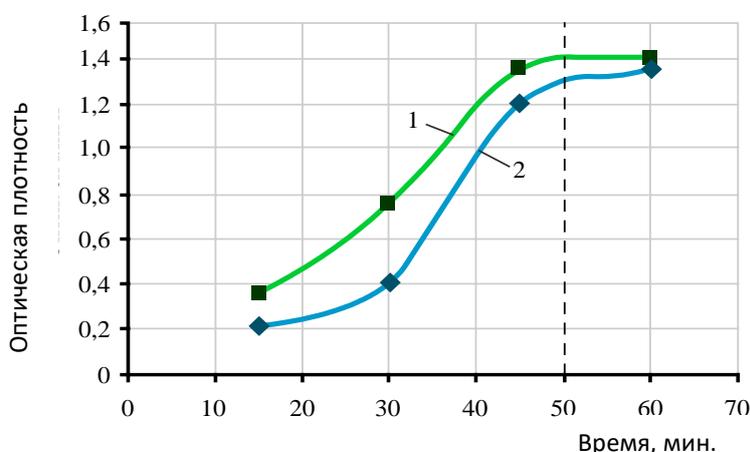


Рисунок 1 – Кинетика изменения оптической плотности экстракта при гидролизе стеблей риса в щелочной (1) и кислой (2) средах

Выявлено, что процесс зависит от типа (макромолекул пентозанов, состоящих из пентозных звеньев, гексозанов, построенных из различных маннанов, галактанов (галактан, арабиногалактан) и крахмала) и количества веществ, экстрагированных из стебля риса, и количества веществ; содержание высвобождаемых веществ больше при гидролизе в кислой среде.

Изучена зависимость времени варки от состава после удаления остаточного лигнина и полисахаридов из целлюлозы, получаемой из стеблей выбранных растений. Процесс проведен экстракцией в водной среде в течение 60 минут при 95-105 °С и гидролизом в среде 10 % азотной кислоты в течение 2 часов и в среде 13 % раствора NaOH в течение 3 часов при 100-110 °С (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние времени варки на полученный состав, %

Время, час	Целлюлоза	Лигнин	Зольность	Смолы	Водорастворимое вещество
Стебель риса					
1	30,1	9,6	12,1	0,9	7,4
2	34,5	10,2	12,8	1,17	7,8
3	41,6	12,6	13,6	1,29	8,5
4	47,8	13,8	14,2	1,4	8,7
5	47,0	12,2	14,0	1,4	9,0
6	46,1	11,8	14,0	1,4	9,0

Степень сорбции целлюлозы из стеблей риса сравнивали со степенью сорбции хлопковой целлюлозы (табл. 2).

Таблица 2 – Сорбция рисовых стеблей и хлопковой целлюлозы

Показатели	Хлопковая целлюлоза	Рисовая целлюлоза
Сорбция, мг/г	42,4	62,9
Сорбция йода, %	46,0	38,0
Набухаемость, 17,5% NaOH, %	503	530 – 550
Водопоглощение, %	254	254 – 256
Степень кристалличности, %	69,0	32,8

Как видно из таблицы 2, сорбционные свойства целлюлозы, полученной из рисовых стеблей, на 15-20 % выше, чем у хлопковой целлюлозы. Это объясняется тем, что в структуре целлюлозы, полученной из стеблей риса, меньше кристаллических частей, больше аморфных частей, что обеспечивает большее набухание (530-550 %) в щелочи.

В ходе исследований были изучены физико-механические свойства целлюлозы из однолетних зернобобовых, полученных из стеблей пшеницы и риса, такие как длина измельчения, время измельчения до 60 °ШР, сопротивление давлению и количество изгибов в обоих направлениях, которые являются важными показателями (табл. 3).

Таблица 3 – Некоторые физико-механические свойства пшеничной и рисовой целлюлозы

Показатели	Рисовая целлюлоза
Количество полученной целлюлозы, %	47,8
Время измельчения до 60 °ШР, мин.	12
Длина разрыва, м	7630
Сопротивление давлению, кПа	410
Количество изгибов в обоих направлениях	525

Учитывая низкое использование рисовых стеблей в промышленности, простоту процесса выделения целлюлозы, соответствия качества получаемой целлюлозы стандартам, поставлена цель производства жидких обоев.

Таблица 4 – Технические характеристики композиционных добавок для жидких обоев

Композиты	Технические показатели
Рисовая целлюлоза	Степень измельчения: 48 – 52 °ШР; конц.: 2,8 – 3,0 %; средняя длина волокон: 2,5 – 3,0 мм.
Слюда, марки: лепидодит; $Kl_2Al[Al_3O_{10}]KOH,F)_2$	Внешний вид: тонкие кристаллические частицы с гладкой поверхностью размером 3-6 мм; плотность: 2,7 г/см ³
Натрий-карбоксиметилцеллюлоза, (Na-КМЦ)	Карбоксильная группа: 76 %, плотность: 1,59 г/см ³ ; степень полимеризации: 1600.
Хлопковая ровница	Линейная плотность составляет 320 плоских ровниц; длина: 5 – 8 мм отрезков.
Песко. Марки – тяжелый песок	Плотность: 1,5-1,7 г/см ³ ; размер частиц: 4,5-5,0 мм.
Песко. Марки – тяжелый песок	Плотность: 1,5-1,7 г/см ³ ; размер частиц: 2,0-2,5 мм.
Краски	Все краски активной марки

Жидкие обои состоят из органических и неорганических веществ – хлопка, шелка, синтетических волокон, трапленной целлюлозы, красителей и связующих (натрий-КМЦ).

В качестве связующего была выбрана 6 % к Na-КМЦ и были приготовлены композиционные жидкие обои на основе целлюлозы, полученной из стеблей риса.

В ходе исследований было изучено влияние длины целлюлозных волокон на рельеф жидких обоев, образующихся на поверхности стены (табл. 5).

Таблица 5 – Влияние длины целлюлозного волокна на рельеф жидких обоев, образующийся на поверхности стены

№	Средняя длина волокон, мм	Описание рельефа (структуры) обоев, сформированных на поверхности стены
1	30 – 32	Рельефы крупные, местами бесформенные ямки, толщина слоя 3 мм. Трудно тонко наносить поверхность стены.
2	3,5 – 4,5	Крупные на вид рельефы, местами бесформенные ямы. Толщина слоя 2 мм. Относительно легко наносится на поверхность стены.
3	2,5 – 3,0	Рельеф плоский, толщина слоя 1 мм. Массу легко наносить на поверхность стены.
4	1,0 – 1,5	Рельефы плоские мелкие, расстояние 5 мм, масса легко наносится на поверхность стены. Толщина высушенной массы 0,5 мм.
5	0,7 – 1,0	Без рельефа, масса легко наносится на поверхность стены. Толщина высушенной массы 0,3 мм.

Результаты показали, что длина целлюлозных волокон в жидких обоях по-разному влияет на рельеф поверхности стены, процесс нанесения и толщину высохшей массы. На основании этих параметров был выбран оптимальный вариант длины волокна, и были нанесены образцы жидких обоев из целлюлозы со средней длиной 2,5-3,0 мм четырех различных толщин для определения массового расхода, толщины и зольности (табл. 6).

Таблица 6 – Характеристики жидких обоев из целлюлозы, полученной из стеблей риса

№	Показатели	Толщина, мм			
		0,42	0,85	1,70	2,11
1	Масса 1 м ² , г	109,1	211,0	421,2	522,4
2	Белизна, %	55,34	55,34	55,34	55,34
3	Зольность, %	16,0	16,2	16,3	16,5

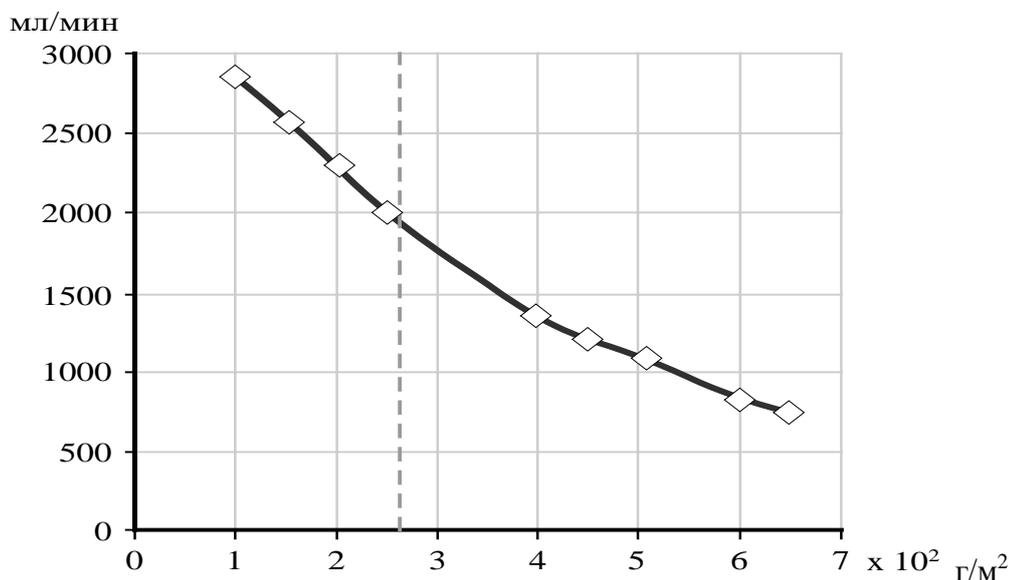


Рисунок 2 – Зависимость воздухопроницаемости обоев от расхода

Как видно из таблицы 6, толщина покрытия не оказывает существенного влияния на белизну и зольность, что приводит к увеличению расхода обоев.

Изучено влияние расхода жидких обоев на воздухопроницаемость (рис. 2). Воздухопроницаемость определяли с помощью прибора Бендсена.

Как видно из рисунка 2, воздухопроницаемость уменьшается в 3 раза при увеличении расхода обоев со 100 г/м² до 600 г/м². Основываясь на этих результатах была рекомендована норма расхода 260 г жидких обоев на 1 м² поверхности.

Заключение. Разработан и изучен состав жидких обоев для покрытия внутренних стен на основе полученных полуготовых и готовых целлюлоз.

Установлено, что при увеличении толщины жидких обоев со 100 г/м² до 600 г/м² воздухопроницаемость снизилась в 3 раза, в результате рекомендована норма расхода 260 г жидких обоев на 1 м² поверхности.

Список литературы

1. Непенин Н. Н., Непенин Ю. Н. Технология целлюлозы. Т. 3. – Москва: Экология, 1994. – 466 с.
2. Вураско А. В., Дрикер Б. Н., Земнихова Л. А., Гамилова А. Р. Ресурсосберегающая технология получения целлюлозы при комплексной переработке соломы риса // Химия растительного сырья. – 2007. – № 2. – С. 21-25.
3. Гамилова А. Р., Вураско А. В., Дрикер Б. Н., Земнихова Л. А., Федорищева Г. Ф. Получение волокнистых полуфабрикатов при комплексной переработке соломы риса // Химия растительного сырья. – 2007. – № 3. – С. 47-53.
4. Патент № 27147. Способ получения целлюлозы из соломы риса / авт. Коптлеуова

Т.М., Нургазиева А.С., Оспанкулова Г. Х., Махамбетова А. А., Тоймбаева Д.Б., Нечай Н.Л., Тажина С.Ж., Байкенов А.Ө., Полуботко О.В. Опубликовано: 15.07. 2013.

OBTAINING CELLULOSE FROM RICE STRAW FOR LIQUID WALLPAPER

V. Umarova, M. Primkulov

Tashkent Chemical-Technological Institute, Tashkent (Uzbekistan)

The abstract. This article presents the production of cellulose from rice straw. The kinetics of changes in optical density extract during hydrolysis of rice stalks in alkaline and acidic environments, as well as the effect of cooking time on the resulting composition were studied. The technical characteristics of composite additives for liquid wallpaper were studied. During the research, the effect of the length of cellulose fibers on the relief of liquid wallpaper formed on the wall surface was studied.

Keywords: cellulose, cellulose hydrolysis, absorption bands, effect of cooking time, extract.

References

1. Nepenin N. N., Nepenin Yu. N. Cellulose technology. Vol. 3. – Moscow: Ecology, 1994, 466 p.
2. Vurasko A. V., Driker B. N., Zemnikova L. A., Gamilova A. R. Resource-saving technology for obtaining cellulose during complex processing of rice straw. *Chemistry of plant raw materials*. – Moscow, 2007, No. 2, 21-25 p.
3. Gamilova A. R., Vurasko A. V., Driker B. N., Zemnikova L. A., Fedorishcheva G. F. Obtaining fibrous semi-finished products during complex processing of rice straw. *Chemistry of plant raw materials*. M., 2007, No. 3, 47-53 p.
4. Patent No. 27147. Method for producing cellulose from rice straw. author. Koptleuova T.M., Nurgazieva A.S., Ospankulova G.Kh., Makhambetova A.A., Toimbaeva D.B., Nechai N.L., Tazhina S.Zh., Baykenov A.Ө., Polubotko O.V. Published: 15.07. 2013.

ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ УЗБЕКИСТАНА

Д. Ш. Хамдамова*, М. Т. Примкулов

Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент (Узбекистан)

**E-mail: dilnozaxamdamaova1989@gmail.com*

Аннотация. Получены целлюлозы из стебля лекарственных растений амаранта, расторопши, якорца и арбуза методом щелочного гидролиза. Из целлюлозы амаранта, расторопши, якорца и арбуза синтезирована путем глубокого гидролиза в смеси серной кислоты и перекиси водорода микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ). Определены структурно-размерные характеристики в суспензии целлюлозных волокон из расторопши. Изучено влияние времени варки на получаемый состав. Выходы целлюлоз у амаранта – 30, расторопши – 26, якорца – 27,8 и арбуза – 28,5 %.

Ключевые слова: лекарственные растения, целлюлоза, микрокристаллическая целлюлоза, *Fiber Tester*, экстракция, средний фракционный состав, таблетка.

Щедра и богата природа Узбекистана. Богатейшая флора Узбекистана насчитывает более 4000 видов различных растений – от декоративных до лекарственных. Наибольшее число флоры произрастает в предгорных и горных районах страны. В Узбекистане 750 видов из более 4,3 тысячи растений местной флоры считаются лекарственными, из них 112 видов зарегистрированы для применения в научной медицине, из которых 70 видов активно используются в фармацевтической промышленности [1]. Узбекистан уделяет особое внимание развитию фармацевтической промышленности [2-3].

Фармацевты из лекарственных растений извлекают активную часть, остатки пока не используются. В остатке содержится в основном целлюлоза [4-5]. Наша цель – выделить целлюлозу и из нее синтезировать микрокристаллическую часть. Для этого выбрали следующие виды лекарственных растений: расторопша (*Silybum marianum*), якорц (*Tribulus terrestris*), амарант (*Amaranthus*) и арбуз обыкновенный (*Citrullus*).

При извлечении целлюлозы из стеблей отдельных лекарственных растений ее очищали от лигнина и полисахаридов, изучали влияние времени варки на состав. Процесс проводили экстракцией водным растворителем при температурном интервале 95-105 °С в течение 60 минут, гидролизом в 1 % азотной кислоте при температуре 100-110 °С в течение 2 часов и 6 % раствором NaOH в течение 3-4 часов (табл.1).

Таблица 1 – Влияние времени варки на получаемый состав, %

Время, час	Целлюлоза	Лигнин	Зольность	Смолы	Водорастворимое вещество
Стебли амаранта					
1	25,6	17,8	0,39	17,6	18,4
2	27,9	19,6	0,45	19,8	19,3
3	29,6	20,3	0,49	20,4	19,8
4	30,0	22,7	0,52	25,7	21,6
5	29,7	20,1	0,50	21,2	20,0
6	29,6	18,3	0,49	21,2	19,0
Стебли расторопши					
1	18,7	12,8	0,39	23,6	21,4
2	21,5	14,6	0,45	24,8	22,3

Стебли расторопши					
3	25,6	16,1	0,47	25,4	23,8
4	26,0	23,1	0,48	25,6	23,3
5	26,2	16,2	0,48	25,6	23,7
6	26,2	16,2	0,48	25,3	23,7
Стебли якорцев					
1	22,7	17,3	0,39	23,6	22,3
2	23,9	17,9	0,45	24,8	23,8
3	27,8	22,7	0,47	24,6	24,9
4	24,9	18,5	5,58	24,9	24,5
5	24,9	18,5	0,47	24,2	24,4
Стебли арбуза					
1	25,6	17,3	0,45	22,3	24,5
2	26,7	17,9	0,49	22,8	24,4
3	28,5	21,8	0,58	25,3	24,4
4	27,4	18,5	0,59	22,84	23,45
5	27,4	18,5	0,58	22,7	23,4

Анализ результатов показал, что с увеличением времени варки выход целлюлозы снижается, что объясняется переходом гемицеллюлоз из целлюлозы в раствор. С учетом этого были определены оптимальные параметры извлечения целлюлозы из отобранных образцов.

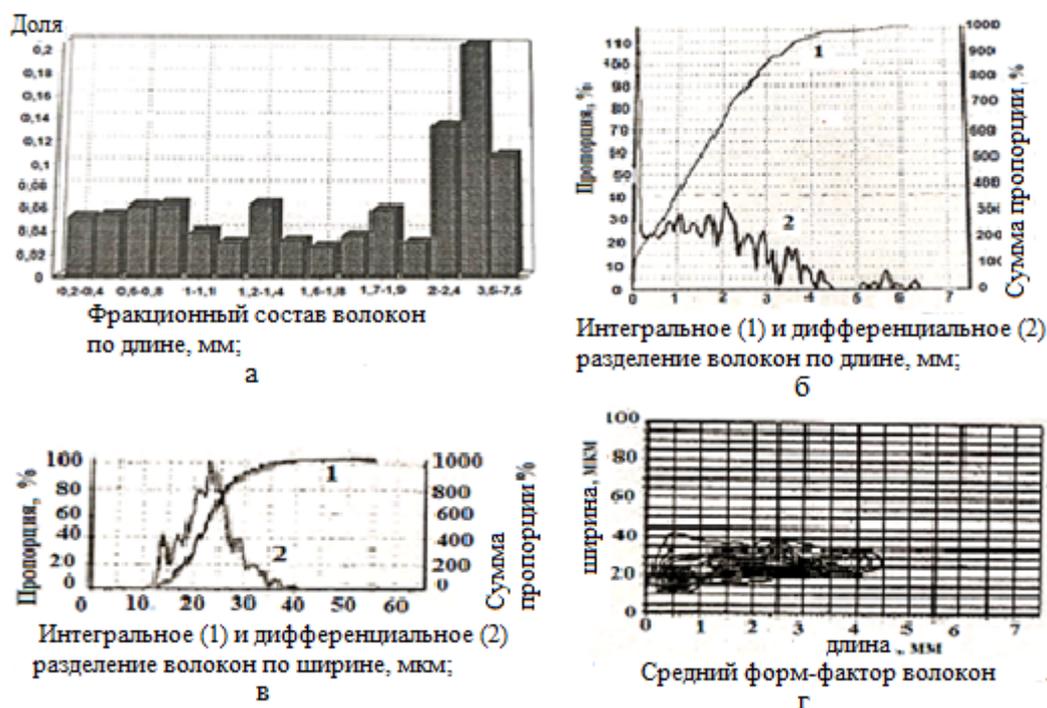


Рисунок 1 – Размерно-структурные характеристики волокон целлюлозы расторопши: а – фракционный состав волокон по длине, мм; б – интегральное (1) и дифференциальное (2) разделение волокон по длине, мм; в – интегральное (1) и дифференциальное (2) разделение ширины волокна, мкм; г – средний форм-фактор волокон

Были определены структурно-размерные характеристики волокон целлюлозы с помощью автоматического прибора Fiber Tester.

Длина целлюлозных волокон различна – от 0,2-0,4 до 3,6-7,6 мм (рис. 1 а, б). Эти различия также можно увидеть на рисунке 1, в. Ширина волокон относительно однородная,

20-22 мкм (рис. 1, в), коэффициент формы 0-4,5 мм по длине и 10-40 мкм по ширине (рис. 1, г). Волокнистую фракцию можно разделить на три группы (табл. 2).

Таблица 2 – Средний фракционный состав волокон целлюлозы расторопши

№ группы	Размер группы	Сумма, %
1	от 0,2-0,4 до 0,6-0,8 мм	26,7
2	от 1-1,1 до 1,7-1,9мм	53,3
3	от 2,94 до 3,6-7,6 мм	20

Из таблицы 2 видно, что наибольшее количество волокон по длине относится ко 2-й группе (от 1-1,1 до 1,7-1,9 мм) – 53,3 %, а меньше всего к 3-й группе (от 2,94 до 3,6-7,6 мм и выше), которое составляет 20 %.

В ходе исследований были изучены процессы извлечения МКЦ из всех полученных образцов целлюлозы (табл. 3.). В процессе исследования отобранных образцов был разработан способ получения МКЦ из целлюлозы, полученной из стеблей лекарственных растений комбинированным способом (кипячение в течение 60 мин при модули 1:10 и соотношении 1:1 10% H₂SO₄ + 10 % H₂O₂) и изучены физико-химические свойства, структурные изменения и характеристики волокон.

Таблица 3 – Влияние H₂O₂:H₂SO₄ на выход и степень полимеризации при экстракции МКЦ из целлюлозы лекарственных растений

№	H ₂ O ₂ : H ₂ SO ₄ , %	Время обработки, час	Выход МКЦ, %	СП
Расторопша				
1	5:5	1	83	325
2	10:10	1	87	244
3	15:15	1	85	180
4	20:20	1	80	152
Арбуз				
1	5:5	1	83	302
2	10:10	1	88	270
3	15:15	1	85	170
4	20:20	1	78	158
Якорцы				
1	5:5	1	83	325
2	10:10	1	85	189
3	15:15	1	82	180
4	20:20	1	75	152
Амарант				
1	5:5	1	80	250
2	10:10	1	86	236
3	15:15	1	82	185
4	20:20	1	70	160

Из таблицы 3 видно, что при синтезе МКЦ смесь с концентрацией 10 % H₂O₂:10 % H₂SO₄ является оптимальной для всех образцов. При этом производительность МКЦ также является высокой.

На основании результатов можно сделать вывод, что при сравнении МКЦ, предлагаемых в качестве добавок к твердым лекарственным формам с 7 % крахмальным клеем, можно рекомендовать использовать 1,0 и 1,5 % МКЦ в качестве наполнителей для твердых лекарственных форм. Образцы таблеток показаны на рисунке 2.



Рисунок 2 – Таблетки, полученные на основе МКЦ:

1 – порошок МКЦ, добавленный в состав таблеток; 2 – таблетки, приготовленные с добавлением 100 % МКЦ; 3 – лекарственная таблетка рутина (витамин "Р"), наполненная МКЦ; 4 – таблетка лекарственная аскорутина (витамин "С+Р"), наполненная МКЦ

В таблице 4 приведены результаты качественных показателей образцов КМЦ арбуза, расторопши, якорцев и амаранта для сравнения с МКЦ, произведенными по действующему ТУ 23773839-001:2017

Таблица 4 – Показатели качества готовой продукции (МКЦ)

Наименование показателей	Характеристика МКЦ и норма ТУ 23773839-001:2017				
	ТУ 23773839-001:2017	Арбуз	Расторопша	Амарант	Якорцы
1. Внешний вид	Белый кристаллический порошок	Белый кристаллический порошок	Светло-серый кристаллический порошок	Белый кристаллический порошок	Бледно-желтый кристаллический порошок
2. Запах и вкус	Без запаха и вкуса				
3. Зольность, %	0,10	0,30	0,29	0,23	
4. Влажность, %	7,0	6,7	7,0	7,0	6,8
5. Средний размер частиц, мкм	100-500	100-250	300-350	300-350	100-300
6. СП	300	270	244	236	189
7. Показатель рН в воде	Нейтральный				
8. Степень белизны	80	80	73	78	75
9. Водопоглощение, %	166	210	181	162	185

Как видно из таблицы 4, МКЦ, полученные из указанных лекарственных растений, близки по свойствам к производимым в настоящее время МКЦ, полученным из хлопка и древесины. Это доказывает, что МКЦ, полученные из хлопка и древесины, могут быть полностью заменены.

Выводы:

1. На основании полученных экспериментальных данных разработана технология термомеханического и механохимического методов извлечения МКЦ из отходов лекарственных растений (амаранта, расторопши, якорцев, арбуза).

2. Рекомендованы оптимальные условия синтеза МКЦ на основе целлюлозы, полученной из лекарственных растений.

3. Показана возможность использования МКЦ в качестве связующего в технологии изготовления таблеток на фармацевтическом предприятии.

Список литературы

1. Постановление Президента Республика Узбекистана от 10.04.2020 г. № ПП-4670 «О мерах по охране, культурному выращиванию, переработке дикорастущих лекарственных растений и рациональному использованию имеющихся ресурсов».
2. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 2. Основные виды и свойства бумаги, картона-фибры и древесных плит. – СПб.: Политехника, 2006. – 499 с.: ил.
3. Иванов С. Н. Технология бумаги. – Изд. 3-е. – Москва: «Школа бумаги», 2006. – С. 50-54.
4. Примкулов М., Рахмонбердиев Ф. Қоғоз технологиясидан лаборатория ишлари. "Фан ва технология Марказининг босма хонаси". – Тошкент, 2010. – 32-34 бетлар.
5. Гораздова В. В., Дернова Е. В., Дулькин Д. А., Окулова Е. О. Влияние фибрилляции и укорачивания волокон при размоле на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов // Лесной журнал. – 2018. – № 2. – С. 109-118.

OBTAINING MICROCRYSTALLINE CELLULOSE FROM MEDICINAL PLANTS OF UZBEKISTAN

D. Sh. Khamdamova*, M. T. Primkulov

Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent (Uzbekistan)

**E-mail: dilnozaxamdamaova1989@gmail.com*

The abstract. Celluloses from the stems of medicinal plants amaranth, milk thistle, tribulus and watermelon were obtained by alkaline hydrolysis. Microcrystalline cellulose (MCC) was synthesized from amaranth, milk thistle, tribulus and watermelon cellulose by deep hydrolysis in a mixture of sulfuric acid and hydrogen peroxide. Structural and dimensional characteristics were determined in a suspension of cellulose fibers from milk thistle. The effect of cooking time on the resulting composition was studied. The yields of cellulose for amaranth are 30, milk thistle - 26, tribulus - 27.8 and watermelon - 28.5%.

Keywords: medicinal plants, cellulose, microcrystalline cellulose, Fiber Tester, extraction, average fractional composition, tablet.

References

1. Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated 10.04.2020 No. PP-4670 "On measures for the protection, cultural cultivation, processing of wild medicinal plants and rational use of available resources".
2. Pulp and paper production technology. In 3 volumes. Vol. II. Paper and cardboard production. Part 2. Main types and properties of paper, cardboard, fiber and wood boards. - St. Petersburg: Polytechnic, 2006. - 499 p.: ill.
3. Ivanov S.N. Paper technology. Third edition. "BKMAGI School". Moscow 2006. p. 696. pp. 50-54.
4. Primkulov M., Rakhmonberdiev G. Kogoz technology laboratory ishlari. "Fan and technology Marketing of wood products". Tashkent 2010. 32-34 betlar.
5. Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dulkin D.A., Okulova E.O. "The influence of fibrillation and shortening of fibers during grinding on the characteristics of strength, deformability and crack resistance of cellulose materials", Forestry magazine. 2018. No. 2. P. 109-118.

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕССОВЫХ ВАЛОВ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

И. В. Перескоков*, Н. В. Куцубина

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург

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

Аннотация. В статье представлены динамическая и математическая модели рубашки отсасывающего вала бумагоделательной машины. Проведены исследования построенных моделей при изменении нагруженности и напряженного состояния, вызванного в результате уменьшения толщины стенки рубашки вала. Проведенные исследования моделей позволят рассчитать напряженное состояние перфорированной рубашки отсасывающего вала для всех возможных внутренних диаметров вала и при любых заданных нагрузках в прессах.

Ключевые слова: прессовые валы, бумагоделательная машина, динамическое и математическое моделирование, напряженное состояние.

Валы являются основными конструктивными и функциональными элементами прессовых частей бумагоделательных машин, большая часть из них – это трубчатые валы. В прессовых частях больше всего уникальных валов со сложным исполнением, не встречающихся в машинах других отраслей промышленности, например, отсасывающие валы, валы с регулируемым прогибом и гранитные валы [1].

Особенностями условий работы прессовых частей являются высокие нагрузки локального характера на элементы валов (рубашки, подшипники, облицовку) за счет дополнительного прижима, разрушающее воздействие агрессивных сред, существенное взаимное влияние смежных валов в батарее на параметры колебаний, воздействие со стороны сукна, сложные гидродинамические процессы, протекающие в прессовых зонах между валами, и прочее [2].

При длительной эксплуатации отсасывающих валов возникают различные дефекты (кольцевые выработки, выбоины, повреждения, связанные с химической эрозией, со статическим электричеством). Это приводит к износу и уменьшению толщины стенки рубашки вала, что сказывается на его несущей способности. Из-за большой стоимости этих валов предприятия заинтересованы в продлении сроков их эксплуатации, при этом необходимо решить задачу определения минимальной толщины стенки рубашки вала, при которой еще возможна безопасная эксплуатация вала.

В статье приводятся исследования рубашки отсасывающего вала прессовой части бумагоделательной машины. На рисунке 1 представлена распространенная схема трех-вального комби-пресса прессовой части бумагоделательной машины.

Построены динамическая и математическая модели рубашки отсасывающего вала и проведены исследования этих моделей при изменении напряженного состояния из-за уменьшения толщины стенки рубашки.

Расчет напряженного состояния с целью определения всех нагрузок, действующих на рубашку отсасывающего вала, производился с использованием системы математического моделирования PTC MathCad Prime, по стандартной методике расчета трубчатых валов [3]. Расчет проведен как для оригинального вала (без износа), так и для других значений диаметра.

Используя PTC Mathcad Prime, можно получить значения приведенного коэффициента запаса прочности для всех возможных внутренних диаметров вала, а также вычислить остальные параметры – нормальные и касательные напряжения, прогибы рубашки и т. д.

Полученные значения для всех диаметров можно представить в виде графиков, на которых представлены зависимости конкретных величин от внутреннего диаметра рубашки вала.

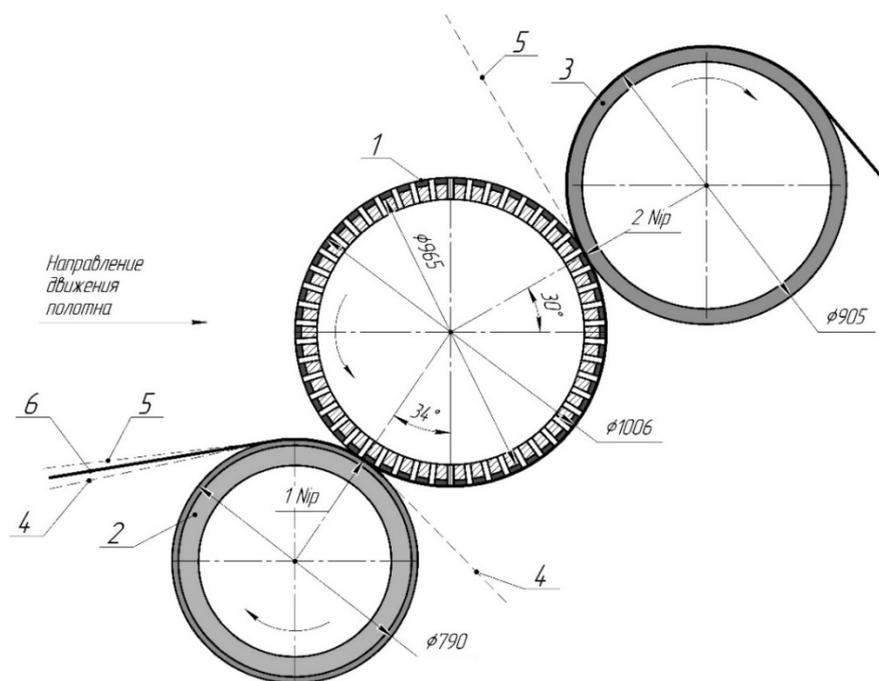


Рисунок 1 – Схема трехвального комби-пресса прессовой части бумагоделательной машины:
 1 – отсасывающий вал; 2 – нижний прижимной вал 1-го захвата пресса; 3 – верхний прижимной вал 2-го захвата пресса; 4, 5 – прессовые сукна; 6 – бумажное полотно

Результаты расчета оригинального вала с диаметром 0,863 м, показали, что рубашка отсасывающего вала обладает достаточно хорошим запасом прочности. Приведенный коэффициент запаса прочности равен $K=11$, поэтому для дальнейшего исследования внутренний диаметр рубашки вала указан диапазоном от оригинального 0,863 м до 0,953 м с шагом – 10 мм (10 значений).

В итоге были получены результаты расчета максимальных нормальных и касательных напряжений в рубашке (рис. 2), а также приведенный коэффициент запаса прочности рубашки (рис. 3), при различных диаметрах износа внутренней части рубашки вала.

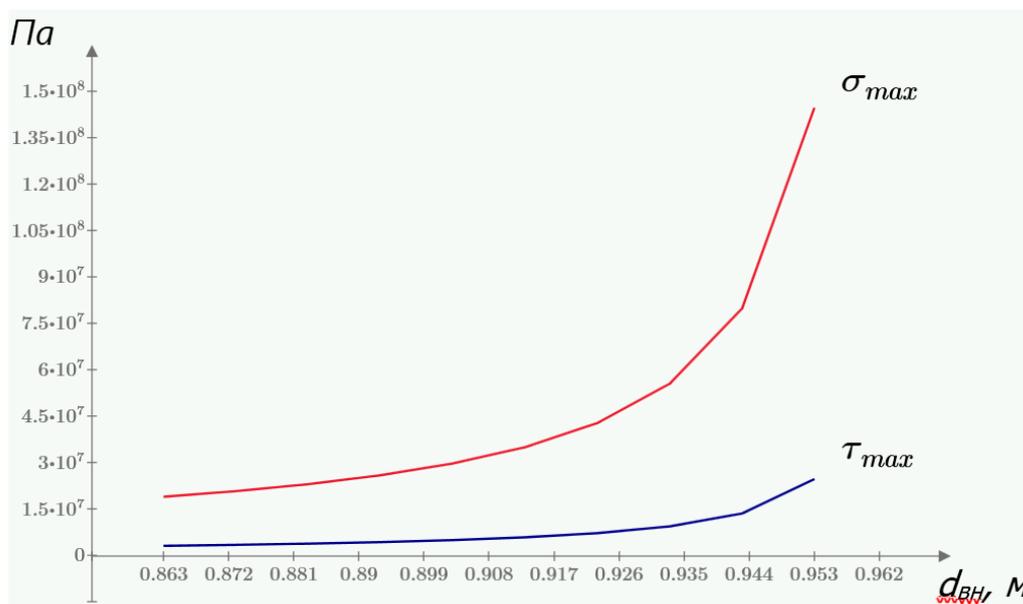


Рисунок 2 – Зависимость максимальных нормальных σ_{max} и касательных τ_{max} напряжений от внутреннего диаметра рубашки вала d_{BH}

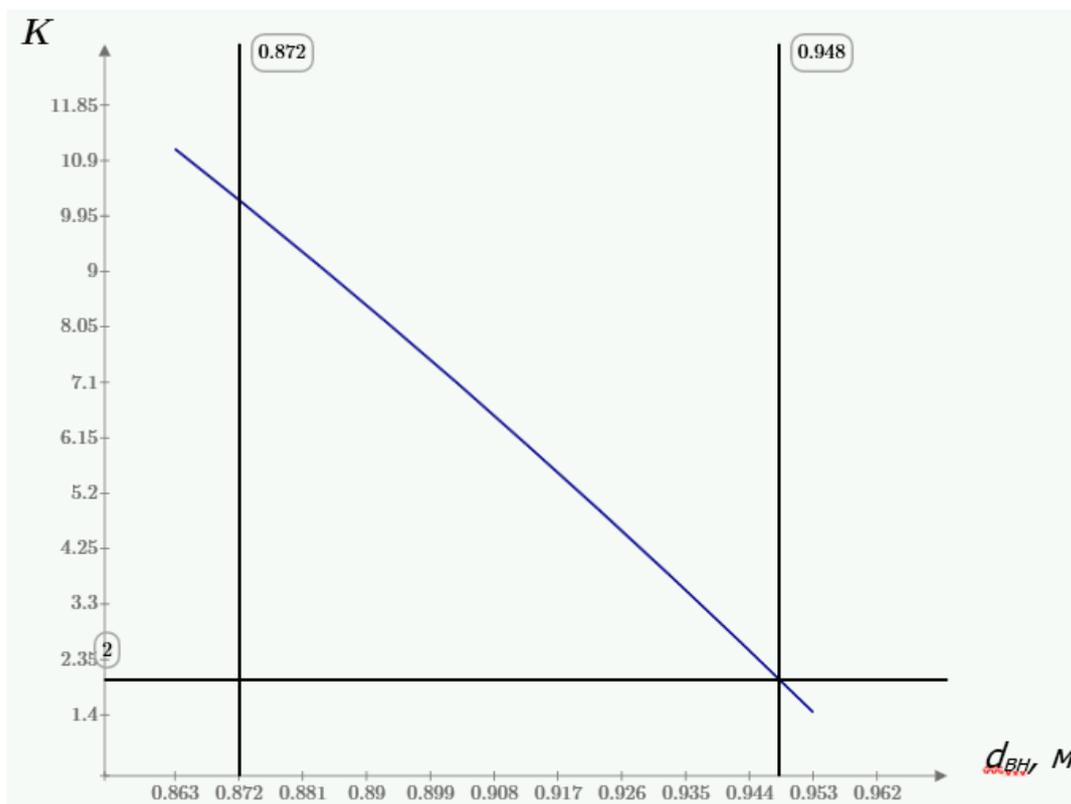


Рисунок 3 – Зависимость приведенного коэффициента запаса прочности K от внутреннего диаметра рубашки вала $d_{вн}$

Результаты расчета показали, что уменьшение внутреннего диаметра рубашки вала, наступившее вследствие ее износа в процессе эксплуатации, до значения 0,872 м, не приведет к серьезным последствиям. Приведенный коэффициент запаса прочности рубашки вала в этом случае составляет $K=10,23$, что полностью удовлетворяет условию $K \geq [K]=2 \dots 2,5$.

Отсасывающий вал достаточно хорошо конфигурирован для работы при заданных (паспортных) линейных нагрузках в прессе.

В таблице 1 представлены максимально допустимый внутренний диаметр и минимально допустимая толщина стенки рубашки отсасывающего вала при различных нагрузках в зонах прессования комби-пресса, свыше которых эксплуатация вала запрещена и следует его немедленный ремонт или замена.

Таблица 1 – Предельно допустимые значения внутреннего диаметра и толщины стенки рубашки отсасывающего вала при различных нагрузках в зонах прессования

Линейное давление в 1 захвате пресса, кН/м	Линейное давление во 2 захвате пресса, кН/м	Внутренний диаметр рубашки вала $d_{вн}$, мм	Толщина стенки рубашки вала δ , мм
40	50	948	9
45	55	947	9
50	60	947	9
55	65	946	10
60	70	946	10
60	75	945	10

Исследование построенной модели с использованием системы PTC Mathcad Prime позволяет рассчитать напряженное состояние перфорированной рубашки отсасывающего вала прессовой части, определить все нагрузки, действующие на рубашку, а также получить

значения приведенного коэффициента запаса прочности для всех возможных внутренних диаметров вала и при любых заданных нагрузках в прессах.

Построение динамической модели комби-пресса прессовой части бумагоделательной машины производилось в системе автоматического моделирования PTC Creo Parametric.

Стандартными инструментами приложения PTC Creo Parametric была создана модель (рис. 4) трехвального комби-пресса, к которой были применены все необходимые условия: размещение валов в прессе и действующих нагрузок, закрепления, контакты, сетка конечных элементов. Все величины, направления и места приложения нагрузок смоделированы в соответствии с реальным прессом.

В процессе создания модели были приняты некоторые допущения и условности, которые не учитываются в модели из-за сложности моделирования на персональном ПК, а также незначительного влияния, оказываемого на результаты моделирования:

- модели валов представляются в виде сплошных гибких тонкостенных оболочек, без моделирования цапф, патронов, подшипников и прочих конструктивных элементов;
- перфорация отсасывающего вала не применяется в модели, вал представляет собой сплошную оболочку;
- облицовки валов не учитываются в модели;
- влияние нагрузки от бумажного полотна ввиду малого влияния также не учитывается в модели.

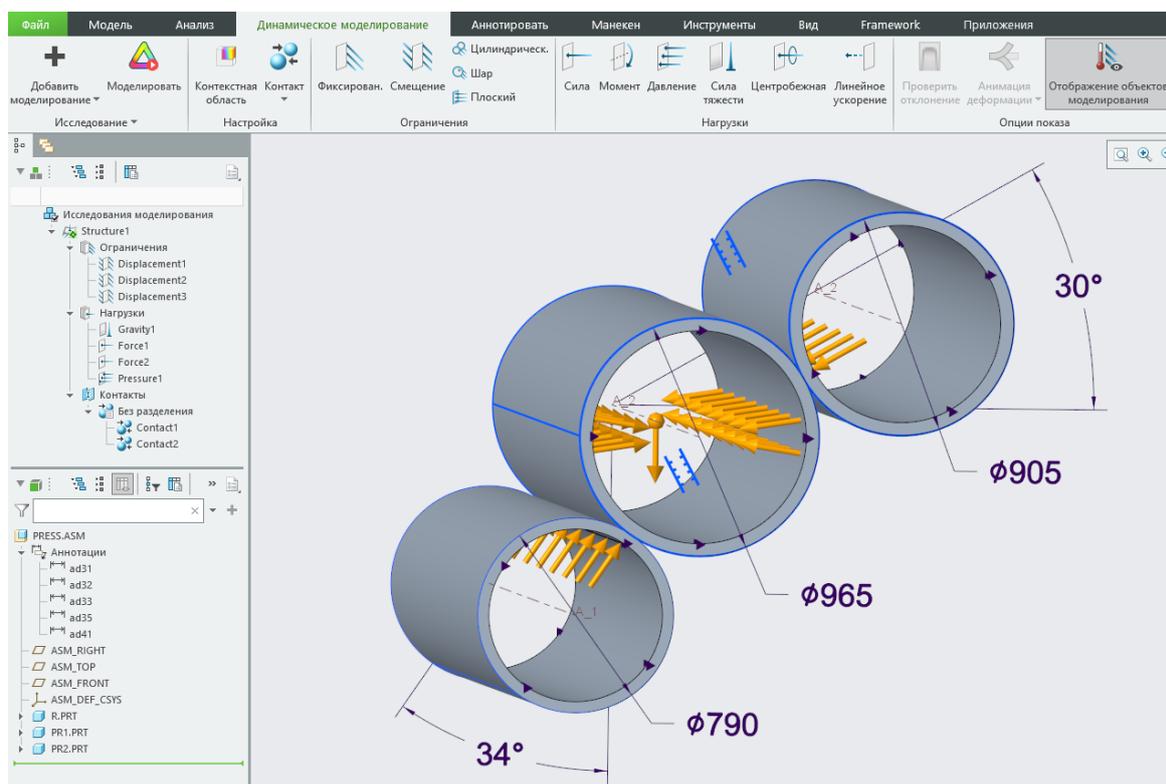


Рисунок 4 – Модель трехвального комби-пресса в системе автоматического моделирования PTC Creo Parametric

После подготовки, проверки модели и запуска расчета модели были получены следующие результаты. На рисунке 5 представлены максимальные напряжения по Мизесу, возникающие в рубашке отсасывающего вала от прижима верхнего и нижнего пресса.

Максимальные напряжения, возникающие в рубашке отсасывающего вала, находятся в местах контакта прижимных валов.

Также были получены значения нормальных напряжений по различным направлениям (X, Y, Z), суммарные силы реакции и напряжения сдвига.

На рисунке 6 представлены деформации рубашки отсасывающего вала. Все отклонения от первоначального состояния для наглядности указаны в масштабе.

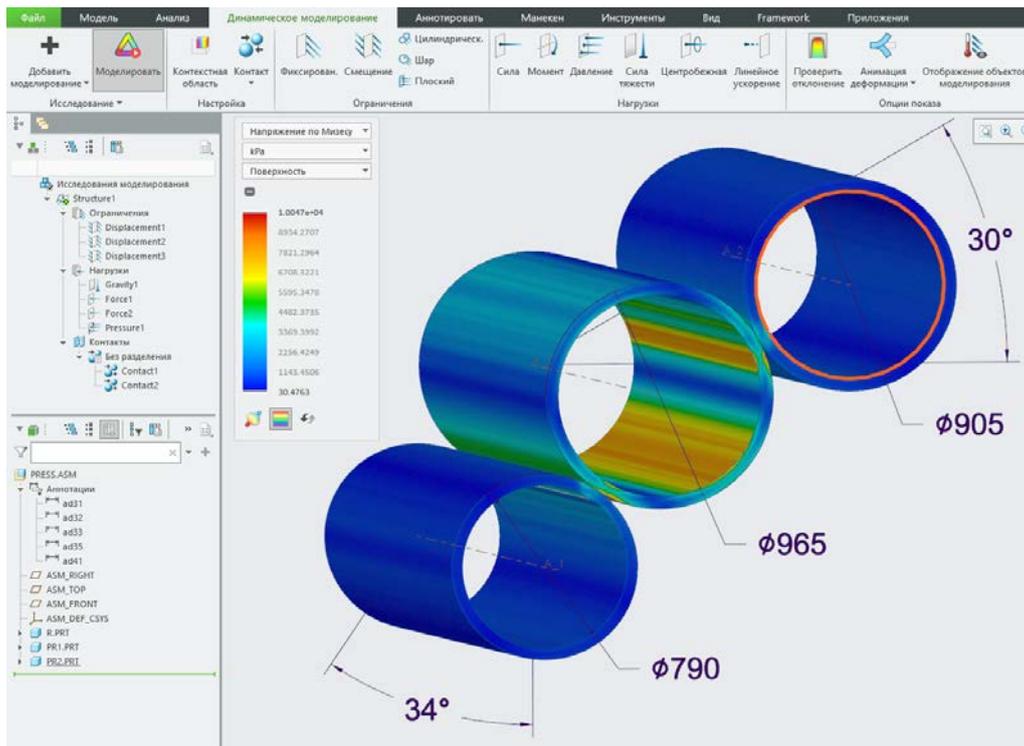


Рисунок 5 – Максимальные напряжения в рубашке отсасывающего вала

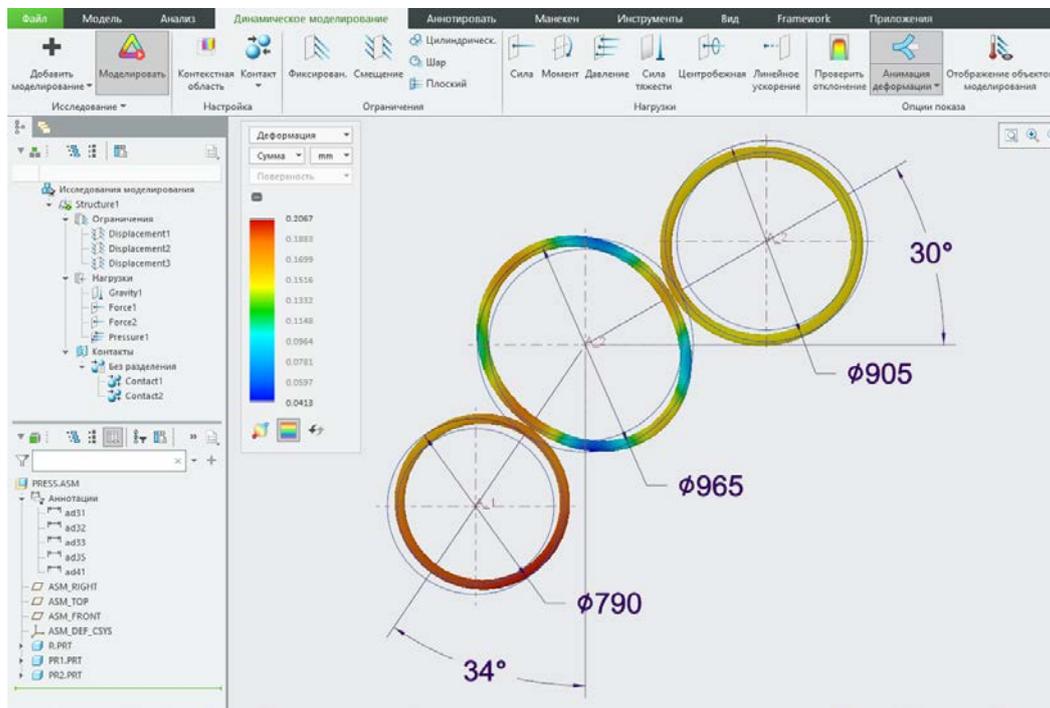


Рисунок 6 – Деформации рубашки отсасывающего вала

Полученные результаты моделирования в системе PTC Creo Parametric согласуются с результатами расчета вала (без учета перфорации), представленными в системе PTC MathCad Prime.

Построенную модель можно с легкостью использовать при различных нагрузках и диаметрах, например, при износе внутренней стенки рубашки.

Проведенные исследования моделей рубашки вала, учитывающих все факторы, влияющие на напряженное состояние, позволяют дать рекомендации о возможности дальнейшей эксплуатации вала при различных нагрузках в прессовой части.

Рубашки отсасывающих валов по соотношению толщины стенки и радиуса близки к оболочечным конструкциям. Требуется углубленное изучение более точных моделей валов для исследования актуальных вопросов их колебаний и устойчивости, длительной прочности, нелинейного взаимодействия форм колебаний.

Статические, динамические расчеты и исследование рубашки вала на различных уровнях нагружения с учетом перфорации и агрессивных сред является одним из первых необходимых условий на пути создания более совершенных конструкций валов и прессовых частей.

Список литературы

1. Санников А. А., Старжинский В. Н. и др. Вибрация и шум технологических машин и оборудования лесного комплекса: моногр. / Под ред. А.А. Санникова. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. – 484 с.
2. Тойбич, С. В. Разработка методов вибрационного проектирования валов прессовых частей бумагоделательных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Тойбич Сергей Владимирович. – Екатеринбург, 2006. – 192 с.
3. Куцубина, Н. В. Теория и практика оценки технического состояния трубчатых валов бумагоделательных машин: моногр. / Н. В. Куцубина. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. – 132 с.

DYNAMIC MODELING OF PRESS SHAFTS OF PAPERMAKING MACHINES

I. V. Pereskokov*, N. V. Kutsubina²

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg

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

The abstract. The article presents dynamic and mathematical models of the paper machine suction shaft shirt. The constructed models were studied with changes in loading and stress state caused by a decrease in the wall thickness of the shaft shirt. The conducted studies of the models will allow calculating the stress state of the perforated shirt of the suction shaft for all possible internal diameters of the shaft and for any specified loads in the presses.

Keywords: *press shaft, papermaking machine, dynamic and mathematical modeling, tense state.*

References

1. Sannikov A.A., Starzhinskiy V.N. i dr. Vibratsiya i shum tekhnologicheskikh mashin i oborudovaniya lesnogo kompleksa: monogr. / Pod red. A.A. Sannikova. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2006. – 484 s.
2. Toybich S.V. Razrabotka metodov vibratsionnogo proektirovaniya valov pressovykh chastey bumagodelatel'nykh mashin: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.03 / Toybich Sergey Vladimirovich. – Ekaterinburg, 2006. – 192 s.
3. Kutsubina N.V. Teoriya i praktika otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya trubchatykh valov bumagodelatel'nykh mashin: monogr. / N.V. Kutsubina. – Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2016. – 132 s.

БУМАГООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

К. И. Балыбердин*, Я. В. Казаков

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

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

Аннотация. По результатам исследований установлено, что древесина ветвей осины делигнифицируется сульфатным способом аналогично древесине стволовой части осины, при этом полученная целлюлоза высокого выхода имеет число Каппа 52 и 54 единицы, и выход 60,2 % и 61,8 %. Фундаментальные свойства целлюлозы, полученной из ветвей, по сравнению с целлюлозой из ствола имеют ниже на 32 % среднюю длину волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3 % ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м) и на 22,3 % ниже собственную прочность волокна (11,3 против 14,5 км). При этом целлюлоза из ветвей обладает несколько большей (на 2,3 %) величиной сил связи, при сопоставимой плотности. Основные прочностные свойства целлюлозы из ветвей осины, по сравнению с образцом из целлюлозы ствола, имеет более низкие значения в большинстве случаев. Однако различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивлению сжатию не превышают 3 %, что свидетельствует о перспективе использования целлюлозы из ветвей в композиции картона. Установленные отличия в бумагообразующих свойствах целлюлозы из ветвей осины позволяют предположить, что их использование в композиции небеленых видов бумаги в больших количествах не приведет к повышению прочности и жесткости бумаги и картона.

Ключевые слова: *лиственные лесосечные отходы, сульфатная варка, целлюлоза, бумагообразующие свойства.*

В современных условиях рост промышленного потенциала развитых стран мира во многом определяется возможностями решения проблемы сырьевого обеспечения. Для целлюлозно-бумажного производства это может быть связано с более широким использованием лесосечных отходов в виде ветвей и вершинок, доля которых может составлять 15...20 % от массы всей биомассы дерева [1]. Основная доля таких отходов не находит применения. Введение в переработку древесины ветвей соответствует тенденциям по рациональному природопользованию и охране природы, и выражается в комплексном использовании древесного сырья [2].

В России за последнее время проведен ряд исследований, в которых рассмотрены процессы переработки различных видов сырья из лесосечных отходов с целью получения технической целлюлозы [3, 4]. Считается, что тонкомерная древесина в виде ветвей и вершинок обладает определенным потенциалом в качестве сырья для ЦБП и экономической целесообразностью применения, однако прочностные свойства целлюлозы из нее уступают свойствам целлюлозы из стволовой древесины [2, 4].

Осина является одной из основных пород древесины, используемой для производства технической целлюлозы, бумаги и картона. Она характеризуется быстрым ростом и способностью адаптироваться к различным условиям окружающей среды, что делает их возобновляемым и экологически чистым ресурсом [5, 6].

При обсуждении качества технической целлюлозы обычно речь идет о ее бумагообразующих свойствах. Бумагообразующие свойства – это набор свойств, которые в совокупности определяют достижение требуемого качества изготавливаемой бумаги. При этом важным является не только его влияние на свойства получаемой бумаги, но и поведение волокнистого полуфабриката в технологических процессах изготовления из него бумаги. Таким образом, бумагообразующие свойства волокнистого материала нельзя охарактеризовать

однозначно каким-либо показателем [7, 8]. Бумагообразующие свойства исходных волокнистых материалов во многом определяют уровень механических характеристик готовой бумаги. Неоднократно доказано, что длина волокна, его грубость, собственная прочность и когезионная способность имеют решающее влияние на прочностные свойства.

В данной работе были выявлены основные бумагообразующие свойства целлюлозы из древесины ветвей осины, изучена возможность и целесообразность использования их в качестве дополнительного сырья для получения технической сульфатной целлюлозы, используемой при производстве тарного картона.

В качестве материала для получения целлюлозы выбрана осина *Populus Tremula*, произрастающая в Приморском районе Архангельской области. Среднее количество годовых колец на срезе составляет 22, а внешний диаметр ствола 17 см. Из ветвей этого же дерева были отобраны образцы, диаметром 15...30 мм, из которых также как из ствола, после ручной окорки, изготовлена вручную щепка, размерами $15 \pm 3 \times 25 \pm 2 \times 5 \pm 1$ мм. Для сравнения, в тех же условиях получены и исследованы образцы целлюлозы из древесины ствола и из ветвей. Для получения целлюлозы из древесины использована сульфатная варка, как наименее требовательный к качеству сырья способ делигнификации.

Варка целлюлозы из ветвей и ствола осины проведена на автоклавной системе CAS 420 при условиях: гидромодуль 4; расход активной щелочи на варку 14,5 %; температура варки 170 °С; общая продолжительность варки достигала 135 минут, включая подъем температуры в течение 80 мин. Общий выход целлюлозы составил 60,2 % у ветвей и 61,8 % у ствола, число капша – 52 и 54 соответственно. Полученный полуфабрикат по величине выхода и содержанию лигнина соответствует критериям, предъявляемым к целлюлозе высокого выхода, которая используется в производстве тарного картона.

Бумагообразующие свойства целлюлозы определены для образцов в виде лабораторных отливок 75 г/м², изготовленных после размола на мельнице Йокро до степени помола 30 °ШР. Средняя длина и грубость волокна были определены на автоматическом анализаторе волокна FiberTester. Для определения нулевой разрывной длины на приборе PulMac использовались образцы, вырезанные из отливок 60 г/м². Межволоконные силы связи по С.Н. Иванову определялись у образцов, полученных из двухслойной отливки, массой каждого отдельного слоя 100 г/м² на испытательной машине «Тестсистема 101».

Физико-механические свойства лабораторных отливок определены после кондиционирования в стандартных условиях, так как показатели бумаги сильно меняются в зависимости от ее равновесной влажности. При определении механических, прочностных и деформационных свойств отливок, для каждого показателя проведено 5 параллельных определений и рассчитано среднее значение.

Очевидно, что морфологические особенности строения древесины и, соответственно, целлюлозных волокон из ветвей могут оказывать влияние на главные или, так называемые, фундаментальные свойства получаемых целлюлозных волокон [8, 9]. К ним относят 5 основных свойств: среднюю длину волокон, грубость волокон, собственную прочность волокон, способность к уплотнению во влажном состоянии, когезионную способность [10, 11].

В таблице 1 приведены данные о характеристиках, оценивающих фундаментальные свойства волокна (по Кларку) небеленой сульфатной целлюлозы. Полученные результаты позволяют отметить следующие отличия: у волокон целлюлозы, полученной из ветвей, по сравнению с целлюлозой из ствола, ниже на 32 % средняя длина волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3 % ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м) и на 22,3 % ниже собственная прочность волокна (11,3 против 14,5 км).

Однако целлюлоза из ветвей обладает несколько большей (на 2,3 %) величиной сил связи, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона. Также обращает на себя внимание достаточно высокая плотность отливок, практически равная плотности отливок целлюлозы из ствола, которая играет важную роль в физико-механических свойствах картона (бумаги).

Таблица 1 – Фундаментальные свойства целлюлозы из лиственных лесосечных отходов

Параметр	Целлюлоза из ветвей	Целлюлоза из ствола	Целлюлоза из ветвей, % от величины целлюлозы из ствола
Средневзвешенная (по длине) длина волокна, мм	0,586	0,862	68,0
Способность к уплотнению во влажном состоянии (плотность отливок), г/см ³	0,861	0,870	99,0
Когезионная способность (межволоконные силы связи по С.Н. Иванову), МПа	2,43	2,37	102,3
Грубость волокон, мг/м	14,3	18,9	75,7
Собственная прочность волокна (нулевая разрывная длина), км	11,3	14,5	77,7

Данные закономерности объясняются меньшими размерами волокон целлюлозы из ветвей, мелкие волокна образуют более плотную структуру листа, и создаются условия для развития межволоконных сил связи у волокон после размола. Также это может быть связано с возрастом волокон, клеточная стенка находится еще в процессе формирования, поэтому у них меньше грубость и, соответственно, собственная прочность.

Отмеченные особенности фундаментальных свойств целлюлозы из ветвей обеспечивают различия в стандартных физико-механических характеристиках лабораторных отливок. Результаты представлены в таблице 2. В целом образец целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет более низкие значения в большинстве исследуемых свойств.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики отливок сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей и ствола осины (30 °ШР)

Характеристика	Целлюлоза из ветвей	Целлюлоза из ствола	Целлюлоза из ветвей, % от величины целлюлозы из ствола
Средняя толщина образца, мкм	88	82	108
Относительное сопротивление продавливанию, кПа	502	516	97
Разрывная длина, м	8300	9800	85
Относительное удлинение при разрыве, %	3,48	3,65	95
Относительное сопротивление раздиранию, мН	300	395	76
Сопротивление сжатию короткого образца (SCT), кН/м	2,57	2,62	98
Жесткость при растяжении, кН/м	410	460	89

Обладая на 32 % меньшей длиной волокна и на 22 % меньшей собственной прочностью волокна, целлюлоза из ветвей осины имеет ниже сопротивление раздиранию на 24 %, на 15 % разрывную длину, на 11 % жесткость при растяжении, на 5 % относительное удлинение при разрыве.

В то же время различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3 %, что может быть связано с повышенной величиной межволоконных сил связи целлюлозы из ветвей при сопоставимой плотности, которые компенсируют отрицательное влияние меньшей длины и прочности волокна.

Так как полученную целлюлозу предполагается использовать в композиции тарного картона, то минимальные различия в величине сопротивления продавливанию и сжатию позволяют говорить об определенном потенциале целлюлозы из ветвей для использования в композиции картона.

Заключение. Молодая древесина ветвей осины делигнифицируется сульфатным варочным раствором аналогично древесине стволовой части осины, при этом полученная целлюлоза высокого выхода имеет число Каппа 52 и 54 единицы, и выход 60,2 % и 61,8 %.

Из фундаментальных свойств целлюлоза, полученная из ветвей, по сравнению с целлюлозой из ствола, имеет ниже на 32 % среднюю длину волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3 % ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м) и на 22,3 % ниже собственную прочность волокна (11,3 против 14,5 км). При этом целлюлоза из ветвей обладает несколько большей (на 2,3 %) величиной сил связи, при сопоставимой плотности, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона.

Основные физико-механические характеристики лабораторных образцов целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет более низкие значения в большинстве исследуемых свойств. Однако различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не значительны, что свидетельствует о перспективе целлюлозы из ветвей для использования ее в композиции картона.

Установленные отличия в бумагообразующих свойствах волокон целлюлозы из ветвей осины позволяют предположить, что их использование в композиции небеленых видов в больших количествах не приведет к повышению прочности и жесткости бумаги и картона. Дальнейшие исследования в этом вопросе позволят получить количественные параметры, регулирующие соотношение в композиции целлюлозы из ветвей.

*** Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова)*

Список литературы

1. Кононов Г. Н., Веревкин А. Н., Сердюкова Ю. В., Жукова В. А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 69-84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84.
2. Гелес И. С., Коржицкая З. А., Агеева М. И. Влияние добавок тонкомерной древесины на свойства сульфатной целлюлозы // Химия и технология целлюлозы: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1980. – С. 20-36.
3. Хакимова Ф. Х., Синяев К. А., Хакимов Р. Р., Носкова О. А. Молодая тонкомерная древесина от рубок ухода за лесом – резерв сырья для производства целлюлозы и бумаги // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 88-97. DOI: 10.118698/2542-1468-2020-2-88-97.
4. Хакимова Ф. Х., Хакимов Р. Р., Носкова О. А. Молодая древесина ели и березы – полноценное сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Химия растительного сырья. – 2018. – № 3. – С. 261-270. DOI: 10.14258/jcprm.2018033782.
5. Hunt K., Gee W., Hussein A., Reath S., Watson P. Kraft pulping opportunities from Canadian aspen. // PACWEST Conference, Jasper Alberta. Pulp and Paper Technical Association of Canada, 2002.

6. Xu E.C., Sabourin M.J. Process selection for chemimechanical pulping of aspen. // Journal of Pulp and Paper Technical Association of Canada, 2002. No. 3 (103). P. 36-39.
7. Дулькин Д. А., Спиридонов В. А., Камаров В. И., Блинова Л. А. Свойства целлюлозных волокон и их влияние на физико-механические характеристики бумаги и картона / Под ред. В. И. Комарова. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2011. – 176 с.
8. Казаков Я. В., Манахова Т. Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2013. – Вып. 5. – С. 34-39.
9. Гурьев А. В., Дернов А. И., Дьякова Е. В. Оценка свойств волокон в структурированном и неструктурированном состояниях. Часть I. Полуфабрикаты для тарного картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2013. – № 1. – С. 67-70.
10. Кларк Дж. Технология целлюлозы (Наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка её в бумагу, методы испытаний) / Пер. с англ. А. В. Оболенской, Г. А. Пазухиной. – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 456 с.
11. Манахова Т. Н. Влияние структурно-морфологических свойств волокна на деформативность и прочность хвойной сульфатной небеленой целлюлозы: дис. ... канд. техн. наук. – Архангельск, 2014. – 170 с.

PAPER-FORMING PROPERTIES OF KRAFT PULP FROM HARDWOOD LOGGING WASTE

K. I. Balyberdin*, Ya. V. Kazakov

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

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

The abstract. The results of the research showed that aspen branch wood is delignified by the kraft method similar to aspen trunk wood, and the resulting high-yield pulp has a Kappa number of 52 and 54 units, and a yield of 60.2% and 61.8%. The fundamental properties of pulp obtained from branches compared to pulp from the trunk are 32% lower average fiber length (0.59 versus 0.86 mm), 24.3% lower coarseness (14.3 versus 18.9 mg/m³), and 22.3% lower intrinsic fiber strength (11.3 versus 14.5 km). At the same time, the pulp from branches has a slightly higher (by 2.3%) value of interfiber bonding forces, with a comparable density. The main strength properties of cellulose from aspen branches, compared to the sample from trunk cellulose, have lower values in most cases. However, the differences in the values of burst strength and tear strength do not exceed 3%, which indicates the prospects for using pulp from branches in the furnish of cardboard. The established differences in the paper-forming properties of pulp from aspen branches allow us to assume that their use in the furnish of unbleached types of paper in large quantities will not lead to an increase in the strength and rigidity of paper and cardboard.

Keywords: hardwood forest residues, kraft cooking, pulp, papermaking properties.

References

1. Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Y.V., Zhukova V.A. Drevesina kak himicheskoe syr'e. [Wood as a chemical raw material]. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikaciya drevesiny kak put' polucheniya cellyulozy. [Delignification of wood as a route to cellulose production]. Chast' II Lesnoj vestnik [Forestry Bulletin], 2022. T. 26. № 2. P. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84 (In Russian).
2. Geles I.S., Korzhitskaya Z.A., Ageeva M.I. Vliyanie dobavok tonkomernoj drevesiny na svoystva sul'fatnoj cellyulozy [Influence of fine wood additives on the properties of kraft pulp], Himiya i tekhnologiya cellyulozy: Mezhev. sb. nauch. tr. L.: LTA, 1980. [Chemistry and technology of cellulose: Interuniversity collection of scientific works L.: LTA, 1980]. S. 20–36 (In Russian).

3. Khakimova F.H., Sinyayev K.A., Khakimov R.R., Noskova O.A., Molodaya tonkomernaya drevesina ot rubok uhoda za lesom – rezerv syr'ya dlya proizvodstva cellyulozy i bumagi [Young fine wood from forest thinning - a reserve of raw materials for pulp and paper production], Lesnoj vestnik [Forestry Bulletin], 2020. T. 24. № 2. S. 88–97. DOI: 10.118698/2542-1468-2020-2-88-97 (In Russian).
4. Khakimova F.H., Khakimov R.R., Noskova O.A. Molodaya drevesina eli i berezy – polnocennoe syr'e dlya cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti [Young wood of spruce and birch - a complete raw material for pulp and paper industry], Himiya rastitel'nogo syr'ya. [Chemistry of plant materials]. 2018. №3. S. 261–270. DOI: 10.14258/jcprm.2018033782 (In Russian).
5. Hunt K., Gee W., Hussein A., Reath S., Watson P. Kraft pulping opportunities from Canadian aspen., PACWEST Conference, Jasper Alberta. Pulp and Paper Technical Association of Canada, 2002.
6. Xu E.C., Sabourin M.J. Process selection for chemimechanical pulping of aspen. Journal of Pulp and Paper Technical Association of Canada, 2002. N 3 (103). P. 36–39.
7. Dulkan D.A., Spiridonov V.A., Kamarov V.I., Blinova L.A. Svoystva cellyuloznyh volokon i ih vliyanie na fiziko-mekhanicheskie harakteristiki bumagi i kartona; pod red. V.I. Komarova. [Properties of cellulose fibers and their influence on physical and mechanical characteristics of paper and cardboard; ed. by V.I. Komarov]. Arhangel'sk: Severnyj (Arkticheskij) federal'nyj universitet, 2011. 176 s. (In Russian).
8. Kazakov Y.V., Manakhova T.N. Bumagoobrazuyushchij potencial hvojnnoj nebelennoj cellyulozy: sovremennyy vzglyad cherez avtomaticheskij analizator volokna [Paper-forming potential of coniferous unbleached pulp: a modern view through an automatic fiber analyzer], Cellyuloza. Bumaga. Karton, 2013. Vyp. 5. [Cellulose. Paper. Cardboard, 2013. Issue. 5] S. 34–39 (In Russian).
9. Guriev A.V., Dernov A.I., Dyakova E.V. Ocenka svoystv volokon v strukturirovannom i nestruturirovannom sostoyaniyah. [Estimation of fiber properties in structured and unstructured states]. Chast' I. polufabrikaty dlya tarnogo kartona [semi-finished products for containerboard]. Cellyuloza. Bumaga. Karton. 2013. № 1. [Cellulose. Paper. Cardboard, 2013. № 1] S. 67–70 (In Russian).
10. Clarke J. Tekhnologiya cellyulozy (Nauka o cellyuloznoj masse i bumage, podgotovka massy, pererabotka eyo v bumagu, metody ispytaniy) [Pulp Technology (Science of pulp and paper, preparation of pulp, processing of pulp into paper, test methods)], Per. s angl. A.V. Obolenskoj, G.A. Pazuhinoy. – M.: Lesn. prom-st', 1983. 456 s. (In Russian).
11. Manakhova T.N. Vliyanie strukturno-morfologicheskikh svoystv volokna na deformativnost' i prochnost' hvojnnoj sul'fatnoj nebelennoj cellyulozy [Influence of structural and morphological properties of fiber on deformability and strength of coniferous unbleached kraft pulp]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk, 2014. 170 s. (In Russian).

ПОЛУЧЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СУЛЬФАТНОГО ЛИГНИНА, РАСТВОРИМОГО В КИСЛОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ СРЕДАХ

Е. А. Бобкова*, О. В. Федорова

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

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

Аннотация. Самым распространенным возобновляемым ресурсом в мире является биомасса (древесная и недревесная). Основными составляющими биомассы являются целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин. В древесной биомассе вторым по распространению биополимером является лигнин, на долю которого приходится 15-40 % массы древесины. Лигнин является крупнейшим природным ресурсом ароматических соединений. Тем не менее, из 70 млн. тонн сульфатного лигнина (СФА-лигнина), производимого ежегодно, лишь незначительная часть – всего 1-2 % используется для производства химической продукции с добавленной стоимостью. Это свидетельствует о том, что СФА-лигнин до сих пор является недостаточно используемым сырьем и менее востребованным, чем лигносульфонаты. Сегодня СФА-лигнин в основном применяется для производства энергии в процессе получения целлюлозы. Таким образом, имеется высокая актуальность и важность получения производных СФА-лигнина, как с теоретической точки зрения, а именно, для исследования реакционной способности отдельных структур и всего лигнина, так и с точки зрения практической значимости – создания новых производных лигнина, в том числе разработка технологических процессов их промышленного производства. В лабораторных условиях с использованием методов органического синтеза (метилование, окисление, присоединение гидросульфита натрия) показана возможность получения модифицированного СФА-лигнина, растворимого в кислой и нейтральной средах, т. е. аналогичного лигносульфонатам. Дальнейшее изучение свойств модифицированного лигнина позволит установить новые области его применения, в т.ч. при необходимости после дополнительной функционализации его структуры.

Ключевые слова: сульфатный лигнин, сульфонирование, окисление, метилирование, лигносульфоновые производные лигнина.

Одной из основных задач рационального использования природных ресурсов является эффективная переработка значительных объемов промышленных отходов. Некоторые виды углеродсодержащих отходов имеют уникальные свойства при огромных объемах производства, что позволяет рассматривать их как потенциальные вторичные сырьевые ресурсы, образованные в результате технологических процессов. Одним из отходов целлюлозно-бумажного производства является лигнин в виде СФА-лигнина и лигносульфонатов [1]. СФА-лигнин представляет собой побочный продукт сульфатного процесса варки целлюлозы [2, 3].

Трудностью переработки любого типа лигнина является многовариантность его структурных звеньев и связей между ними. На данный момент подавляющее количество СФА-лигнина используется в немодифицированном виде в качестве источника углерода при восстановлении сульфата натрия в сульфид в СРК. Лишь незначительная доля в мировом производстве СФА-лигнина подвергается дальнейшей химической модификации для получения востребованных и ценных продуктов, например, в которых он является полным или частичным заменителем фенола в формальдегидсодержащих смолах. Кроме того, СФА-лигнин используется в составах других полимерных материалов [2-5]. В отличие от СФА-лигнина спрос на лигносульфонаты, хоть и не с целью получения химически модифицированных производных, не уменьшается, а в последние годы даже возрастает. Опубликованы различные методы модификации сульфатного лигнина и синтез на его основе

функционализированного лигнина, схожего по своим свойствам к лигносульфонату. Например, предлагается сульфометилирование сульфатного лигнина в смеси гидросульфит натрия/формальдегид (формалин), при этом не учитывается, что при взаимодействии компонентов данной смеси образуется менее реакционноспособный с лигнином гидроксиметилсульфонат натрия [4]. Поэтому поиск новых методов получения «лигносульфонатов» из СФА-лигнина является актуальной задачей целлюлозно-бумажной и лесохимической отрасли, а также химической технологии природного возобновляемого сырья в целом.

Цель данного исследования заключается в том, чтобы получить модифицированный сульфатный лигнин со свойствами, максимально близкими по растворимости к лигносульфонатам.

Задачи исследования:

- О-метилирование фенольных гидроксидов лигнина.
- Окисление нефенольных гидроксидов с преимущественным образованием алифатических карбонильных групп под действием различных окислителей.
- Присоединение гидросульфита натрия к окисленному лигнину, в т.ч. под действием исходных и отработанных промышленных варочных сульфитных щелоков.

Материалы и методы исследования:

В данном исследовании использовался хвойный СФА-лигнин, выделенный из черного щелока после варки хвойной древесины (ООО «РК-Гранд», г. Питкяранта). Все реагенты являлись торговыми реактивами различной степени чистоты. Сульфитный варочный щелок был предоставлен ОАО «Выборгская целлюлоза».

При получении производных СФА-лигнина использованы известные методы синтетической органической химии. Методы анализа, использованные в данной работе для контроля реакций, а также для подтверждения структур промежуточных и конечных продуктов на основе СФА-лигнина, были выбраны из литературных источников.

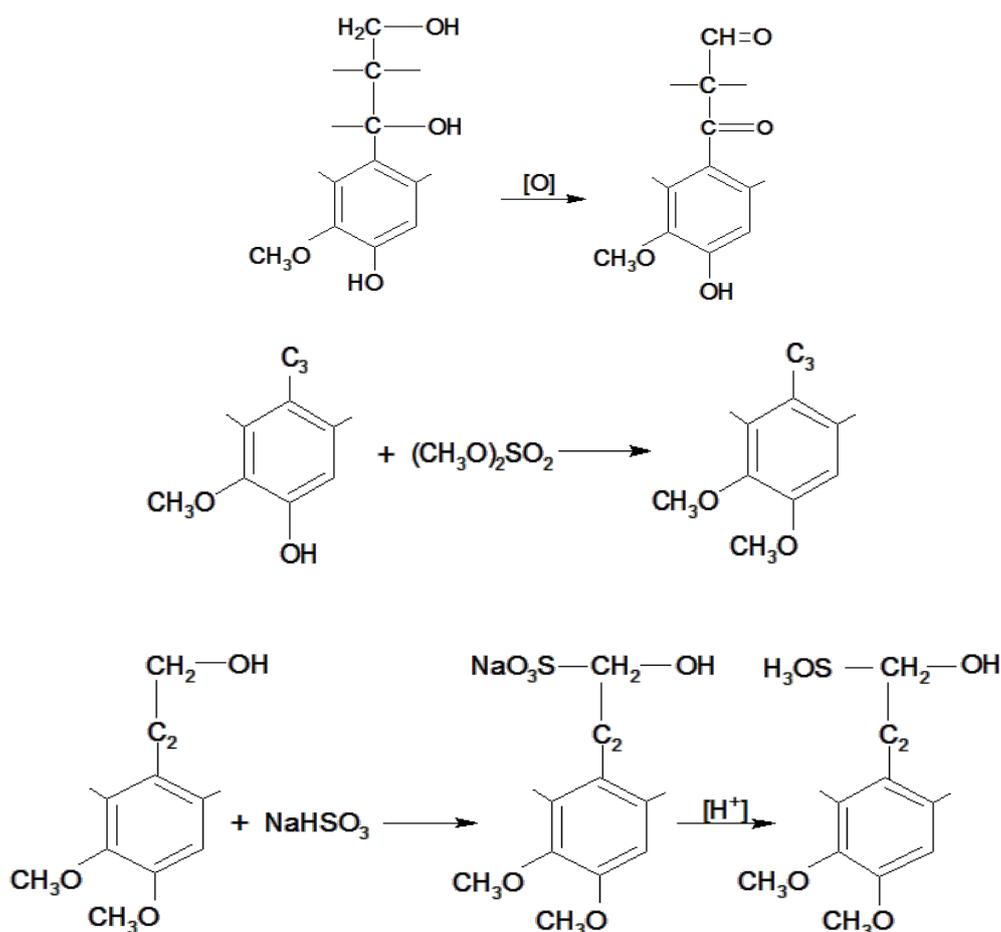
Результаты исследования:

В основе предлагаемой синтетической схемы получения «лигносульфонатного СФА-лигнина» лежали опубликованные данные и собственные предположения:

- о структуре и свойствах лигносульфонатов в зависимости от вида сульфитной варки целлюлозы;
- о роли метоксильных групп, а также фенольных и нефенольных гидроксидов в процессах растворимости СФА-лигнина и лигносульфонатов в различных средах;
- о селективном окислении фенольных и нефенольных гидроксильных групп;
- об условиях присоединения/неприсоединения гидросульфита натрия к альдегидным и кетонным карбонильным группам в составе окисленного лигнина.

Нами была осуществлена модификация СФА-лигнина, основанная на:

- окислении нефенольных, а также на О-метилировании фенольных гидроксидов. Условия окисления были выбраны такими, чтобы получить исключительно карбонильные группы в алифатических структурах лигнина. В качестве метилирующего агента был выбран диметилсульфат, широко используемый в промышленном масштабе в процессах метилирования различных органических веществ, методика применения которого для получения метоксилированного лигнина хорошо известна;
- присоединении гидросульфита натрия, полученного насыщением раствора гидрокарбоната натрия диоксидом серы либо присутствующим в варочном сульфитном щелоке (при этом более перспективным считаем применение пиросульфита натрия в наших дальнейших экспериментах в качестве источника гидросульфит-иона), к образованным альдегидным группам с получением соответствующих сульфонов и сульфоновых кислот:



Выводы:

- На основании исследованных реакций функционализации СФА-лигнина предложены многостадийные процессы получения модифицированного лигнина, растворимого в кислой и нейтральной средах.
- Метилирование фенольных и окисление нефенольных гидроксильных групп с последующим присоединением гидросульфита натрия позволило получить модифицированный лигнин с максимально близкими к лигносульфонатам свойствами по растворимости.
- Полученный модифицированный СФА-лигнин может найти применение в различных отраслях, где традиционно используются лигносульфонаты.

Список литературы

1. Vishtal A., Kraslawski A. Challenges in industrial applications of technical lignins // *BioRes.* 2011. V. 6. №3. P. 3547–3568.
2. Hu T.Q. *Chemical modification, properties, and usage of lignin.* New York: Springer, 2013. 291 p.
3. Argyropoulos D.D.S., Crestini C., Dahlstrand C., Furusjö E., Gioia C., Jedvert K., Henriksson G., Hultberg C., Lawoko M., Pierrou C., Samec J.S.M., Subbotina E., Wallmo H., Wimby M. Kraft lignin: a valuable, sustainable resource, opportunities and challenges // *ChemSusChem.* 2023. V. 16. e202300492.
4. Aro T., Fatehi P. Production and application of lignosulfonates and sulfonated lignin // *ChemSusChem.* 2017. V. 10. P. 1861–1877.
5. Smith (Jr.) R.L., Fang Z. *Production of biofuels and chemicals from lignin.* Singapore: Springer Nature, 2018. 435 p.

OBTAINING A MODIFIED SULPHATE LIGNIN SOLUBLE IN ACIDIC AND NEUTRAL MEDIA

E. A. Bobkova*, O. V. Fedorova

Higher School of Technology and Energetics, SPSUITD, St. Petersburg, Russia

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

The abstract. The most common renewable resource in the world is biomass (wood and non-wood). The main components of biomass are cellulose, hemicelluloses and lignin. In wood biomass, the second most common biopolymer is lignin, which accounts for 15-40% of the wood mass. Lignin is the largest natural resource of aromatic compounds. However, of the 70 million tons of sulfate lignin (SFA- lignin) produced annually, only a small portion – just 1-2% – is used to produce value-added chemical products. This indicates that SFA-lignin is still an underutilized raw material and less in demand than lignosulfonates. Today, SFA-lignin is mainly used for energy production in the cellulose production process. Thus, there is a high relevance and importance of obtaining derivatives of SFA-lignin, both from a theoretical point of view, namely, for studying the reactivity of individual structures and the entire lignin, and from the point of view of practical significance - the creation of new lignin derivatives, including the development of technological processes for their industrial production. In laboratory conditions, using organic synthesis methods (methylation, oxidation, addition of sodium hydrosulfite), the possibility of obtaining a modified SFA-lignin soluble in acidic and neutral media, i.e. similar to lignosulfonates, has been shown. Further study of the properties of modified lignin will allow us to establish new areas of its application, including, if necessary, after additional functionalization of its structure.

Keywords: sulfate lignin, sulfonation, oxidation, methylation, lignosulfone derivatives of lignin.

References

1. Vishtal A., Kraslawski A. Challenges in industrial applications of technical lignins // *BioRes.* 2011. V. 6. №3. P. 3547–3568.
2. Hu T.Q. Chemical modification, properties, and usage of lignin. New York: Springer, 2013. 291 p.
3. Argyropoulos D.D.S., Crestini C., Dahlstrand C., Furusjö E., Gioia C., Jedvert K., Henriksson G., Hultberg C., Lawoko M., Pierrou C., Samec J.S.M., Subbotina E., Wallmo H., Wimby M. Kraft lignin: a valuable, sustainable resource, opportunities and challenges // *ChemSusChem.* 2023. V. 16. e202300492.
4. Aro T., Fatehi P. Production and application of lignosulfonates and sulfonated lignin // *ChemSusChem.* 2017. V. 10. P. 1861–1877.
5. Smith (Jr.) R.L., Fang Z. Production of biofuels and chemicals from lignin. Singapore: Springer Nature, 2018. 435 p.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING CELLULOSE FROM HEMP PLANTS

A. Kh. Mardonov*, M. K. Abdumavlyanova, M. A. Mirsagatova
Tashkent chemical-technology institute, Uzbekistan, Tashkent
**E-mail: asror_mardonov@mail.ru*

Аннотация. Целлюлозу получают из стеблей конопли натриевым методом. Изучено влияние температуры, давления и концентрации раствора щелочи на процесс производства целлюлозы. Определены оптимальные условия получения целлюлозы из стеблей конопли. Изучено влияние концентрации перекиси водорода и температуры на отбеливание полученной целлюлозы.

Ключевые слова: стебель конопли, натриевый метод, температура, давление, концентрация, перекись водорода, целлюлоза.

The abstract. Cellulose is obtained from hemp stalks by the sodium method. The effect of temperature, pressure and alkali solution concentration on the pulp production process has been studied. The optimal conditions for obtaining cellulose from hemp stalks are determined. The effect of hydrogen peroxide concentration and temperature on the bleaching of the obtained pulp was studied.

Keywords: hemp stem, sodium method, temperature, pressure, concentration, hydrogen peroxide, cellulose.

Introduction. Nowadays, although information technologies are developing at a rapid pace, and management and work are moving to electronic form, the demand for paper and paper products in our Republic is increasing year by year. Because there are some paper materials that cannot be replaced by other materials [1].

The level of consumption of paper and cardboard per capita is one of the indicators of the well-being of human society, which is related to the level of gross domestic product in each country and the development of the pulp and paper industry [2]. The world average value of this indicator was 54.71 kg per person in 2009, in Africa – 7.51 kg / person, in Asia – 41 kg / person, in South America – 43 kg / person, in Europe - 178.7 kg / person, in North America - 229 kg / person. In the long term, taking into account the growth of the world economy by 2.9% per year and the demand for cardboard products by 2.2% per year, the volume of paper and cardboard production will continue to grow [3].

In the decision of the President of the Republic of Uzbekistan No. PQ-3244 of 23.08.2017 on the establishment of additional capacities for the production of cellulose and paper products in the Republic, poplar and other cellulose containing a large amount of pulp to obtain cellulose creating a base of raw materials by growing storage annual and perennial plants.

Material and methods. Analyzing the obtained results on the chemical composition after extraction of the vegetative part of hemp, we can say that it is a lignocarbohydrate complex, where the share of carbohydrates is about 70%, and the share of cellulose in it is more than 50% of the total content of polysaccharides. The non-hydrolyzable part of the plant raw material lignin is 1/3 of the total polysaccharides [4-5].

For the study, we used hemp stems grown in the Botanical Institute of the Republic of Uzbekistan, dried in air at a relative humidity of $10 \pm 1\%$. Under laboratory conditions, hemp stalks were ground to a size of 20 ± 5 mm and stored in desiccators to maintain constant moisture and chemical content during subsequent tests. The chemical composition of hemp stems was determined by standard methods, the results were compared with the most common representatives of deciduous and coniferous tree species and are presented in Table 1.

In order to obtain cellulose, studies were conducted on alkaline cooking of crushed hemp stems with different NaOH contents in the cooking solution and the main characteristic indicators of the obtained products were studied, which are given in Table 1.

Table 1 – Effect of NaOH concentration in cooking solution on the main characteristics of cellulose

No	NaOH, g/l	Tem-re, °C	Exit, %	Humidity, %	Ash content, %	α -cellulose, %	Degree of polymerization
1	20	150°C	16,4	2,1	-	-	-
2	30	150°C	28,7	2,7	0,92	81,4	1240
3	40	150°C	40,2	3,0	0,87	84,7	1275
4	50	150°C	51,2	3,1	0,84	89,2	1300
5	60	150°C	45,3	3,3	0,79	90,3	1180

From Table 1 it is evident that at a temperature of 150°C and an alkali concentration of up to 20 g/l in the cooking solution for 2 hours, little or no dissolution of the non-cellulose components of the feedstock occurs, which indicates an insufficient amount of alkali to dissolve the non-cellulose substances.

At a NaOH concentration of 50 g/l, semi-cellulose is obtained with a yield of more than 51,2%, with a moisture content of 3,1% and an ash content of 0.84%, an α -cellulose content of 89,2%, and a degree of polymerization of 1300.

When the alkali concentration increases to 25 g/l, the cellulose yield decreases to 45,3%, which can be explained by the growth of the reaction rate of cellulose macromolecule hydrolysis. At the same time, the content of α -cellulose drops by 1%, and the degree of polymerization to 1180, the moisture content of cellulose increases to 3,3%, which indicates a partial loosening of the supramolecular structure of cellulose.

Therefore, increasing the alkali concentration to more than 40-50 g/l is not advisable, as this increases the alkali consumption and worsens the quality of the resulting cellulose. Based on the data obtained, it can be considered that the optimal NaOH concentration in the digester is 50 g/l, at a temperature of 150°C.

In our next experiments, we studied the effects of various factors on the cellulose cooking process: temperature, time in order to determine the optimal conditions for the production of semi-finished fiber products from hemp stalks by the natron method. In our research, we first cooked ground hemp at different temperatures, time, pressure [6-13].

Further studies were conducted to establish the optimal cooking temperature. For this purpose, a series of experiments were conducted on cooking hemp stalks at different temperatures and at an alkali concentration of 50 g/l. The qualitative indicators of the obtained samples were studied. The obtained data are presented in Table 2.

Table 2 – The effect of temperature on the process of obtaining fiber semi-finished products from hemp stalks

Raw material	Temperature	NaOH, g/l	Humidity, %	Ash content, %	Cellulose amount, %
Hemp	130°C	50	2,1	-	33,6
	140°C	50	2,7	0,92	45,1
	150°C	50	3,0	0,87	51,2
	160°C	50	3,1	0,84	46,7

As can be seen from Table 2, the yield of the product increases as the temperature increases in the process of obtaining fiber semi-finished products from hemp stalks. However, the

delignification process was not completed; the obtained cellulose contains unripe stalks. In the second experiment, we carried out the baking process at a temperature of 150 °C, with sodium alkali solution of different concentrations and time without changing the pressure, hydromodule 5:1 compared to dry raw materials. The results of the experiment are presented in Table 3. From the experiment, it became known that in the process of extracting cellulose from hemp stalks, the increase in pressure and concentration of sodium alkali solution ensures the full progress of the delignification process.

Table 3 – Effect of sodium alkali solution concentration and time on the process of obtaining fibrous semi-finished products from hemp stalks

Raw material	Temperature	time, minute	Pressure, MPa	Cellulose amount, %
Hemp	140 °C	180	5	26,4
		210		28,3
		240		31,7
	150 °C	180	5	43,1
		210		48,5
		240		51,2
	160 °C	180	5	49,4
		210		46,9
		240		45,1

Based on the conducted research, the following optimal cooking mode for the vegetative part of hemp can be selected:

NaOH concentration – 50 g/l
 Temperature – 150°C
 Time – 4 hours.

With the optimal cooking conditions, the yield of cellulose from hemp was 51,2%, humidity 3,0, ash content 0,87%, α -cellulose content 90,1% and the degree of polymerization 1295.

Bleaching of fiber semi-finished products obtained from hemp stems was carried out without using chlorine substances according to the following scheme: bleaching - bleaching with hydrogen peroxide in two stages - acidification process was carried out. Bleaching with hydrogen peroxide was carried out at 90 °C for 120 min, pH 10-11 with a consumption of 6% by weight of H₂O₂ a.d.m. Acidification was carried out at room temperature for 60 minutes with 0.5% sulfuric acid based on the weight of cellulose a.d.m.

References

1. G. A. Smook. Handbook for pulp and paper technologists. "TAPPI. Atlanta", 1994. 392.
2. P. Pihlajamäki., H. Hytonen. "Mixed tropical hardwood - a minor and declining source of fiber for paper", 2004. 2.
3. R. W. Hunter. "Non-wood Fiber - 2010 and beyond. "Prospects for non-wood paper production in Asia Pacific", 2010. 56.
4. V. G. Kharazov. Technology of cellulosic and paper production: v 3 t. (Syre i proizvodstvo polufabrikatov). "Production of semi-finished products", 2003. 633.
5. P. Rousu., J. Anttila. Sustainable pulp production from agricultural waste. "Resources, conservation and recycling", 2002. 85.
6. H. A. Ruiz., D.S. Ruzene., D.P. Silva., A.A. Vicente., J.A. Teixeira. Development and characterization of an environmentally friendly process sequence (autohydrolysis and organosolv) for wheat straw delignification. "Appl biochem biotechnol", 2011. 629.

7. W. Sridach. The environmentally benign pulping process of non-wood fibers. *“Suranaree journal science technology”* 2002. 105.
8. A.A. Shatalov., H. Pereira. Arundo donax L. reed: new perspectives for pulping and bleaching - organosolv delignification // TAPPI Peer-reviewed paper. *“Solution for people, processes and paper”*, 2001. 11.
9. V.A. Barbash., I.V. Trembus., N.N. Okcentyk. Solvolysis delignification of kenaf and sorghum sugar stalks. *“Research bulletin of national technical university of Ukraine”*, 2012. 93.
10. H. Nanko., A. Button., D. Hillman. *“The world of market pulp appleton”*, 2005. 258.
11. A.T. Farsheh., M.D. Firouzabadi., S. Mahdavi. *“Properties of kenaf (Hibiscus cannabinus L.) Bast fiber reinforced bagasse soda pulp in comparison to long fiber”*, 2011. 906.
12. A.V. Obolenskaya., Z.P. Elnitskaya., A.A. Leonovich. *“Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose”*, 1991. 320.
13. V.A. Barbash., N.G. Bazarnova., V.I. Markin. Methodology for comparing the efficiency of delignification processes of plant raw materials. *“Proceedings of the V All-Russian conference with the intern. participation”*, 2012. 67.

CELLULOSE EXTRACTION FROM PAVLOVIA TREE AND STUDY OF QUALITY INDICATORS

R. Sayfutdinov, M. K. Abdumavlyanova, U. D. Mukhitdinov*, M. A. Mirsagatova

Tashkent chemical-technology institute, Uzbekistan, Tashkent

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

The abstract. In this research work, we studied the characteristics of the Pavlovia tree: roots, growth rate, reproduction, fruits, weight, strength, stability and quality indicators. Paulownia wood was first crushed to a thickness of 0.5-1.0 cm, then treated in 2.5-5.5% NaOH alkali at a temperature of 170°C for 6 hours. Cellulose productivity, brightness level, moisture content, lignin content, ash content, viscosity, α -cellulose and polymerization levels of processed cellulose were determined.

Keywords: *properties of pavlovia wood, L&W fiber tester, mettler toledo apparatus, cellulose, quality indicators.*

Introduction. Nowadays, fast-growing tree varieties are being developed in the world, and research is being conducted to study the cellulose content and their properties obtained from pavlovian trees. Research is investigating the various methods used to extract cellulose from pavlovian trees, including the study of the properties of the resulting cellulose [1-2]. The results of the conducted scientific research show that the quality of cellulose obtained from pavlovia trees is higher than that of cellulose obtained from other sources, in addition, pavlovia plants are known to be used in pharmacology, cosmetology, animal husbandry, and are used for the production of wood cellulose. In another effort, our government is implementing various measures to support the cultivation of pavlovia trees, including allocating land for plantations and leasing land to farmers and businesses for timber production. In addition, the cultivation of pavlovia trees is a profitable resource and efforts are underway to optimize cultivation through new innovative agrotechnologies for their propagation [3-5].

Pavlovia tree is a fast-growing tree with large leaves, about 70 cm in diameter and flowers up to 6 cm in diameter, with a beautiful crown. The diameter of the tree is up to 1 meter. The average lifespan is up to 100 years. Depending on the growing environment, trees can reach a maximum of 25 meters and different heights [6].

Pavlovia wood fibers are not as dense as other dense woods. Paper is a good raw material for the production of products. A 3-year-old Pavlovia tree with a girth of 50-60 cm and a height of 12-15 m replaces a 35-40-year-old pine [7].

Currently, in countries with developed cellulose industry, various researches are being conducted to reduce the participation of factors that cause various destructive conditions in the process of extracting cellulose from various plants containing natural polymers. Because the quality indicators of the obtained cellulose are required to be at a level that allows for its wide use in the future. Taking into account the above points, some simplifications were made in the process of obtaining cellulose from the perennial plant pavlovia tree. First, the plant stem was separated into small pieces and chemical processing was carried out in special laboratory conditions [8-9].

Methods. Propagation of the pavlovia plant is underway, it is a fast-growing tree that is used as a building material. In order to determine the suitability of pavlovia plant for chemical processing, individual parts (body, branches, root, bark) were studied and the fractional composition of fibers was determined by the new automatic Fiber Tester [10] method.

The results of the analysis of the components of pavlovia (table 1) show that the most important part of wood, cellulose, is present in the largest amount in the trunk of the tree and is 45.5%, while the least amount of cellulose is present in the bark 24.5%.

Table 1 – The amount of cellulose and other components in the components of pavlovnia

№	Components	Body	Horns	Roots	Bark
1	Cellulose, %	45,5	37,2	39,1	24,5
2	Lignin, %	21,8	18,7	19,2	17,1
3	Ash content,%	1,71	1,53	1,71	4,6
4	Moisture,%	18,3	18,5	18,2	17,5
5	Extractable substances,%	3,21	4,1	5,6	4,7

Table 1 shows that the branches and roots of pavlovnia can be used as secondary raw materials for chemical processing, because they contain up to 37.2 and 39.1 %, respectively, that is, only 6-8% less cellulose than the body. will be available. Lignin, the second chemical component of pavlovnia, increases with decreasing cellulose content. 21.8, 18.7, 19.2 and 17.1% of lignin were found in the trunk, branches, roots and bark, respectively. It is desirable to use pavlovian bark, which has the least amount of lignin, to obtain fibrous semi-products. The remaining components are valuable secondary resources for chemical processing to extract cellulose.

From the Pavlovnia tree, cellulose is obtained by first hydrolysis and then alkali treatment. In order for the chemical treatment to be effective, the pavlovian fiber is cut and crushed in the size of 0.5-1 cm. Then 100 g is taken out, put in a glass and 500 ml of water is poured into it. The mixture is boiled for 4 hours, extracted and filtered, and the pirahe part is separated. After the mass is separated from the liquid, it is hydrolyzed in a 3% nitric acid solution for 60 minutes, then it is washed to pH 6.5...8.5 and boiled with 5% sodium alkali to separate the pulp from lignin, polysaccharides and fatty substances. After washing the obtained cellulose to pH 9...9.5, it is bleached with hydrogen peroxide solution. Then the mass is washed and bleached cellulose is dried in a drying cabinet. To determine the optimal conditions for the extraction of cellulose from Pavlovnia fiber, it is cooked in 5% alkali for different times.

In order to determine the optimal conditions for the extraction of cellulose from the Paulownia fiber, it is cooked in different concentrations of alkali for 6 hours (Table 2).

Table 2 – Quality indicators of cellulose obtained from 3- and 5-year-old paulownia trees

№	NaOH, %	Boiling τ , hours	Temperature, $^{\circ}\text{C}$	Quality indicators of cellulose								
				Cellulose product, %	Whiteness level, %	Humidity, %	Lignin, %	Ash content, %	Viscosity, cPs	α -cellulose, %	*DP	
3 years old												
1	2.5	6	170	37,8	61,3	3.2	23,9	4.83	7,1	61.5	351	
2	3.5	6	170	40.1	71,5	3.6	27,5	3.65	9,3	68.3	376	
3	5.0	6	170	43.6	87,2	3.5	29,1	3.51	11,6	70,1	410	
4	5.5	6	170	45.3	91,4	3.3	30,2	3.32	12,4	74.6	451	
5 years old												
1	2.5	6	170	39,5	65,7	3.4	21,8	3.92	19,4	73.2	1105	
2	3.5	6	170	42.4	76,4	3.6	22,1	2.75	21,5	85.4	1069	
3	5.0	6	170	46.1	89,6	3.7	20,7	2.51	23,2	87.1	1025	
4	5.5	6	170	48.3	93,1	3.5	23,2	2.27	24,1	88.5	957	

*DP – Degree of polymerization

In table 2, in order to determine the optimal concentration of alkali solution for extracting cellulose from the composition of 3 and 5-year-old raw materials, it was boiled for 6 hours in its 2.5,

3.5, 5.0, 5.5% solution and the optimal conditions were determined (table 2). It can be observed from the table that certain properties of cellulose produced under the influence of different alkali concentrations have different indicators. At the alkali concentration of 5.0%, the 3-year paulownia cellulose content increased to 43.6%, α -cellulose to 70.1%, whiteness to 87.2%, lignin to 29.1%, ash to 3.51%, viscosity to 11.6 and polymerization degree to In 410 and 5-year- old paulownia cellulose, the amount of cellulose is 46.1%, α -cellulose is 87.1%, whiteness is 89.6%, lignin is 20.7%, ash is 2.51%, viscosity is 23.2, and the degree of polymerization is 1025.it became known in the experiment.

The L&W Fiber Tester, developed by the Yuman company, is used to determine the average fiber size [11-12].

The length of 3- and 5-year-old cellulose fibers of Pavlovnia tree is different, 0.620 mm in 3-year and 0.884 mm in 5-year. (Figure 1).

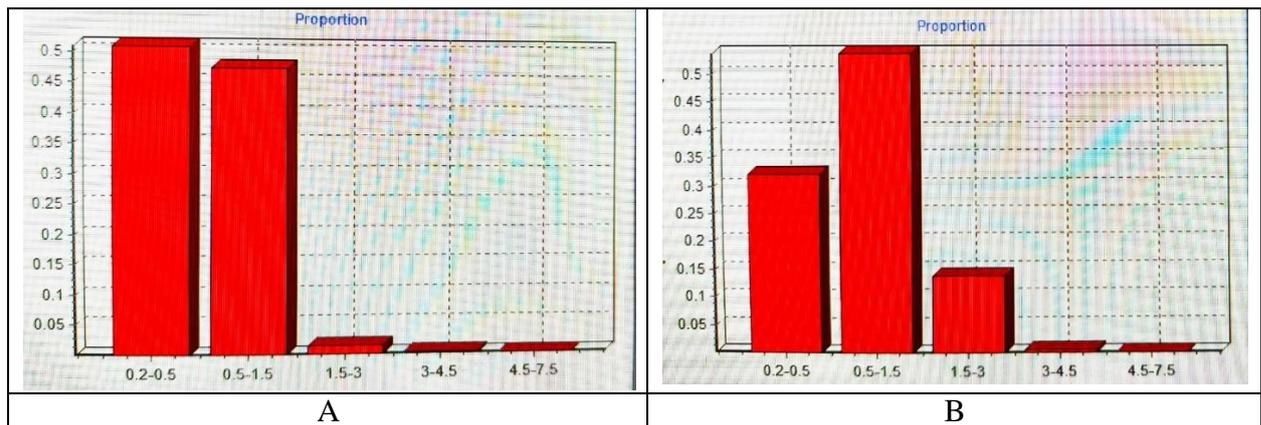


Figure 1. The average fractional composition of the cellulose obtained from 3- and 5-year-old Pavlovnia trees by fiber length, mm: A – 3-year and B – 5-year

In the data presented in Figure 1, after processing the pavlovian raw material under the same conditions and taking cellulose fibers from it, and determining the length of the fibers on the Fiber Tester device, the cellulose of the pavlovian tree was 0.620 mm in 3 years and 0.884 mm in 5 years, and the difference between them was 0.264 mm. Based on this, it turned out that the older the pavlovian tree, the more cellulose fibers have a positive morphological structure.

Table 3 shows the average measurement length of fibers and their average measurement width.

Table 3 – Average fiber length and average fiber width of 3-year-old Pavlovnia tree pulp

Variable	Value	Difference
Mean length	0.545 mm	0.006 mm
Mean width	29.9 μ m	0.0 μ m
Mean shape	86.1 %	0.1 %
Mean fibril area	1.1 %	0.8 %
Mean fibril perimeter	3.4%	2.7 %
Mean fines	27.8%	

Table 4 – Average fiber length and average fiber width of 5-year-old paulownia pulp

Variable	Value	Difference
Mean length	0.884 mm	0.007 mm
Mean width	20.0 μ m	0.1 μ m
Mean shape	84.1 %	0.1 %
Mean fibril area	2.7 %	0.4 %
Mean fibril perimeter	6.7 %	1.8 %
Mean fines	27.0 %	

As can be seen in Table 3-4, the average length of cellulose fibers obtained from the 3- and 5-year-old pavlovian tree, when measuring 3807 fibers in the 3-year suspension of pavlovian cellulose in the Fiber Tester apparatus, is 0.620 mm; width - 0.006 mm, and average length - 0.884 mm when measuring 3254 fibers in a 5-year suspension of pavlovian cellulose; width - 0.007 mm.

When the current conductivity of the cellulose obtained from the Pavlovnia tree was checked in the Mettler Toledo apparatus, it was 77.8 mS/m in 3 years and 76.5 mS/m in 5 years, and the difference between them was 1.3.

Conclusions. Experiments were carried out during processing of 3- and 5-year-old Pavlovnia tree, and it was determined that cellulose and its derivatives, as well as paper products, can be produced with high-quality products.

Cellulose extraction from Pavlovnia tree raw materials, its optimal conditions were thoroughly studied;

All main quality indicators of obtained cellulose were determined and compared with celluloses of other perennial plants;

The average length of 3,807 fibers in a 3-year suspension of paulownia cellulose in a 3-year suspension of paulownia tree and a width of 0.006 mm was measured in the Fiber Tester apparatus of 3- and 5-year-old celluloses, and the average length of 3,254 fibers in a 5-year suspension of paulownia cellulose was 0.884 mm; The dimensions of fibers with a width of 0.007 mm were studied.

In the Mettler Toledo apparatus, the current conductivity of cellulose obtained from the Pavlovnia tree was 77.8 mS/m in 3 years and 76.5 mS/m in 5 years, and the difference between them was 1.3.

It was found that it is possible to obtain simple and complex esters from cellulose obtained from the Pavlovnia tree and it is recommended as a good raw material for various paper production industries.

References

1. Saifutdinov R. Development of technology for obtaining wood chipboard and cellulose from cellulose-containing raw materials // diss. doctor of technical sciences. Tashkent. 1999. pp. 243.
2. Kurbanova N.K. Development of technology for producing cellulose from paulownia wood. Tashkent. 2013. pp. 113.
3. Primkulov M., Sayfutdinov R., Nabieva I. Technology of obtaining cellulose and paper from annual plants. Tashkent. 2012. pp. 268.
4. Primkulov M., Rakhmanberdiev G'. Pulp and paper technology. Tashkent. Science and technology. 2009. pp. 165.
5. Sayfutdinov R., Muxitdinov U.D., Eshpulatov N.M. Research of increasing the reactivity cotton cellulose intended for chemical // "Technical science and innovation" journal. 2020. №1. pp. 35-42.
6. <http://paulownia.bg>
7. www.reade.com/pavlony-powder-cellulose-fiber-str
8. Sayfutdinov R., Muxitdinov U.D., Eshpulatov N.M. Increasing reactivity cotton cellulose intended for acetylation // International Journal of Research. 2020. pp. 854-860.
9. Sayfutdinov R., Muxitdinov U.D., Eshpulatov N.M. Increasing reactivity of cotton celluloses for chemical processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 883(1), 012133. 2020. pp. 1-7.
10. Gorazdova V.V., Dernova E.V., Dulkan D.A., Okulova E.O. Influence of fibrillation and shortening of fibers during grinding on the characteristics of strength, deformability and crack resistance of cellulose materials. Forestry magazine. 2018. No. 2. pp. 109-118.
11. Hamdamova D., Umarova V., Primkulov M. Microcrystalline cellulose technology. T.: "Drops of Thought". 2021. 208.
12. Varanasi S., Batchelor W.J. Rapid Preparation of Cellulose Nanofibre Sheet // Cellulose. 2013. Vol. 20, no. 1. pp. 211-215.

РАЗДЕЛ 2. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 338.504
ГРНТИ 06.71.63

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ ОБРАЗОВАНИЯ МАКУЛАТУРНОГО СЫРЬЯ В СОСТАВЕ ТКО И ПРОБЛЕМЫ ЕГО ВОВЛЕЧЕНИЯ В ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ОБОРОТ

Р. В. Колесников

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

E-mail: roman_kolesnikov@hotmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема роста образования отходов производства и потребления, в частности, твердых коммунальных отходов (ТКО), их морфологический состав. Проведен анализ современного состояния рынка макулатуры России. Дана оценка объемов образования макулатурного сырья как в процессе производства, так и в процессе потребления населением товаров и услуг. Проведена оценка потребности предприятий целлюлозно-бумажной промышленности во вторичном бумажном сырье, в том числе наиболее востребованного сорта макулатуры МС-5Б. Рассмотрены основные проблемы, препятствующие вовлечению вторичного бумажного сырья из состава твердых коммунальных отходов в экономический оборот.

Ключевые слова: отходы, отходы производства и потребления, твердые коммунальные отходы (ТКО), макулатура, бумага и картон, переработка отходов, циркулярная экономика, экономика замкнутого цикла.

Проблема обращения с отходами производства и потребления стоит в России достаточно остро. Ежегодный объем образования отходов превышает 9 млрд. тонн. Из них 49,9 млн. тонн приходится на отходы потребления (твердые коммунальные отходы (ТКО)). Рост объемов образования отходов производства и потребления за минувшее десятилетие составил 4126 млн. тонн, или рост на 80 % (рис. 1). При этом доля отходов, направляемых на утилизацию, остается крайне низкой – 13 % в 2023 году в целом по отходам производства и потребления, 7 % – по твердым коммунальным отходам, в сравнении со странами, имеющими схожий уровень социально-экономического развития, – 24 % в Казахстане, 27 % в Турции, 28 % в Болгарии, 44 % в Латвии, 49 % в Словакии [11, 12].

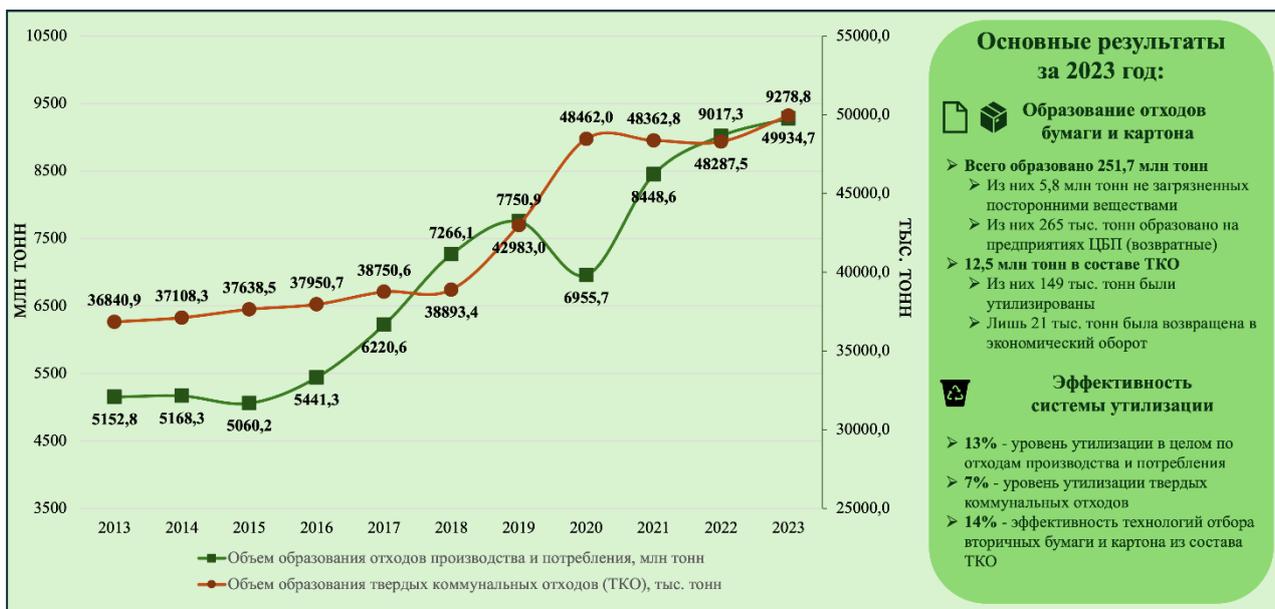


Рисунок 1 – Инфографик: Динамика развития и основные характеристики сферы обращения с отходами производства и потребления в России за 2013–2023 гг. [10]

Как видно из инфографика, прослеживается четкая тенденция к дальнейшему росту количества образуемых отходов производства и потребления. Бумага и картон составляют существенную часть образующихся отходов. Если рассматривать образование отходов в процессе производства, объем бумаги и картона, пригодных для вторичной переработки в качестве макулатурного сырья, составил в 2023 году 5,8 млн. тонн, из них 265 тыс. тонн было образовано на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) в качестве брака и обрезков, подлежащих дальнейшей переработке.

Около четверти отходов, образующихся в процессе потребления населением товаров и услуг, приходится на бумагу и картон [2, 3]. В 2023 году оценочный объем образования бумаги и картона в составе ТКО составил около 12,5 млн. тонн. При этом немногим более 1 % от общего объема образования, 149 тыс. тонн, было направлено на утилизацию, из которых лишь 21 тыс. тонн была возвращена в экономический оборот в качестве вторичных материальных ресурсов. Совокупный потенциальный объем образования макулатурного сырья в 2023 году составил 18,3 млн. тонн, из которых 68 % приходится на отходы, образующиеся у населения.

В целом, можно заключить, что существующая система утилизации отходов является малоэффективной. Как было сказано ранее, она существенно уступает странам, со схожим уровнем социально-экономического развития. По итогам 2023 года уровень утилизации отходов производства и потребления составил 13 %, если рассматривать образующиеся у населения отходы отдельно, то уровень утилизации ТКО в том же году составил 7 %. Стоит отдельно отметить низкую эффективность существующих технологий отбора вторичных сырья и материалов из состава ТКО. Из 149 тыс. тонн бумаги и картона, выделенных из состава ТКО в процессе их раздельного накопления и/или обработки, только 21 тыс. тонн макулатуры оказалась пригодной для дальнейшей переработки.

Извлекаемое из отходов макулатурное сырье, в соответствии с последней редакцией ГОСТ 10700–97, в зависимости от состава, источников поступления, цвета и способности к роспуску, подразделяется на 3 группы и 13 сортов:

– *Группа А* – включает марки макулатуры высокого качества, образующиеся преимущественно в процессе производства белой бумаги (марки МС-1АБ МС-2А и МС-3А). Помимо этого, в данную группу входят использованные невлагопрочные бумажные мешки (марка МС-4А);

– *Группа Б* – бумажные и картонные отходы среднего качества, образующиеся как в процессе производства, так и в процессе потребления: МС-5Б – гофрокартон, а также крarton и бумага, применяемые при его производстве; МС-6Б – картон практически всех видов с наличием цветной или черно-белой печати; МС-7Б – в основном включает в себя отходы полиграфической промышленности;

– *Группа В* – состоит из отходов производства и потребления бумаги и картона низкого качества, являющихся остаточным сырьем производства, газетной бумаги и ее отходов, а также бумаги, имеющей загрязнения, пропитку или посторонние фракции [7].

Для сравнения, стандартом США предусмотрено 58 основных сорта макулатурного сырья и 29 специальных, общеевропейский стандарт включает 58 сортов макулатуры [8, 9]. Основными классификационными признаками в обоих стандартах являются глубина сортировки, было ли сырье в употреблении, подвергалось обработке, загрязнено посторонними веществами (клей, пропитка), наличие полиграфии, окрашивания и др.

Помимо градации макулатурного сырья, ГОСТ 10700–97 устанавливает ряд технических требований к характеристикам макулатурного сырья. Среди них следует отметить наиболее важные требования: к массовой доле примесей макулатуры других марок в композиции исходной марки сырья; к загрязненности макулатурного сырья, требования к влажности. Также ГОСТом устанавливаются требования к формированию товарных партий макулатуры – их упаковке и маркировке.

Основными направлениями переработки вторичного бумажного и картонного сырья являются:

- применение в строительстве при производстве органических утеплителей, кровельных и изоляционных материалов;
- производство санитарно-гигиенических сортов бумаги: туалетная бумага, бумажные салфетки, картонная втулка, одноразовая посуда;
- производство упаковочного материала из формованного бумажного волокна и пульперкартона (рассадочные горшки для цветов, упаковка для яиц, крафт-бумага);
- при производстве тарных видов бумаги и картона для производства гофротары;
- при производстве газетной бумаги;
- в топливно-энергетическом комплексе в качестве топливных брикетов (биотопливо) [1, 6].

Как с экономической, так и с экологической точки зрения, использование вторичного сырья при производстве бумаги и картона является более предпочтительным. Например, переработка одной тонны макулатуры заменяет 4,5 м³ древесины, что позволяет сохранить от вырубки от 10 до 20 деревьев, порядка 20 тыс. литров воды, необходимых для производства бумажной массы, и около 1000 кВт электроэнергии, требуется меньшее количество химических веществ, необходимых для выработки бумаги из древесного сырья, наблюдается снижение объемов выброса углекислого газа на 1700 кг, по сравнению с производством бумаги из первичной целлюлозы [5].

Всего на территории России осуществляет хозяйственную деятельность около 270 предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, из них около 50 специализируются на выпуске тарного картона из первичной целлюлозы и/или макулатурного сырья. Ведут хозяйственную деятельность ряд предприятий по выпуску упаковочного материала из формованного бумажного волокна и пульперкартона, гигиенических сортов бумаги.

Наиболее распространенным направлением переработки макулатурного сырья в России является производство тарных видов бумаги и картона для производства гофротары. Основным видом макулатурного сырья для производства данных видов бумаги и картона является макулатура марки МС-5Б, состоящая из отходов производства и потребления гофрированного картона, а также бумаги и картона, применяемых в его производстве.

Оценочный объем выпуска тарного картона предприятиями ЦБП России в 2023 году составил 4842,5 тыс. тонн. По разным оценкам 55–70 % от всего объема выпуска приходится на тарный картон, произведенный из макулатурного сырья. Исходя из этих данных можно

оценить объем выпуска тарного картонного крана, произведенного из макулатуры в 2023 году, в 3026,6 тыс. тонн. С учетом показателя выработки 700 кг бумаги из 1 тонны макулатуры, среднегодовая потребность российских предприятий целлюлозно-бумажной промышленности в макулатурном сырье составляет 4350 тыс. тонн [10, 13, 15].

Таким образом, потребность предприятий целлюлозно-бумажной промышленности только в макулатуре марки МС-5Б составляет почти 4,5 млн. тонн ежегодно, что составляет четверть от годового объема образования всего макулатурного сырья в России. На сегодняшний день большинство крупнейших производителей тарного картона имеют аффилированные заготовительные предприятия, либо долгосрочные договоры на поставку с участниками рынка.

Рынок поставщиков макулатуры представлен 23 крупнейшими заготовителями, расположенными в Европейской части России, преимущественно в Москве и Санкт-Петербурге, определенные заготовительные кластеры функционируют на Урале и в Краснодарском крае. Основными каналами заготовки макулатурного сырья являются поступление товарных партий от торговых сетей (продуктовые и FMCG-ритейлеры, розничные сети продажи электроники и бытовой техники и др.), государственных структур, операторов крупных офисных помещений, осуществляется прием мелких товарных партий от частных лиц через сеть пунктов приема [14].

Стоит отметить ограниченность данных каналов заготовки макулатуры, они не способны покрыть растущую потребность в макулатурном сырье. Отходы, образующиеся в процессе производства, также не способны полностью покрыть потребность во вторичном бумажном сырье. Поэтому возникает необходимость создания механизмов возвращения в экономический оборот бумажного и картонного сырья из крупнейшего источника их образования состава – твердых коммунальных отходов, собираемых у населения.

Несмотря на наличие положительного опыта в прошлом, централизованная система сбора макулатурного сырья, образующегося в процессе потребления населением товаров и услуг, в России отсутствует. Так, в СССР был развит механизм заготовления макулатуры через разветвленную сеть пунктов приема основных видов вторичного сырья и различные механизмы стимулирования населения к его сбору. Основой такой системы был функционировавший в составе Госнаба СССР – «Союзторглавресурс», в который входило более 5,5 тысячи пунктов приема вторичного сырья у населения и 527 предприятий вторичных ресурсов. Можно сделать вывод, что уже в тот период вторичные ресурсы были неразрывно связаны с обеспечением экономики страны сырьем и материалами, и являлись ее неотъемлемой частью [4].

Среди основных проблем, препятствующих выделению бумаги и картона из состава образующихся у населения отходов, являются отсутствие централизованной системы раздельного сбора и накопления отходов, в целом низкий уровень охвата населения площадками для раздельного сбора и накопления отходов, неразвитость системы пунктов приема вторичного сырья у населения и отсутствие его заинтересованности в раздельном сборе отходов или самостоятельной сдачи полезных фракций отходов в пункты приема вторичного сырья.

Все вышеупомянутые проблемы оказывают существенное влияние на рынок макулатурного сырья в России. Ему характерен низкий уровень предсказуемости, в частности, объемов предложения макулатурного сырья, что затрудняет планирование деятельности предприятий-заготовителей и переработчиков макулатурного сырья и делает невозможным разработку качественных прогнозов. Как следствие, на рынке наблюдается высокая волатильность цен на макулатурное сырье. Цены на наиболее востребованную макулатуру сорта МС-5Б могут существенно колебаться – изменение до 40 % на горизонте в несколько месяцев и до 100 % в течение календарного года [14, 15].

Для решения проблемы насыщения рынка достаточным количеством макулатурного сырья, повышения его устойчивости и прогнозируемости следует внедрить централизованную систему раздельного сбора твердых коммунальных отходов, являющихся наиболее

перспективным источником вторичных материальных ресурсов. При этом курирование сбора отдельных фракций вторичных ресурсов может быть делегировано соответствующим отраслевым объединениям, заинтересованным в получении ресурсов. Помимо обеспечения отрасли дешевым макулатурным сырьем, внедрение раздельного сбора будет способствовать решению ряда экологических проблем и созданию новых рабочих мест, а по сути – нового направления в экономике.

Список литературы

1. Бондаренко С. А. Наилучшие и доступные технологии в переработке макулатуры // Катановские чтения - 2023: Сборник научных трудов студентов 13–29 марта 2023 года. – Абакан: Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, 2023. – С. 164.
2. Воробьев В. И., Тимофеев Г. П., Чарнецкий В. В. Морфологический состав твердых коммунальных отходов // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: в 6 т., Курск, 11–12 декабря 2018 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – Т. 5. – С. 162–168.
3. Зайцев В. А., Сотнезов А. В. Экспериментальное определение состава и свойств твердых коммунальных отходов – ключевой этап при разработке программных мероприятий в области управления коммунальными отходами // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29, № 9 (168). – С. 21–23.
4. Марьев В. А., Гаев Ф. Ф., Шканов С. И. и др. Инновационная система организации, учета обращения с твердыми коммунальными и крупногабаритными отходами, экономического стимулирования их раздельного сбора и обработки // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, № 1 (124). – С. 46–59.
5. Петрова Ю. П. Проект «Вторая жизнь бумаги»: проблемы и перспективы» // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики, 10–14 апреля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2023. – Т. 3. – С. 1459–1461.
6. Рыжиков В. А., Пекарец А. А., Аким Э. Л. Переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащей целлюлозу и синтетические полимеры // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы IV Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2022 года / Отв. редактор О. В. Фёдорова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 66–72.
7. ГОСТ 10700–97 Макулатура бумажная и картонная. Технические условия. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.
8. SIST EN 643:2014 – Paper and board - European list of standard grades of paper and board for recycling. Brussels, Belgium. 2014. 16 p.
9. ISRI – Scrap Specifications Circular. Washington, USA. 2024. 66 p.
10. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 01.08.2024).
11. Eurostat – statistical agency [Электронный ресурс]. – URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (дата обращения: 01.08.2024).
12. Официальный сайт Российского Экологического Оператора [Электронный ресурс]. – URL: <https://geo.ru/> (дата обращения: 04.08.2024).
13. Официальный сайт Российской Ассоциации организаций и предприятий целлюлозно-бумажной промышленности [Электронный ресурс]. – URL: <https://bumprom.ru/> (дата обращения: 04.08.2024).

14. Официальный сайт отраслевого объединения Лига переработчиков макулатуры [Электронный ресурс]. – URL: <https://liga-pp.ru/> (дата обращения: 03.08.2024).
15. Официальный сайт Объединенных бумажных фабрик [Электронный ресурс]. – URL: <https://ukobf.ru/> (дата обращения: 03.08.2024).

ASSESSMENT OF THE VOLUME OF FORMATION OF RECOVERY RAW MATERIALS IN THE COMPOSITION OF MSW AND THE PROBLEMS OF ITS INVOLVEMENT IN ECONOMIC TURNOVER

R. V. Kolesnikov

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, St. Petersburg

E-mail: roman_kolesnikov@hotmail.com

The abstract. The article considers the problem of production and consumption waste volumes growth, in particular municipal solid waste (MSW), and its morphological composition. The current state of the Russian wastepaper market is analyzed. The volumes of wastepaper raw materials formation are estimated both in the production process and in the process of consumption of goods and services by the population. The need of pulp and paper industry enterprises for secondary paper raw materials, particularly the most popular grade of wastepaper MS-5B, is estimated. The main problems preventing the involvement of secondary paper raw materials from municipal solid waste in economic circulation are considered.

Keywords: waste, production and consumption waste, municipal solid waste (MSW), waste paper, paper and cardboard, waste recycling, circular economy, closed-loop economy.

References

1. Bondarenko, S. A. Nailuchshie i dostupnye tekhnologii v pererabotke makulatury // Katanovskie chteniya - 2023: Sbornik nauchnykh trudov studentov 13–29 marta 2023 goda. Abakan: Khakasskiy gosudarstvennyy universitet im. N. F. Katanova, 2023. pp. 164. (in Russian)
2. Vorob'ev, V. I., Timofeev, G. P., Charnetskiy, V. V. Morfologicheskiy sostav tverdykh kommunal'nykh otkhodov // Nauka molodykh - budushchee Rossii: sbornik nauchnykh statey 3-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: v 6 t., Kursk, 11–12 dekabrya 2018 goda. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga", 2018. T.5. pp. 162–168. (in Russian)
3. Zaytsev, V. A., Sotnezov, A. V. Eksperimental'noe opredelenie sostava i svoystv tverdykh kommunal'nykh otkhodov - klyuchevoy etap pri razrabotke programmnykh meropriyatiy v oblasti upravleniya kommunal'nymi otkhodami // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii, 2015. T. 29, № 9(168). pp. 21–23. (in Russian)
4. Mar'ev, V. A., Gaev, F. F., Shkanov, S. I. i dr. Innovatsionnaya sistema organizatsii, ucheta obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi i krupnogabaritnymi otkhodami, ekonomicheskogo stimulirovaniya ikh razdel'nogo sbora i obrabotki // Vestnik MGSU, 2019. T. 14, № 1(124). pp. 46–59. (in Russian)
5. Petrova, Yu. P. Proekt «Vtoraya zhizn' bumagi»: problemy i perspektivy» // Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki: sbornik materialov IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu kosmonavtiki, 10–14 aprelya 2023 goda. Krasnoyarsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva, 2023. T.3. pp. 1459–1461. (in Russian)
6. Ryzhikov, V. A., Pekarets, A. A., Akim, E. L. Pererabotka otkhodov kartonno-bumazhnoy makulatury, soderzhashchey tsellyulozu i sinteticheskie polimery // Sovremennaya tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost'. Aktual'nye zadachi i perspektivnye resheniya: Materialy IV

- Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov TsBP, Sankt-Peterburg, 14–15 noyabrya 2022 goda / Otv. redaktor O. V. Fedorova. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologiy i dizayna, 2023. pp. 66–72. (in Russian)
7. GOST 10700–97 Makulatura bumazhnaya i kartonnaya. Tekhnicheskie usloviya. Minsk: IPK Izdatel'stvo standartov, 2003. 12 P. (in Russian)
 8. SIST EN 643:2014 – Paper and board - European list of standard grades of paper and board for recycling. – Brussels, Belgium. – 2014. – 16 P.
 9. ISRI - Scrap Specifications Circular. – Washington, USA. – 2024. – 66 P.
 10. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (in Russian) [Electronic resource]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (date accessed: 01.08.2024)
 11. Eurostat – statistical agency [Electronic resource]. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (date accessed: 01.08.2024)
 12. Ofitsial'nyy sayt Rossiyskogo Ekologicheskogo Operatora (in Russian) [Electronic resource]. URL: <https://reo.ru/> (date accessed: 04.08.2024)
 13. Ofitsial'nyy sayt Rossiyskoy Assotsiatsii organizatsiy i predpriyatiy tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti (in Russian) [Electronic resource]. URL: <https://bumprom.ru/> (date accessed: 04.08.2024)
 14. Ofitsial'nyy sayt otraslevogo ob"edineniya Liga pererabotchikov makulatury (in Russian) [Electronic resource]. URL: <https://liga-pm.ru/> (date accessed: 03.08.2024)
 15. Ofitsial'nyy sayt Ob"edinennykh bumazhnykh fabrik (in Russian) [Electronic resource]. URL: <https://ukobf.ru/> (date accessed: 03.08.2024)

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКЕ

А. И. Смирнова*, А. Б. Дягилева, А. Е. Присмакова, П. И. Ленивец, Д. И. Мазурик
Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург
E-mail: smirnova_nasty87@mail.ru

Аннотация. В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к реализации концепции циркулярной экономики как к инструменту экологизации производственных циклов с комплексным, эффективным и рациональным использованием ресурсов как первичных, так и вторичных. В связи с этим основной задачей развития лесопромышленного комплекса является развитие симбиоза с научными организациями, которые занимаются исследованием побочных продуктов и поиском эффективного их использования в различных смежных отраслях экономики. Это способствует увеличению глубины переработки и повышению степени использования древесного сырья, что соответствует Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 года. В общем объеме перерабатываемого сырья большинство российских лесозаготовительных и деревоперерабатывающих предприятий имеют 25-40 % отходов или потенциального вторичного сырья. Лесной сектор наиболее близко соответствует концепции циркулярной экономики ввиду наличия производственных и технологических решений, позволяющих обеспечить повышение экологической эффективности предприятий сектора, а также способствовать развитию вокруг них малого и среднего бизнеса, заинтересованного в использовании потенциальных вторичных продуктов на базе ряда отходов. В докладе рассматриваются некоторые направления использования вторичных продуктов в системе ЖКХ, строительстве и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: вторичные материалы, отходы, целлюлозно-бумажная промышленность, циркулярная экономика.

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) России – это регулятор растительного сырья в сфере товаров народного потребления, который сегодня связан со строительной, сельскохозяйственной, энергетической, туристической и рядом других отраслей, а также является локомотивом для развития большинства регионов России. В составе ЛПК можно выделить наиболее значимые отрасли, такие как лесозаготовительную, лесопильно-деревообрабатывающую, целлюлозно-бумажную и лесохимическую. Все отрасли ЛПК технологически связаны между собой, так как включают в себя процессы заготовки древесного сырья и его последующей переработки. Поэтому ЛПК необходимо рассматривать в центре циркулярной экономики в режиме решения глобальных экологических проблем.

На сегодняшний день существуют проблемы, тормозящие дальнейшее развитие ЛПК России: нерациональное использование ресурсов; перерасход воды при производстве продукции из древесины; загрязнение близлежащих рек сточными водами и другими отходами; частые и несанкционированные вырубки лесов и т. д. Решением данных проблем должно заниматься не только государство, но и предприятия, обеспечивающие вырубку и переработку лесных ресурсов. Устойчивое и планомерное развитие ЛПК России будет обеспечено в случае организации переработки всего объема заготавливаемых ресурсов, т. е. при рациональном использовании первичного древесного сырья.

В России необходимо решать основное противоречие, выражающееся в объеме лесных ресурсов при низком уровне их освоения. В настоящий момент большинство предприятий

ЛПК ориентировано на комплексное использование древесных ресурсов, что подтверждается наличием различных направлений использования древесных отходов – пеллеты, топливные брикеты и т. д. Функционирование лесопромышленного комплекса России на основе концепции циркулярной экономики предполагает использование древесных отходов в производстве таких видов продукции, отходы от производства которых могут быть также использованы в повторном производственном цикле. Сама продукция по истечению срока полезного использования может быть повторно возвращена в производственный цикл в качестве сырья. Организация процесса оборотного использования древесных ресурсов и отходов наиболее эффективна в случае вовлечения сторонних отраслей народного хозяйства [1].

В данной работе рассматривается только часть актуальных вопросов, связанных с использованием отходов, которые образуются на промышленной площадке комплекса, а именно в целлюлозно-бумажной отрасли (ЦБП). Наиболее массовыми являются такие отходы, как осадки сточных вод (ОСВ), кора, опил, которые совместно транспортируются на полигоны или совместно сжигаются, если это увеличивает энергетическую эффективность предприятия.

Зола от сжигания осадков сточных вод в смеси с древесными отходами может использоваться на предприятии в качестве альтернативного коагулянта-флокулянта (ЗККФ) для очистки сточных вод отрасли. Применение специально подготовленной золы в качестве реагента обусловлено содержанием соединений алюминия (694 мг/дм^3), кремния (909 мг/дм^3), железа (80 мг/дм^3) и других элементов, обладающих коагулирующими свойствами.

По результатам исследования коагулирующая способность зольного коагулянта зависит от условий процесса и дозы реагента. В качестве примера на рисунке 1 представлена зависимость эффективности очистки воды на стадии водоподготовки для производства в сравнении с традиционным товарным коагулянтом (сульфатом алюминия).

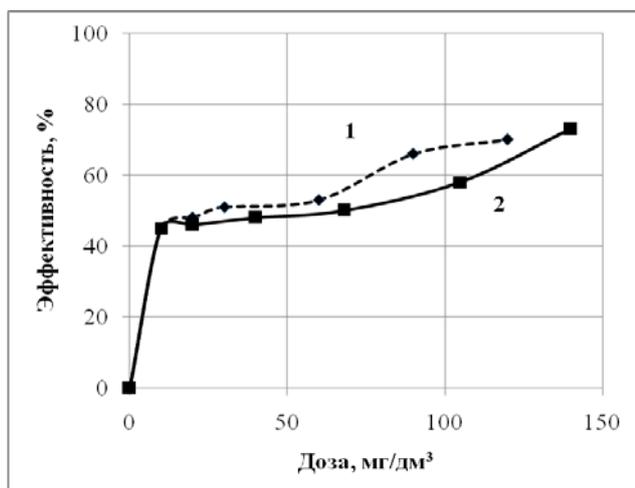


Рисунок 1 – Зависимость эффективности снижения цветности природной воды с помощью различных реагентов от дозы активного алюминия SO_4 в их составе при $\text{pH} = 6,2 \pm 0,2$. Используемые реагенты: 1 – ЗККФ; 2 – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Как видно из представленных зависимостей, эффективность очистки при использовании двух типов коагулянтов соизмерима. Преимуществом зольного коагулянта-флокулянта является то, что он является вторичным продуктом и его наиболее целесообразно использовать непосредственно на предприятиях целлюлозно-бумажной отрасли, где он и образуется, тем самым решая задачу замкнутого природопользования [2].

Кроме того, потребителями этого подготовленного продукта, как альтернатива традиционным реагентам, могут являться предприятия коммунального хозяйства, которые используют процессы физико-химической обработки воды различного происхождения.

Еще одним альтернативным направлением использования отходов в ЦБП является получение **водной вытяжки коросодержащей массы** хвойных и лиственных пород древесины на стадии окорки древесины. При взаимодействии воды с древесиной на стадии ее подготовки происходит разрушение слоя камбия, который содержит в своем составе необходимые вещества для формирования высших растений. Под влиянием пара, воды и механического воздействия в виде короотжимных аппаратов в раствор переходят

биологически активные вещества, такие как моно- и полисахариды, фрагменты лигнина, экстрактивные соединения [3], которые при их различном сочетании обладают свойствами к стимуляции роста растений.

Продукты водной экстракции коры использовались в качестве модели для оценки стимуляции роста различных растений, которые могут быть использованы при обработке земель при рекультивации отвалов, для подготовки сельскохозяйственных культур. В работе образцы семян обрабатывали водными растворами экстракции коры при различной кратности разбавления исходных модельных растворов.

На рисунке 2 представлены биометрические показатели кресс-салата в сравнении с реперным опытом (контроль).

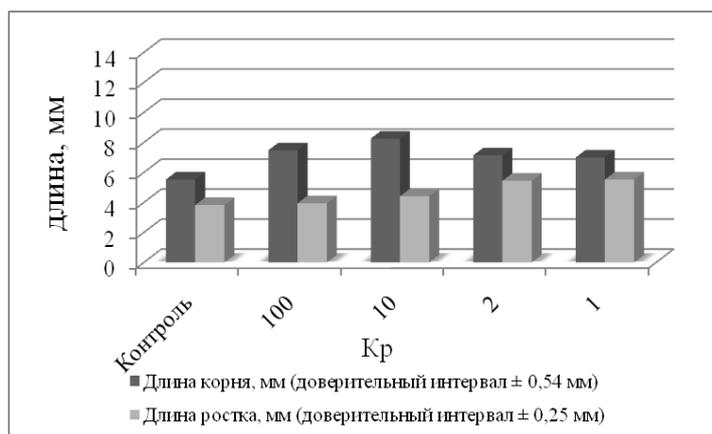


Рисунок 2 – Биометрические показатели кресс-салата в зависимости от кратности разбавления водной вытяжке при окорке хвойных пород

Сочетание органической составляющей композиции с минеральной добавкой, которая покрывает дефицит недостающих минеральных компонентов для синтеза биомассы растений, позволяет при соответствующем разбавлении использовать эту композицию в сельском хозяйстве в качестве стимулятора роста с более быстрым укоренением сельскохозяйственных, декоративных растений и культур лесного фонда [3].

Список литературы

1. Липский В. А. Перспективы развития лесопромышленного комплекса. Необходимость изменения вектора развития промышленности. Часть II // Бюллетень Ассоциации «ЛЕСТЕХ» №15, 2024 г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/161>. (дата обращения: 06.05.2006).
2. Патент РФ 2656305 С2. Способ получения низкоконцентрированного композиционного коагулянта-флокулянта на основе нефелинсодержащего сырья и золы /А. Б. Дягилева, А. И. Смирнова, Д. В. Дягилева; патентообладатель: А. Б. Дягилева. Заявлено 29.09.2016; опубл. 04.06.2018, Бюл. № 16. 8 с.
3. Дейнеко И. П., Дейнеко И. В., Белов Л. П. Исследование химического состава коры сосны // Химия растит. сырья. – 2007. – № 1. – С.19-24.
4. Патент РФ 2734634 С1. Способ получения стимуляторов роста из водной вытяжки коросодержащей массы / А. Б. Дягилева, А. И. Смирнова, Д. В. Дягилева, Михайлова С. Б.; патентообладатель: А. Б. Дягилева. Заявлено 17.06.2019; опубл. 21.10.2020, Бюл. № 30. 7 с.

COMPREHENSIVE STUDY OF POTENTIAL SECONDARY MATERIALS FOR SOLVING THE PROBLEMS OF THE TIMBER INDUSTRY IN THE CIRCULAR ECONOMY

A. I. Smirnova*, A. B. Diagileva, A. E. Prismakova, P. I. Lenivtsev, D. I. Mazurik
Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, St. Petersburg
**E-mail: smirnova_nasty87@mail.ru*

The abstract. Currently, there is an increasing interest in the implementation of the circular economy concept as a tool for greening production cycles with integrated, efficient and rational use of both primary and secondary resources. In this regard, the main task of the development of the timber industry complex is the development of symbiosis with scientific organizations that study by-products and search for their effective use in various related sectors of the economy. This contributes to an increase in the depth of processing and an increase in the degree of use of wood raw materials, which corresponds to the Development Strategy of the Russian forest complex until 2030. In the total volume of processed raw materials, most Russian logging and wood processing enterprises have 25-40% of waste or potential secondary raw materials. The forest sector most closely corresponds to the concept of a circular economy due to the availability of production and technological solutions that ensure an increase in the environmental efficiency of enterprises in the sector, as well as promote the development of small and medium-sized businesses around them interested in using potential secondary products based on a number of wastes. The report examines some areas of the use of secondary products in the housing and communal services, construction and agriculture.

Keywords: recycled materials, waste, pulp and paper industry, circular economy.

References

1. Lipskiy V.A. Perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa. Neobkhodimost' izmeneniya vektora razvitiya promyshlennosti. Chast' II [Byulleten' Assotsiatsii «LESTEK»], №15, 2024 g. Elektronnyy resurs. URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/161>. Data obrashcheniya 10.06.2024. (data obrashcheniya: 06.05.2006).
2. Patent RF 2656305 S2. Sposob polucheniya nizkokontsentririrovannogo kompozitsionnogo koagulyanta-flokulyanta na osnove nefelinsoderzhashchego syr'ya i zoly, A.B. Dyagileva, A.I. Smirnova, D.V. Dyagileva; patentoobladatel': A.B. Dyagileva. Zayavleno 29.09.2016; opubl. 04.06.2018, Byul. № 16. 8 s.
3. Deyneko I.P., Deyneko I.V., Belov L.P. Issledovanie khimicheskogo sostava kory sosny [Khimiya rastit. syr'ya], 2007. № 1. S. 19-24.
4. Patent RF 2734634 S1. Sposob polucheniya stimulyatorov rosta iz vodnoy vytyazhki korosoderzhashchey massy, A.B. Dyagileva, A.I. Smirnova, D.V. Dyagileva, Mikhaylova S.B.; patentoobladatel': A.B. Dyagileva. Zayavleno 17.06.2019; opubl. 21.10.2020, Byul. № 30. 7 s.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ГЛЮКОЗЫ ИЗ ОТРАБОТАННОГО РАСТВОРА ПОСЛЕ КИСЛОТНОГО ГИДРОЛИЗА СТЕБЛЕЙ ТОПИНАМБУРА

М. А. Селянкин*, М. М. Ромашева, Е. Ю. Демьянцева, Р. А. Смит
Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург
*E-mail: m.seliankin@gmail.com

Аннотация. При получении микрокристаллической целлюлозы при действии серной кислотой на стебли топинамбура в раствор выделяется значительное количество глюкозы, что будет негативно влиять на регенерацию кислоты. В настоящей работе рассмотрен способ очистки гидролизата от глюкозы с помощью адсорбции на угле. Показана низкая эффективность очистки.

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, глюкоза, серная кислота, адсорбция.

Основным этапом производства микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) является кислотный гидролиз целлюлозы, в результате которого происходит деструкция ее звеньев с резким снижением степени полимеризации и высокой степенью кристалличности [1]. Серная кислота выступает катализатором этого процесса, и после гидролиза ее концентрация в гидролизате практически не меняется. Это открывает возможности для повторного использования кислоты, что может снизить производственные затраты.

Перспективным сырьем для получения порошковых целлюлоз является вегетативная часть топинамбура, являющаяся отходом сельского хозяйства. Однако при обработке кислотой такого материала выделяется большое количество редуцирующих веществ, в частности глюкоза, которая может вызывать нежелательные побочные реакции и снижать качество регенерированной кислоты.

Возможным решением этой проблемы может стать адсорбция примесей из отработанной кислоты на носителях различной природы, в частности на угле и ионообменных смолах. Применение сорбентов представляет собой перспективный способ концентрирования редуцирующих веществ, что может быть актуальным при переработке и регенерации растворов производства порошковых полуфабрикатов.

Исследования проводили на стеблях топинамбура, собранных в июне 2023 года, в пригороде Санкт-Петербурга.

Вегетативная часть топинамбура состоит из листьев, сердцевин и коры – одревесневших клеток. Стебли были разделены на сегменты длиной 3-5 см, без удаления коры и сердцевин.

Делигнификация проводилась раствором бисульфита натрия при температуре 150 °С в стационарных условиях, а затем производили размол на лабораторном экструдере для получения целлюлозной массы.

Гидролитическую деструкцию целлюлозного материала осуществляли в растворе серной кислоты при температуре 95 °С в течение 2 часов [2]. У полученного порошкового материала определяли степень полимеризации, растворитель – кадоксен [3] и степень кристалличности [4, 5]. Анализ редуцирующих веществ в гидролизатах осуществляли согласно методики Макэна и Шоорля [3]. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики полученной порошковой целлюлозы

Характеристика	Результат
Выход	59 %
Степень полимеризации	520 – 560
Степень кристалличности	38,5 – 40,5

Содержание редуцирующих веществ в растворе составило 3-6 % от а.с.с. Сорбцию органических примесей, перешедших в кислоту после обработки стеблей топинамбура, проводили в статических условиях на техническом угле марки БАУ. Концентрация глюкозы в водных растворах до и после адсорбции на угле устанавливалась спектрофотометрическим методом. Предварительно была исследована адсорбция глюкозы из водных растворов на активированном угле. Для этого навеску сорбента 3 грамма заливали 100 см³ полученного раствора известных концентраций. Гетерогенное равновесие в системе сорбент – органический раствор устанавливалось в течение 24 ч в при T = 298 °K. При этом первые два часа фазы перемешивались каждые 15 мин.

Расчитанные величины адсорбций для каждого раствора глюкозы представляли собой средние значения трех-четырёх параллельных испытаний с точностью определения 10 % относительной погрешности. По полученным данным построили зависимость сорбции Г (ммоль/г) от концентрации раствора (моль/дм³) (рис.1).

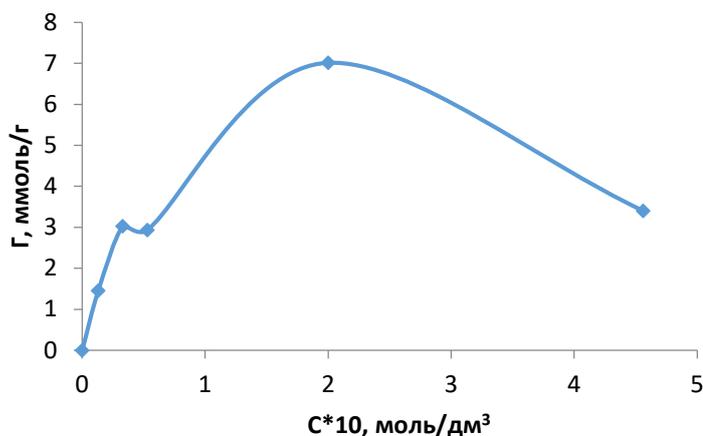


Рисунок 1 – Зависимость адсорбции от равновесной концентрации глюкозы в растворе

Как видно из рисунка, реализуется лангмюровский тип адсорбции. При этом адсорбция глюкозы незначительна, по-видимому, из-за слабых водородных связей нейтральной молекулы глюкозы с активными центрами угля, что приводит к частичной десорбции адсорбата в области более высоких концентраций. Сорбцию органических веществ из гидролизатов на адсорбенте проводили при перемешивании в течение 1 часа. Эффективность извлечения составила 60-70 %, при этом расход угля составил 30-50 г/л. Проведенные исследования показали, что извлечение органических примесей из растворов после кислотной деструкции целлюлозного сырья углем в статических условиях экономически нецелесообразно. Необходимо рассмотреть сорбцию на селективных сорбентах, а также альтернативные способы очистки отработанных растворов.

Список литературы

1. Аутлов С. А., Базарнова Н. Г., Кушнир Е. Ю. Микрокристаллическая целлюлоза: структура, свойства и области применения (обзор) // Химия растительного сырья. – 2013. – № 3. – С. 33-41. DOI: 10.14258/jcprn.1303033
2. Болтовский В. С. Способы получения микрокристаллической целлюлозы // Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2021. – № 1 (241). – С. 40-50.
3. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учебное пособие для вузов. – М.: Экология, 1991. – 320 с.

4. Чухчин Д. Г., Малков А. В., Тышкунова И. В., Майер Л. В., Новожилов Е. В. Способ дифрактометрического определения степени кристалличности веществ // Кристаллография. – 2016. – Т. 61, № 3. – С. 375-379.
5. Vydrina I., Malkov A., Vashukova K., Tyshkunova I., Mayer L., Faleva A., Shestakov S., Novozhilov E., Chukhchin D. A new method for determination of lignocellulose crystallinity from XRD data using NMR calibration // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2023. V. 6. Art. N. 100305. DOI: 10.1016/j.carpta.2023.100305.

EXTRACTION OF GLUCOSE FROM WASTE SOLUTION AFTER ACID HYDROLYSIS OF JERUSALEM ARTICHOKE STEMS

M. A. Selyankin*, M. M. Romasheva, E. Yu. Dem'yanceva, R. A. Smit

Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, St. Petersburg

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

The abstract. When obtaining microcrystalline cellulose by the action of sulfuric acid on Jerusalem artichoke stems, a significant amount of glucose is released into the solution. It will negatively affect the regeneration of the acid. This paper considers a method for purifying the hydrolyzate from glucose using carbon adsorption. Low efficiency of purification is shown.

Keywords: microcrystalline cellulose, glucose, sulfuric acid, adsorption.

References

1. Autlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir E.J. Microcrystalline cellulose. structure, properties and applications (review) *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2013, no. 3, pp. 33–41. DOI: 10.14258/jcprm.1303033
2. Boltovsky V.S. Methods for obtaining microcrystalline cellulose. *Proceedings of BSTU. Series 2, Chemical technologies, biotechnology, geoecology*. 2021. no 1 (241). pp. 40-50.
3. Obolenskaya A.V., Elnitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose: a textbook for universities*. Moscow: "Ecology". 1991. 320 p.
4. Chukhchin D. G., Malkov A. V., Tyshkunova I. V., Mayer L. V., Novozhilov E. V. Method of diffractometric determination of the degree of crystallinity of substances // *Crystallography*. 2016. Vol. 61. No. 3. Pp. 375-379
5. Vydrina I., Malkov A., Vashukova K., Tyshkunova I., Mayer L., Faleva A., Shestakov S., Novozhilov E., Chukhchin D. A new method for determination of lignocellulose crystallinity from XRD data using NMR calibration // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2023. V. 6. Art. N. 100305. DOI: 10.1016/j.carpta.2023.100305.

РАЗДЕЛ 3. УСЛОВИЯ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 662.638 + 662.636.3
ГРНТИ 44.09.35

СОЗДАНИЕ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ НА ОСНОВЕ РИСОВОЙ СОЛОМЫ И ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

Е. Ю. Ламбрианиди^{1*}, О. А. Ерохина¹, А. А. Пекарец², Э. Л. Аким¹

¹ Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

²ООО «Лесная технологическая компания», поселок Качуг, Иркутская область

*E-mail: ley04@mail.ru

Аннотация. Сжигание рисовых отходов после уборки урожая создает серьезную экологическую угрозу для Краснодарского края и других регионов, столкнувшихся с этой проблемой. В связи с этим актуальна возможность разработки технологии, которая позволит перерабатывать рисовую солому. Одним из таких направлений является ее переработка в топливные брикеты, которые являются экологически чистым биотопливом.

В данной работе впервые рассмотрена возможность получения брикетов из смешанного растительного сырья (рисовая солома + древесные опилки лиственницы) и изучены их физико-механические характеристики.

Ключевые слова: рисовая солома, древесные опилки лиственницы, переработка отходов, топливные брикеты.

Россия имеет колоссальное количество как древесных, так и растительных отходов. Они образуются на территории предприятий или за их пределами, и их разложение пагубно влияет на окружающую среду, выделяя токсичные, канцерогенные вещества. Обилие скопления отходов может приводить к возникновению пожаров, ведь в летнее время влажность отходов низкая [1]. Для решения этих проблем актуально рассмотреть создание топливных брикетов, которые обладают высокой теплотворной способностью, что позволяет использовать их как твердое топливо для каминов, печей, твердоотопливных котлов систем отопления, котельных, а также в металлургии.

На сегодняшний день получение биотоплива второго поколения (пеллеты, брикеты из растительного сырья) является одним из актуальных направлений; в то время как из древесных отходов (опилок) в мире производится порядка 50 миллионов тонн брикетов. Данных по использованию рисовой соломы для брикетов найти не удалось.

В данной работе впервые рассмотрена возможность получения брикетов из смешанного растительного сырья (рисовая солома/древесные опилки) применительно к технологии получения биотоплива третьего поколения.

Для исследования использовали образцы рисовой соломы Калининского района Краснодарского края и древесные опилки лиственницы Сибирской.

Размол рисовой соломы проводили на дисковой мельнице.

Для формирования брикетов в лабораторных условиях использовали рисовую солому фракции 0,5 мм и древесные опилки лиственницы разной фракции (табл. 1).

Таблица 1– Фракционный состав древесных опилок лиственницы

Фракционный состав, мм	Количество древесных опилок лиственницы, %
1-2	13
0,50	57
0,25 и \leq 0,25	30

Для получения брикетов использовали измельченное сырье следующего композиционного состава:

- 100 % рисовой соломы (100 % С);
- 67 % рисовой соломы + 33 % древесных опилок лиственницы (67 % С+33 % Д);
- 50 % рисовой соломы + 50 % древесных опилок лиственницы (50 % С+50 % Д);
- 33 % рисовой соломы + 67 % древесных опилок лиственницы (33 % С+67 % Д);
- 100 % древесных опилок лиственницы (100 % Д).

Масса образца для формирования брикета составляла $m = 2 \pm 0,05$ г.

В данной работе прессование в лабораторных условиях было максимально приближено к одной из самых перспективных инновационных технологий создания брикетов, разработанной Пекарцом А.А., и применяемой в его компании «Лесная технологическая компания» [4], а также у ряда других производителей.

Одним из этапов формирования брикетов по технологии Пекарца А.А. является обработка горячим паром. Для этого использовали увлажнитель. Определение влагосодержания образцов осуществляли на влагомере МХ-50 Moisture Analyzer (0,01 % Moisture Content). В результате проведенных исследований по формированию брикетов из рисовой соломы [2] было установлено, что оптимальная влажность измельченного сырья составляет 18 %. Для этого обработку паром образцов проводили в течение времени 60 с.

Процесс сжатия осуществляли с помощью пресс-формы на универсальной испытательной установке «Инстрон-1121» в режиме одноосного сжатия при скорости деформирования $V = 500$ мм/мин до нагрузки $P = 4500$ Н при температуре $T = 84 \pm 2$ °С. После нагружения до $P = 4500$ Н образец выдерживали при данной нагрузке до полного эластического восстановления формы образца.

На рисунке 1 представлен режим нагружения при нагрузке $P = 4500$ Н с последующим эластическим восстановлением формы образца [3].

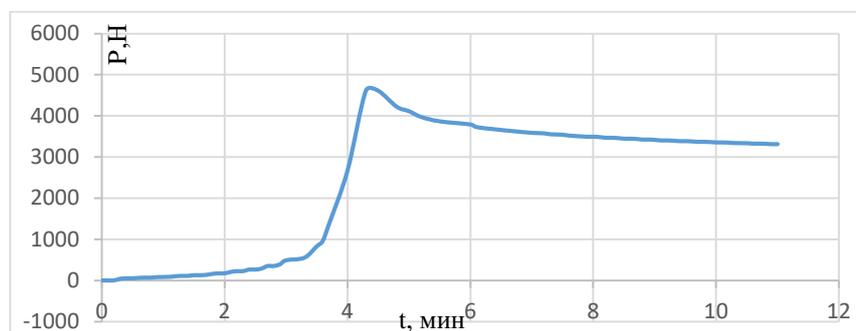


Рисунок 1 – Режим нагружения

Для осуществления процесса прессования образцов соломы и древесных опилок использовали пресс-форму, представленную на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пресс-форма

Пресс-форма из стали состоит из пуансона и формы. В пресс-форму засыпали навеску образца массой $2 \pm 0,05$ грамма, устанавливали пуансон и осуществляли процесс прессования. Чтобы опилки не высыпались, пресс-форму устанавливали на сетку.

На рисунке 3 представлены образцы брикетов различной композиции, полученные путем прессования (нагрузка $P = 4500$ Н, скорость $V = 500$ мм/мин, температура $T = 84$ °С и влажности $W = 18$ %).

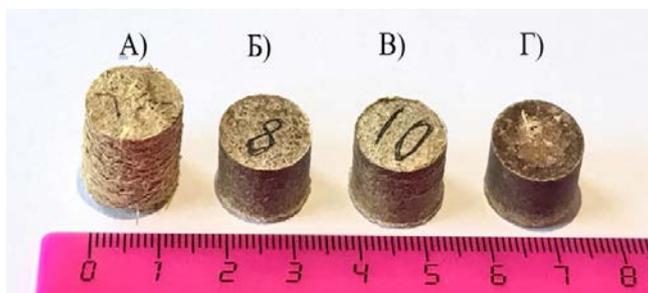


Рисунок 3 – Фото брикетов:

А) 100 % С; Б) 33 % С+67 % Д; В) 50 % С + 50 % Д; Г) 100 % Д

Из рисунка 3 видно, что композиционный состав влияет на цвет и форму брикета. Образец из 100 % соломы (А) имеет желтый цвет. Увеличение содержания древесных опилок в композиции брикета приводит к изменению колера в темно-коричневый за счет содержания в них лигнина и экстрактивных веществ.

После прессования брикетов измеряли их плотность и максимальное усилие при разрушении образца. Максимальное усилие при разрушении определяли при сжатии в поперечном направлении при скорости деформирования $V = 10$ мм/мин на универсальной испытательной установке «Инстрон-1121».

Результаты измерения плотности и прочности в поперечном направлении образцов брикетов разного композиционного состава приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Плотность и максимальное усилие при разрушении в поперечном направлении образцов брикетов разного композиционного состава

Композиционный состав, %	Плотность, г/см ³	Максимальное усилие при разрушении, Н
100 % С	1,00	200
67 % С + 33 % Д	1,13	275
50 % С+ 50 % Д	1,14	400
33 % С + 67 % Д	1,20	590
100 % Д	1,30	500

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что с увеличением количества древесных опилок в композиции плотность брикета увеличивается. Максимальной плотностью 1,3 г/см³ обладают образцы композиции из 100 % древесных опилок лиственницы.

Диаграммы сжатия до разрушения образцов брикетов разного композиционного состава в поперечном направлении измеряли на универсальной испытательной установке «Инстрон-1121» при скорости деформирования $V = 10$ мм/мин. На рисунке 4 представлены диаграммы сжатия до разрушения (в поперечном направлении) образцов брикетов разного композиционного состава.

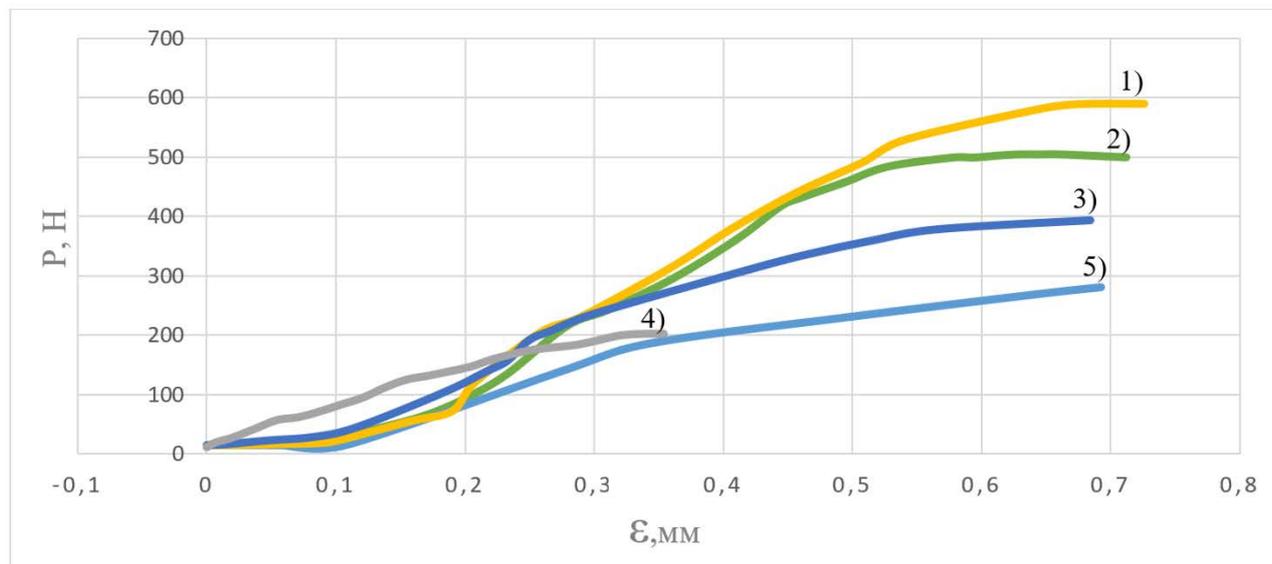


Рисунок 4 – Диаграмма сжатия до разрушения: 1) 33 % С+ 67 % Д; 2) 100 % Д; 3) 50 % С+ 50 % Д; 4) 100 % С; 5) 67 % С + 33 % Д

Диаграмма сжатия для брикетов композиций с древесными опилками лиственницы представляет собой кривую, которая состоит из трех областей: в первой происходит деформирование брикета, главным образом, за счет развития упругих деформаций, во второй – наблюдается интенсивный рост нагрузки при увеличении площади соприкосновения между фракциями и развития упруго-эластических и высокоэластических деформаций, в третьей – происходит некоторое снижение роста нагрузки при увеличении деформации, что говорит о скрытом внутреннем разрушении образца, сопровождающимся накоплением вынужденно-эластических и пластических деформаций. Для образцов из 100 % соломы (кривая 4) изменяется форма кривой, она сглаживается – первый участок плавно переходит в третий, что, вероятно, объясняется высокой жесткостью самой соломы и ее специфическими свойствами.

Из рисунка 4 и таблицы 2 видно, что композиционный состав матрицы влияет на прочностные свойства готового брикета. Наибольшей прочностью обладают образцы композиции 33 % соломы + 67 % древесных опилок, что подтверждает правило смеси для формирования композиционных материалов [4]. Из полученных данных следует, что солома выполняет функцию армирующего элемента.

Одной из эксплуатационных характеристик топливных брикетов является их зольность. Показатель зольности определяли согласно ГОСТу 56888-2016 [5]. Результаты измерения зольности образцов различного композиционного состава представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Зольность образцов брикетов различного композиционного состава

Композиционный состав, %	Зольность, %
100 % С	11
67 % С + 33 % Д	9
50 % С + 50 % Д	6
33 % С + 67 % Д	5
100 % Д	2

Из данных, представленных в таблице 3, видно, что введение в композицию брикета 50 % древесных опилок позволяет снизить зольность примерно в 2,3 раза.

Выводы:

1. Установлено, что использование в композиции брикетов древесных опилок лиственницы приводит к формированию образцов с более высокой плотностью.
2. Наибольшей плотностью и прочностью обладают образцы композиции 33 % рисовой соломы + 67 % древесных опилок.
3. Введение в композицию брикета 50 % древесных опилок лиственницы позволяет снизить зольность примерно в 2,3 раза.

Список литературы

1. Шуклина А. П., Шуклина В. П., Ермоленко Б. В. Эколого-экономическое обоснование энергетического использования растительных и древесных отходов на территории Российской Федерации // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – № 5 (215). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskoe-obosnovanie-energeticheskogo-ispolzovaniya-rastitelnyh-i-drevesnyh-othodov-na-territorii-rossiyskoy> (дата обращения: 27.06.2024).
2. Патент РФ 2653513. Высококалорийные топливные брикеты из композиционного материала на основе древесных отходов (варианты): / А.А. Пекарец; Заявлено 11.07.2017; опубл. 10.05.2018.
3. Ламбрианиди Е. Ю., Ерохина О. А., Пекарец А. А., Аким Э. Л. Исследование физико-механических свойств топливных брикетов из рисовой соломы // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14-16 сентября 2023 г. / Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ), 2023 – С. 322-327.
4. Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. – М.: Химия, 1979. – 440 с.
5. ГОСТ Р 56888-2016 Топливо древесное. Определение зольности стандартным методом, 8с.

CREATION OF FUEL BRIQUETTES BASED ON RICE STRAW AND SAWDUST

E. Yu. Lambrianidi^{1*}, O. A. Erokhina¹, A. A. Pekarets², E. L. Akim¹

¹ Higher School of Technology and Energy SPbGUPTD, St. Petersburg

² OOO "Forest Technology Company", Kachug village, Irkutsk region.

*E-mail: ley04@mail.ru

The abstract. The burning of rice waste after harvesting poses a serious environmental threat to the Krasnodar Territory and other regions facing this problem. In this regard, the possibility of developing a technology that will allow processing rice straw is relevant. One of these areas is its

processing into fuel briquettes, which are environmentally friendly biofuels. In this paper, the possibility of obtaining briquettes from mixed vegetable raw materials (rice straw + larch sawdust) is considered for the first time and their physical and mechanical characteristics are studied.

Keywords: rice straw, sawdust, waste recycling, fuel briquettes.

References

1. Shuklina Anastasia Petrovna, Shuklina Valeria Petrovna, Ermolenko Boris Viktorovich Ecological and economic justification of the energy use of plant and wood waste in the territory of the Russian Federation [Successes in chemistry and chemical technology], 2019, №5 pp. 215 (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskoe-obosnovanie-energeticheskogo-ispolzovaniya-rastitelnyh-i-drevesnyh-othodov-na-territorii-rossiyskoy> (accessed: 06/27/2024).
2. Pekarets A.A. High-calorie fuel briquettes made of composite material based on wood waste (options): Patent of the Russian Federation for. 2653513, 2018. (In Russian). Patent of the Russian Federation.
3. Lambrianidi E.Yu., Erokhina O.A., Pekarets A.A., Akim E.L. Investigation of the physico-mechanical properties of fuel briquettes from rice straw [Problems of mechanics of pulp and paper materials: materials of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V.I. Komarov Arkhangelsk, September 14-16, 2023] "Northern (Arctic) Federal M.V. Lomonosov University (SAFU)", 2023 – pp. 322-327. (In Russian).
4. Manson J., Sperling L. Polymer mixtures and composites. – M.: Chemistry, 1979. – 440 p.
5. GOST R 56888-2016 Wood fuel. Determination of ash content by standard method, 8c.

РАЗДЕЛ 4. ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

УДК 331.41, 65.015.3

ГРНТИ 28.23.25, 28.25.15

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА РАБОТОЙ ОПЕРАТОРА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВИДЕОФИКСАЦИИ

В. И. Рожков *, Е. Д. Патракова

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

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

Аннотация. В процессе эксплуатации АСУ ТП различного назначения встает вопрос о качестве работы диспетчера (оператора) при работе с пультом управления (компьютером, использующим SCADA-программу для контроля за протеканием ТП), о правильности выполнения им задач, отсутствии ошибочных действий, о своевременности и безошибочности выполнения операций. Как правило, деятельность диспетчеров регламентирована инструкциями и руководствами по управлению теми или иными системами. Кроме знаний, которыми обладают диспетчера, немаловажным фактором безошибочной работы являются уровни их навыков и умений. Навыки формируются в процессе тренировок на учебно-тренировочной технике (УТТ) или с использованием компьютерных обучающих систем. Создание УТТ подразумевает изготовление имитаторов реального оборудования, снабженного вспомогательными системами, с помощью которых инструктор может имитировать различные нештатные ситуации на пульте управления тренажера, тем самым обучая и оттачивая действия диспетчера по этим ситуациям.

В последние годы началось внедрение новых технологий по контролю за действиями диспетчеров, основанное на применении таких устройств, как системы видеофиксации. Анализ литературы показал, что основным методом использования систем видеофиксации является контроль за нахождением человека на рабочем месте, контроль за правильностью выполнения работниками действий по обслуживанию устройств и механизмов. Причем проверка записей осуществляется после выполнения работниками своих задач, т. е. непосредственно при самом выполнении никакого контроля за правильностью выполнения действий не осуществляется.

Ключевые слова: диспетчер, пульт управления, видеофиксация, безошибочность действий, компьютерное зрение.

В настоящее время практически во всех отраслях промышленности сложилась ситуация, связанная с недостаточным количеством профессионально подготовленных специалистов. Процесс становления специалиста после окончания вуза занимает достаточно большой период. При подготовке специалиста к выполнению обязанностей диспетчера встает вопрос, как проводить тренировки на действующем оборудовании. Как правило, старший смены проводит занятия, на которых рассказывает о правилах управления технологическим процессом, особенностях работы оборудования, нештатных ситуациях, но практически выполнять какие-либо действия на работающем оборудовании в качестве тренировок строжайше запрещено.

Решением такой задачи, по мнению авторов идеи, является создание программы контроля за деятельностью оператора на действующем пульте управления с использованием систем видеофиксации и методов машинного обучения. Применение данных методов позволит контролировать действия оператора при работе на пульте управления, сопоставляя его действия с рабочим алгоритмом, составленным на основании фиксации временных характеристик обученных операторов. Алгоритм действий (АД) составляется на основе руководств по эксплуатации оборудования с использованием обобщенного структурного метода функциональной структурной теории [1].

Актуальность проекта – применение системы видеофиксации, машинного обучения и алгоритмов анализа данных позволит существенно улучшить контроль за работой операторов, их практическую подготовку, сократить количество ошибочных действий операторов, ускорит процесс подготовки оператора для самостоятельного исполнения своих функций.



Рисунок 1 – Внешний вид стенда

Для проведения натурального эксперимента было выбрано оборудование и программное обеспечение (ПО): лабораторный стенд кафедры (рис. 1), камеры видеофиксации с микрофонами – 3 к-та, программное обеспечение для работы со стендом, системы компьютерного зрения и анализа данных.

В процессе работы оператора на стенде программа должна контролировать перемещение его зрачков по информационной панели пульта управления с фиксацией взгляда на средствах отображения информации и органах управления, соотносить действия, команды и перемещение взгляда оператора с рабочим алгоритмом и автоматически отслеживать появление ошибок, давать подсказки в случае неверных действий оператора. По мере набора количества ошибок программа должна оценить действия оператора. В зависимости от уровня оценки оператору должны даваться рекомендации по исправлению ошибочных действий.

В программе должны быть реализованы следующие возможности: аутентификация обучаемого, режимы тренировок с разными уровнями в зависимости от режимов эксплуатации

систем, архивирование действий оператора, а также накопление трендов для отслеживания и улучшения уровня его обученности.

Таким образом, на первом этапе была сформулирована цель проекта – создание программы контроля за деятельностью оператора на рабочем месте с применением методов компьютерного зрения и машинного обучения, а также алгоритмов обработки и анализа данных, направленной на повышение качества обучения и уровня подготовки операторов.

С этой целью на кафедре для проведения эксперимента была подобрана лабораторная установка и выбрано практическое занятие, в полной мере отражающее все аспекты, подлежащие исследованию, произведен контрольный замер временных характеристик всего алгоритма деятельности обучаемых, разработан алгоритм с использованием типовых функциональных единиц (ТФЕ) обобщенного структурного метода, проведен расчет количественных характеристик вероятности своевременного и безошибочного выполнения оператором всего алгоритма, получены временные характеристики Тобщ.(сек) и дисперсия времени выполнения алгоритма Добщ.(сек²).

Задачами проекта явились разработка плана проведения эксперимента, алгоритмов и программного обеспечения, позволяющих оценивать действия оператора в реальном масштабе времени. На основании плана эксперимента были намечены этапы и выполнены следующие шаги, включающие в себя следующие мероприятия:

Составление алгоритма действий операторов при выполнении практического задания (ПЗ) на стенде кафедры.

Перед началом эксперимента на основании изучения информационной панели управления, средств отображения информации и органов управления стенда, с использованием принципов и правил функциональной структурной теории был составлен полный алгоритм деятельности 3-х операторов, участвующих в проведении эксперимента по выполнению ПЗ.

В целом разработанный алгоритм состоял из 134 ТФЕ, приходящихся на 3-х участников эксперимента, из них 83 ТФЕ приходились на долю участника, непосредственно выполняющего действия на стенде.

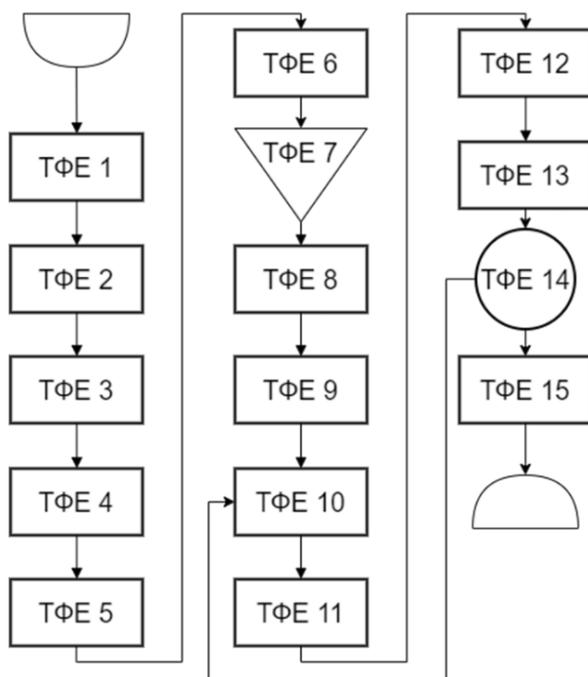


Рисунок 2 – Укрупненный алгоритм действий испытуемого при выполнении ПЗ на стенде в обозначениях обобщенного структурного метода оценки качества деятельности человека

Рукописный вариант алгоритма использовался четвертым участником эксперимента, ответственным за фиксацию времени по каждой ТФЕ по командам руководителя.

Информационное и моторное поля станда были разбиты на девять укрупненных секторов, внутри которых находились средства отображения информации, органы управления, с которыми непосредственно взаимодействовал испытуемый в процессе выполнения ПЗ (рис. 3). Это было сделано с целью облегчения контроля за перемещением взгляда оператора контрольной камерой видеофиксации в процессе выполнения им своих действий.



Рисунок 3 – Разбиение информационного поля станда на сектора

1. Проведение натурального эксперимента, включающего в себя выполнение ПЗ на станде кафедры, состояло из 18-ти опытов по его выполнению силами испытуемых.

В состав группы испытуемых входило 4 человека, выполняющих определенные действия в соответствии с ПЗ, как на самом станде, так и на компьютере, подключенном к станду. Первый испытуемый выполнял действия по контролю и выполнению заданий на станде, второй испытуемый производил контроль за работой системы автоматике станда и отслеживал изменения в работе автоматике по показаниям графиков в программе компьютера, третий – руководитель эксперимента – подавал команды на выполнение действий в соответствии с инструкцией по проведению ПЗ, четвертый участник эксперимента вел контроль времени выполнения как всего алгоритма, так и отдельных его элементов – ТФЕ.

Все действия испытуемых записывались для последующей обработки с использованием программы машинного обучения. Видеокамера (ВК) станда была установлена непосредственно по центру станда, фиксируя лицо испытуемого. Вторая ВК установлена сбоку-сзади оператора с целью фиксации действий оператора с клапанами станда, расположенными в нижней части станда.

2. Проведение замеров времени и фиксация действий операторов на станде.

Контролер, отвечающий за замеры временных интервалов по каждой ТФЕ, в представленном в письменном виде алгоритме действий операторов отмечал время по каждой команде и действию операторов. Результатом замеров временных характеристик явились таблица с указанием времени выполнения каждого ТФЕ и, как результат – общее время $M(T)$ выполнения АД, составивший величину $M(T)_{\text{общ}} = 978.14$ сек. По результатам фиксации времени выполнения каждой ТФЕ была рассчитана дисперсия времени выполнения АД $D(T)$ (сек²), составившая величину $D(T)_{\text{общ}} = 829.93$ сек².

График временных характеристик по выполняемому АД представлен на рисунке 4.

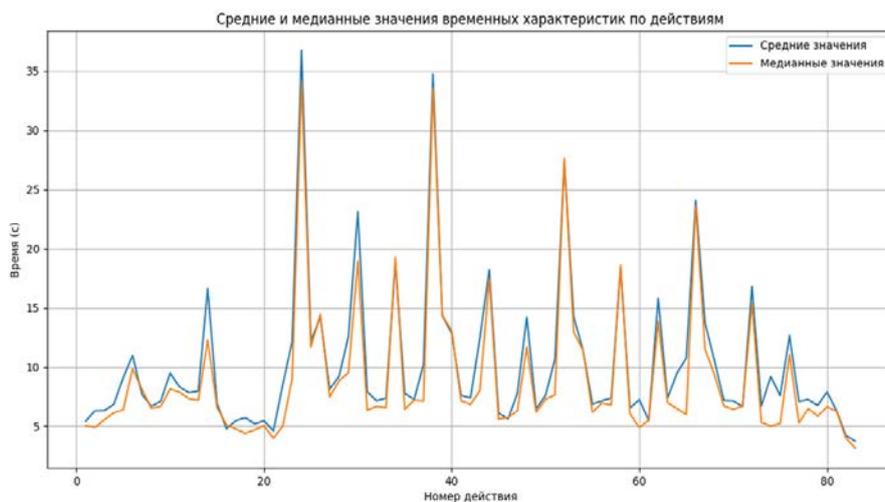


Рисунок 4 – График временных характеристик по выполняемому АД

Данный график позволяет определить те операции, которые требуют наибольшего времени на их выполнение и, кроме того, наглядно показывают, на какие операции АД следует обратить внимание при проведении тренировок с целью сокращения времени выполнения задания.

3. Применение программы компьютерного зрения для определения положения зрачков глаз оператора при выполнении практического задания.

Выполнение данного этапа проводилось с целью определения правильности выполнения оператором действий по управлению ОУ стенда (открытие-закрытие кранов, включение-отключение насоса, другие ручные операции), так и по контролю за правильностью обращения оператора к тем средствам отображения информации, которые в данный конкретный момент времени должны находиться под его контролем.

Для этого была использована программа, отслеживающая ключевые точки лица оператора, контролирующая его мимические элементы и движение зрачков в отношении информационного поля стенда. В результате работы программы была получена тепловая карта взгляда оператора в конкретный момент времени, который положен в основу разработки программы контроля (рис. 5).

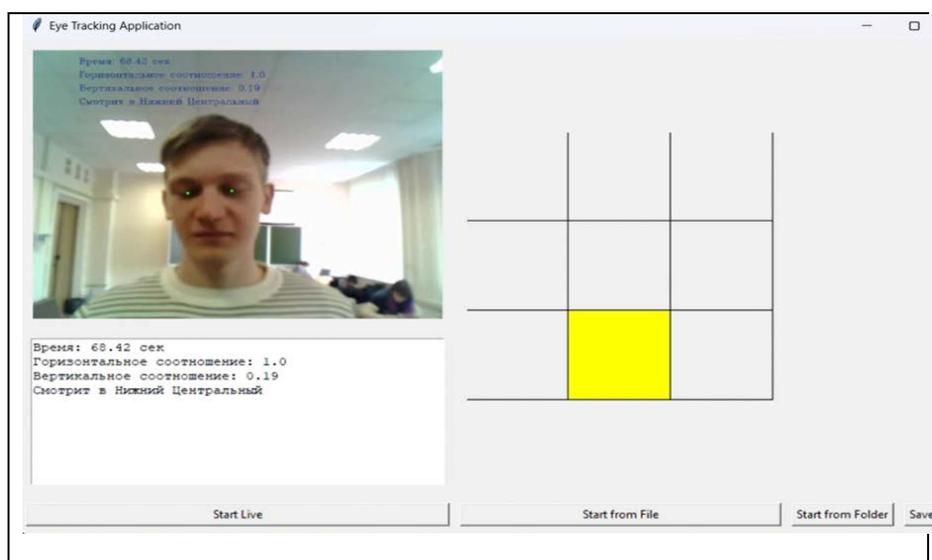


Рисунок 5 – Фрагмент регистрации взгляда оператора и его отображение в программе

Для разработки программного обеспечения, предназначенного для контроля за работой оператора на рабочем месте с использованием системы видеофиксации, было критически важно выбрать подходящий язык программирования. Этот выбор должен основываться на таких критериях, как простота использования, наличие библиотек для обработки видео, производительность, а также поддержка сообщества и возможность интеграции с другими инструментами. Был проведен сравнительный анализ трех языков программирования: Python, R и C++, с целью обоснования выбора наиболее подходящего инструмента для реализации данной задачи.

Язык Python является одним из самых популярных и универсальных языков программирования, особенно в области анализа данных и машинного обучения. Основные преимущества Python включают его лаконичный и понятный синтаксис, что облегчает процесс разработки и уменьшает вероятность возникновения ошибок. Этот аспект особенно важен в контексте сложных проектов, требующих большого объема кода [2].

Язык Python выделяется своим обширным набором библиотек и инструментов, среди которых OpenCV для обработки видео, Pandas и NumPy для анализа данных, а также TensorFlow и scikit-learn, используемые для разработки моделей машинного и глубокого обучения. Это обеспечивает разработчикам удобство и мощные возможности при реализации проектов. Благодаря активному и вовлеченному сообществу, пользователи Python могут рассчитывать на быструю помощь, регулярные обновления инструментария и доступ к обширной базе знаний и готовым решениям [3]. Кроме того, благодаря поддержке основных операционных систем, в т.ч. Windows, macOS и Linux, Python идеально подходит для создания приложений, работающих на разных платформах, что значительно упрощает разработку и расширяет возможности применения этого языка программирования [4].

Язык Python отличается способностью гармонично сочетаться с кодом, созданным на других языках программирования, например, C++. Это синтезирует удобство использования языка Python с высокой производительностью C++, создавая эффективные решения для разработчиков. Именно язык Python был выбран для дальнейшей разработки нужной программы.

В результате проведенной работы получен научно-практический результат в виде программного продукта, позволяющего анализировать перемещение зрачков оператора в процессе выполнения им конкретной задачи с привязкой по времени к алгоритму деятельности, построенного с применением функциональной структурной теории, позволяющий фиксировать его ошибки при поиске средств отображения информации (СОИ) на стенде в соответствии с командами руководителя и ошибки в выполнении действий с органами управления (ОУ) стенда.

Научно-практическая работа выполнена на кафедре Автоматизации технологических процессов и производств в рамках выполнения выпускной квалификационной работы студента кафедры.

Выводы:

1. В результате проведенной научно-исследовательской работы были получены следующие результаты:
 - а) построены алгоритмы деятельности человека-оператора при выполнении им ПЗ на лабораторном стенде;
 - б) определен подход по контролю за действиями человека с использованием видеофиксации зрачков глаз человека по их перемещению по информационному полю стенда;
 - в) в результате проведенных экспериментов с группой испытуемых определены временные характеристики каждого ТФЕ для последующего расчета количественных характеристик выполнения АД;
 - г) определена возможность применения машинного обучения для построения программы для контроля за работой оператора на рабочем месте.

2. В дальнейшем планируется использование данного подхода для создания комплексной системы контроля за деятельностью операторов АСУ ТП различного назначения.

Список литературы

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Ашеров и др.; под общ. ред. А. И. Губинского и В. Г. Евграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.
2. Ван Россум, Г. The Python Language Reference Manual / Г. Ван Россум. – Network Theory Ltd., 2003, 148 с.
3. OpenCV Documentation. OpenCV-Python Tutorials. – URL: <https://docs.opencv.org/> (дата обращения: 13.04.2024).
4. Гринченко, Т. В. Python для начинающих: программирование на языке высокого уровня / Т. В. Гринченко. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 214 с.

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR MONITORING THE OPERATOR'S WORK AT THE WORKPLACE USING A VIDEO RECORDING SYSTEM

V. I. Rozhkov*, E. D. Patrakova

Higher School of Technology and Energy of SpbGUITD, St.-Petersburg

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

The abstract. During the operation of automated process control systems for various purposes, the question arises about the quality of the dispatcher's (operator's) work when working with the control panel, about the correctness of his tasks, the absence of erroneous actions, about the timeliness and accuracy of the operations.

Keywords: dispatcher, control panel, video recording, error-free actions, computer vision.

References

1. Information and control human-machine systems: research, design, testing: handbook/ A. N. Adamenko, A. T. Asherov and others; under general. red. A. I. Gubinsky and V. G. Evgrafov. / Moscow: Mashinostroenie, 1993. – 528 p.
2. Van Rossum, G. The Python Language Reference Manual. – Network Theory Ltd., 2003, 148 p.
3. OpenCV Documentation. OpenCV-Python Tutorials. – URL: <https://docs.opencv.org/>. (accessed: 13/04/2024).
4. Grinchenko, T. V. Python for beginners: programming in a high-level language. – Moscow: Urait, 2023, 214 p.

РАЗДЕЛ 5. ЦИФРОВИЗАЦИЯ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 004.94
ГРНТИ 28.17.33

ЗАДАЧИ И МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНИНГА ОПЕРАТОРОВ ЦБП

Н. С. Благодарный^{1*}, М. В. Кривов², В. В. Борко¹

¹ Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, Санкт-Петербург

² Ангарский государственный технический университет, Ангарск

*E-mail: kaf_electro@mail.ru

Аннотация. В докладе описываются цель, задачи и методики обучения оперативного персонала ЦБП и других промышленных предприятий на компьютерных тренажерных комплексах, как наиболее эффективных технических средствах обучения. Опыт внедрения компьютерных тренажеров на различных производствах свидетельствует о формировании у оперативного персонала базовых практических навыков безопасной эксплуатации оборудования технологических установок в режимах нормальной эксплуатации, пуска и останова, а также аварийных режимах.

Ключевые слова: тренажер, компьютерный тренажерный комплекс, промышленная безопасность, оперативный персонал, методики обучения, оценка действий операторов.

Обучение оперативного персонала безопасному управлению технологическими процессами на производствах целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) является одной из важнейших задач. Несоблюдение требований промышленной безопасности на производстве может привести к множеству негативных последствий, а именно:

- травмы или увечья, потеря трудоспособности, психологические проблемы (стресс, тревога, депрессия) – для промышленного персонала;
- финансовые и репутационные потери (простои, ремонты, штрафы и санкции, потеря доверия клиентов и др.) – для работодателей;
- чрезвычайные ситуации (аварии, пожары, взрывы, выбросы опасных веществ), выбросы вредных веществ, разрушение зданий и оборудования – для общества.

Наиболее частым фактором нештатных ситуаций и аварийности на производстве является человеческий фактор, включающий: недостаточную квалификацию и некомпетентность персонала (плохая обученность и неосведомленность работников производства, отсутствие необходимых знаний, навыков и опыта), небрежность и невнимательность, усталость и снижение концентрации, отсутствие дисциплины, недостаточную информативность о работе оборудования и правил поведения при авариях и в чрезвычайных ситуациях, страх перед ответственностью, недостаточный контроль и редкие проверки компетентности работников. Ошибки персонала часто приводят к инцидентам на производстве, травматизму, авариям, связанным с возможным ущербом для людей и поломкой оборудования.

Производства ЦБП крайне заинтересованы в обучении персонала, поэтому в сети Интернет легко найти множество курсов и программ обучения как промышленной безопасности, так и профессионального обучения оперативного персонала ЦБП, проводимых различными частными и государственными учебными заведениями. Курсы призваны обеспечить подготовку по разным специальностям ЦБП и деревообработки, таким как: контролер ЦБП, оператор размольного оборудования ЦБП, аппаратчик по выщелачиванию фибры, аппаратчик скипидарной установки, варщик целлюлозы, выпарщик щелоков, машинист бумагоделательной (картоноделательной) машины, машинист отжимной машины, оператор производства древесной массы из щепы, оператор сушильных установок и многим

другим специальностям. Все специальности связаны с работой на современном сложном оборудовании и требуют от операторов умений и навыков четкой, безаварийной работы.

В обучении персонала чрезвычайно заинтересованы все предприятия отрасли. Многие из них, например: Окуловская БФ, «Готэк-Центр», «Кама», «Архбум тисью групп», «Карелия Палп», Сегежский ЦБК, Полотняно-Заводская бумажная мануфактура, Группа «Илим», «Волга», Светогорский ЦБК, Сухонский КБК, Троицкая БФ, Управляющая компания ОБФ, БКФ, «Картонтата», «Норд-Пак» и другие, проводят на местах семинары и тренинги, а также участвуют в выездных обучающих семинарах и форумах, проводимых в том числе Высшей школой технологии и энергетики (ВШТЭ) при Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна. Эти мероприятия призваны обеспечить высокий уровень производительности труда, профессиональной безопасности, безаварийности, надежности и эффективности оперативной деятельности.

Важной составляющей обучения оперативного персонала являются тренинги, проводимые на производстве. Тренинги проводятся по заранее разработанным сценариям на рабочих местах персонала и промплощадке в «полевых» условиях, с отработкой навыков оперативных действий согласно планам мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах (ПМО). Такие тренинги проводят, как правило, либо с условными действиями (их имитацией), когда участник обозначил, но не совершил действие (нажатие на кнопку, запуск или остановку оборудования, открытие или закрытие запорно-регулирующей арматуры, переговоры по рации, тушение пожара и т. д.), либо с реально выполняемыми действиями. Последние тренировки оказываются весьма ограничены в разнообразии, т. к. реально выполняемые действия с работающим оборудованием могут повлечь к выходу ТП из нормального режима работы.

Очевидно, что эффективное обучение оперативного персонала может быть достигнуто с использованием технических средств обучения. Известно, что одним из лучших технических средств обучения являются компьютерные тренажеры, позволяющие операторам во время тренингов полностью погрузиться в рабочую атмосферу или воссоздать условия, близко напоминающие реальную аварийную ситуацию. Важным достоинством компьютерного тренинга является не только возможность воспроизведения в реальном масштабе времени последствий развития практически любых аварийных ситуаций, но и возможность объективной оценки действий операторов.

В ВШТЭ коллектив ученых занимается разработкой и внедрением «под ключ» компьютерных тренажерных комплексов (КТК) для предприятий энергетики, нефтехимии и ЦБП. Благодаря внедренным КТК на более чем 20 различных технологических установках, авторы накопили уникальные знания и опыт в этой сфере и в настоящей статье хотели бы обсудить задачи компьютерного тренинга операторов ЦБП. Российские предприятия ЦБП имеют достаточно высокий уровень автоматизации, многие из них оснащены современными автоматизированными системами управления (АСУ), обеспечивающими повышение производительности установок, снижение расхода энергоресурсов и химических веществ, что способствует экологической безопасности продукции и улучшению ее качества. Сложный уровень автоматизации производства требует особого внимания к обученности персонала правильному и безопасному ведению ТП.

На наш взгляд, КТК можно определить следующим образом. *Компьютерный тренажерный комплекс* – программно-аппаратный комплекс профессиональной подготовки операторов ТП, предназначенный для формирования у них компетенций, профессиональных навыков и умений принятия и выполнения решений по безопасному управлению (обслуживанию) ТП, реализующий всережимную имитационную динамическую модель ТП с эмуляцией реальной системы управления и операторского интерфейса, и служащий для проведения тренинга по управлению ТП с контролем деятельности операторов и последующим анализом результатов тренинга.

Функционально КТК состоит из: динамической точной модели ТП, модели реальной АСУ ТП, имитатора рабочего места оператора с мнемосхемами технологического процесса и

органами управления, имитатора полевого оборудования и КИП, реализованных в виде технологических схем, фотопанорам или трехмерных экранных форм дополненной реальности с изображением интерактивной ручной запорной арматуры и органов управления по месту, а также набора готовых сценариев и упражнений для обучения и контроля профессиональных навыков оператора.

КТК представляет собой комплекс программных и аппаратных средств, работающих по технологии «клиент-сервер». В состав аппаратной структуры КТК (рис. 1) входят:

- рабочая станция инструктора (совмещена с сервером моделирования);
- локальная вычислительная сеть;
- несколько рабочих станций оператора.

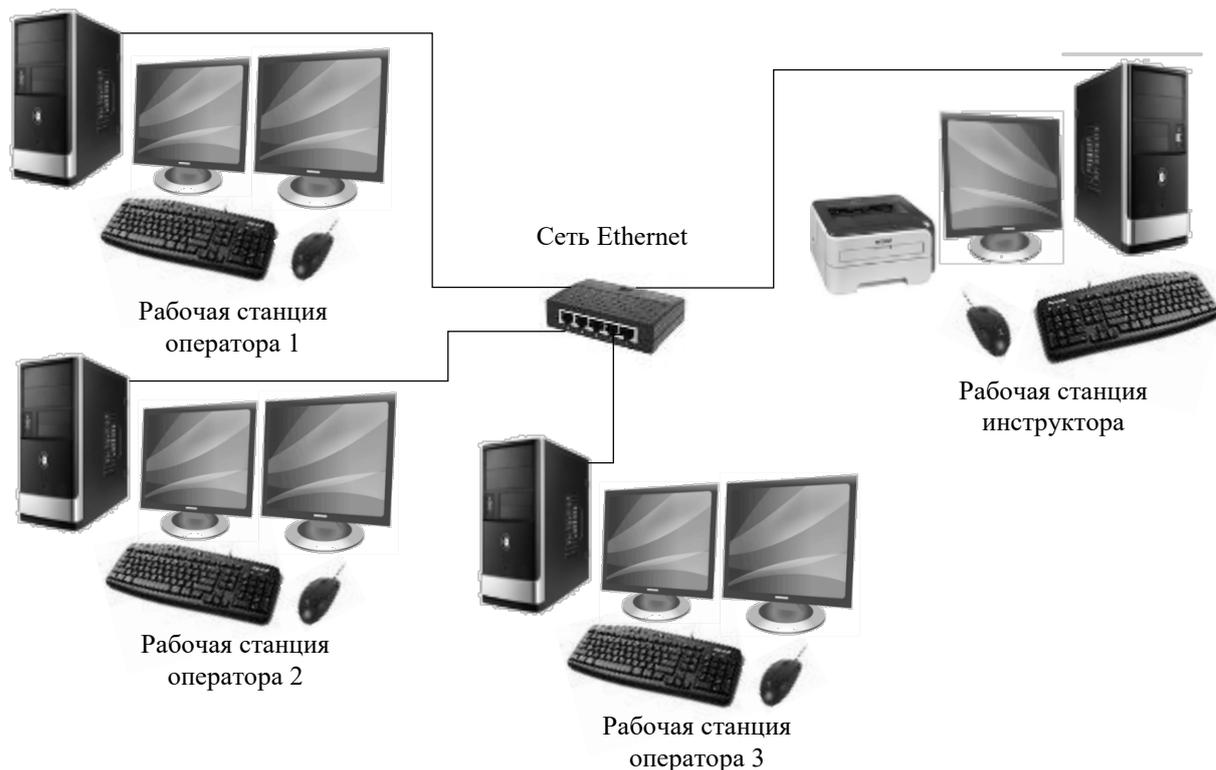


Рисунок 1 – Аппаратная структура КТК

Станция инструктора представляет собой серверную часть архитектуры КТК. Сервер реализует функции точного динамического моделирования поведения ТП во всех возможных режимах, точного воспроизведения всех функций реальной АСУ ТП и системы противоаварийной защиты. На сервере реализованы обучающие сценарии тренинга операторов, включая изменение поведения модели ТП при возможном изменении любых условий работы установки (состава и температуры сырья, погодных условий, поломки оборудования, вмешательства оператора и др.), выполняется методическое сопровождение тренинга (методики обучения, автоматизированная обучающая система, оценка и анализ действий персонала, протоколирование результатов тренинга и др.). Здесь же установлено программное приложение «АРМ Инструктора», предназначенное для управления процессом тренинга (внесение возмущений в тренинг инструктором, мониторинг работы операторов, проведение экзамена, анализ статистики тренинга зарегистрированных операторов и др.). Сервер взаимодействует с клиентами КТК (рабочими станциями операторов) в форме сетевой службы, обслуживающей двусторонние контракты стека сетевых протоколов TCP/IP.

Каждая станция оператора поддерживает взаимодействие с сервером в режиме участия инструктора в реализации задач тренинга, либо выполняет функции самостоятельного тренинга операторов (без участия инструктора) по заранее заданным сценариям с сохранением функций методического сопровождения. Эти станции оснащены двумя мониторами. На одном

из них воссоздается интерфейс, приближенный к реальной АСУ ТП, другой используется для эмуляции функций управления по месту полевым оборудованием, щитов и пультов управления с привлечением фотопанорам и технологий 3D-моделирования.

Основной целью тренажерной подготовки персонала является формирование и поддержание на необходимом уровне базовых практических навыков безопасной эксплуатации оборудования технологической установки в режимах нормальной эксплуатации, пуска и останова, а также аварийных режимах, в том числе согласно ПМЛА.

Основные задачи, которые решаются с использованием КТК, следующие:

Формирование и поддержание профессиональных знаний, умений и навыков персонала, обеспечивающих требуемый уровень безопасности при эксплуатации технологического оборудования. Изучение инструкций по эксплуатации и функциональных технологических схем оборудования.

Оператор должен хорошо ориентироваться в особенностях ТП и оборудования, существующих мнемосхемах АСУ ТП, нормах технологического режима, устройствах и функциях управления установкой в нормальном режиме эксплуатации. Решению этой задачи может помочь применение на КТК методик ориентирования в интерфейсе АСУ ТП и полевого оборудовании, освоение норм технологического режима и распознавания отклонения ТП от нормы. Эти методики нацелены на формирование у оператора эталонных образцов поведения ТП в базовых режимах (нормальном, холодного старта, рециркуляции). В любое время оператор может вызвать на экран монитора необходимые инструкции и другие нормативные документы.

1. Обучение и отработка практических навыков по безопасному и эффективному управлению технологическим оборудованием в штатных, нештатных и аварийных ситуациях, задаваемых по заранее подготовленным сценариям. Для решения этой задачи на КТК могут быть использованы несколько методик [1].

Одна из них – методика усвоения взаимозависимостей переменных ТП и тенденций их изменения при возникновении аварийной ситуации, формирует компетенции оператора при ответе на вопрос: «Что произойдет, если...?». Оператору сообщается неисправность ТП, которая моделируется на тренажере. Оператор сначала должен усвоить тенденции изменения переменных процесса и взаимосвязь этих изменений с конкретной поломкой (аварией), затем самостоятельно сформировать прогноз тенденции изменений отдельных переменных ТП и сопоставить свой прогноз с результатами моделирования на тренажере, выявив возможные ошибки прогноза.

Другая – методика выявления причин аварийных ситуаций по тенденциям изменения переменных процесса. Аварийная ситуация возникает на тренажере неожиданно для оператора, задача обучаемого по тенденции изменения переменных процесса понять и указывать причину возникшей ситуации.

Третья – методика отработки «моторных» навыков быстрого устранения аварийной ситуации и недопущения ее развития. Методика, реализующая эту задачу, содержит эталонные образцы действий оператора по устранению аварийных ситуаций, прописанные в нормативных документах (регламентах, инструкциях по эксплуатации установки и ПМЛА). Оператор осуществляет требуемые действия по устранению аварийной ситуации, приводя тем самым процесс к одной из базовых ситуаций (нормальный режим, холодный старт, режим рециркуляции установки). Оценка эффективности действий обучаемого осуществляется по результатам этих действий.

Еще одна – методика отработки пуска, аварийной и нормальной остановок объекта. Методика, обучающая решению этих задач, реализуется аналогично методике предыдущего пункта, т. к. предполагает формирование у обучаемого навыков «моторных» действий.

2. Отработка навыков группового тренинга, т. е. совместных действий персонала по управлению установкой. Роль каждого участника тренинга заранее определена, каждый участник отвечает за свой узел установки и решает отдельные функциональные задачи в условиях совместной работы на станциях оператора КТК, в том числе задачи обходчика

оборудования. Например, для установок ЦБП могут быть выделены следующие роли: оператор размольного оборудования, оператор узла промывки и отбелики целлюлозы, машинист пресспата, оператор машины по изготовлению бумажной массы/бумаги, оператор узла по регенерации сульфатных щелоков и др.

Важной составляющей КТК являются адекватные тренажерные модели технологического оборудования. Они представляют собой максимально приближенные к ТП динамические математические модели, основанные на полном и детальном описании процесса нелинейными дифференциальными уравнениями состояния фазовых переходов, тепло- и массообменных процессов, теплового и материального баланса компонентов продуктов, гидродинамики и гидравлики. Модели охватывают оборудование и арматуру моделируемого ТП во всех возможных режимах его работы, в том числе аварийных. В моделях учитывается теплообмен с окружающей средой, приводящий к остыванию аппаратов и трубопроводов при их отключении и прекращении подачи продуктов. Динамические характеристики моделей аппаратов отражают максимально приближенную к реальной реакцию объекта на возмущения и управляющие воздействия.

Опыт, полученный авторами проектов по разработке и внедрению КТК на различных технологических объектах корпораций «Роснефть», «Группа «ИМИМ», «Иркутская нефтяная компания», позволяют с уверенностью утверждать о высокой эффективности использования тренажеров для обеспечения безопасной эксплуатации технологических объектов [2]. КТК, разрабатываемые в ВШТЭ при Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна, обладают следующими конкурентными преимуществами:

- высокая степень адаптации симулятора под нужды и задачи заказчика;
- интерактивность и высокая степень погружения в рабочий процесс;
- индивидуальный и групповой тренинг;
- интеграция с предтренажерной подготовкой операторов, в том числе по ПМЛА;
- автоматизированная оценка действий оператора;
- оперативность технической и методической поддержки.

Список литературы

1. Благодарный Н. С. Интеллектуальная система поддержки компьютерного тренинга // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2016. – № 10. – С. 136-143.
2. Кривов М. В., Благодарный Н. С. Применение компьютерного тренинга в корпоративном обучении // Образовательные технологии и общество. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 3-10.

TASKS AND METHODS OF COMPUTER-BASED TRAINING OF PULP AND PAPER INDUSTRY OPERATORS

N. S. Blagodarnyy^{1*}, M. V. Krivov², V. V. Borko¹

¹ Higher School of Technology and Energy of SPbSUITD, St. Petersburg, Russia

² Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia

*E-mail: kaf_electro@mail.ru

The abstract. The report describes the purpose, tasks and methods of training of operating personnel of pulp and paper mills and other industrial enterprises on computer simulators as the most effective technical means of training. The experience of introducing computer simulators at various production facilities testifies to the formation of basic practical skills of operating personnel in safe operation of equipment of technological plants in normal operation modes, start-up and shutdown, as well as emergency modes.

Keywords: simulator, computer simulator complex, industrial safety, operating personnel, training methods, evaluation of operators' actions.

References

1. Blagodarnyy N.S. Intellektual'naya sistema podderzhki komp'yuternogo treninga. Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. № 10. pp. 136-143.
2. Krivov M.V., Blagodarnyy N.S. Primenenie komp'yuternogo treninga v korporativnom obuchenii. Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo. 2019. T. 22. № 1. pp. 3-10.

МАТЕРИАЛЫ

**VI 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**

2024

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 06.11.2024 г. Рег. № 5341/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД

198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.