

УДК 676.168+676.026.723.8

## МОДИФИКАЦИЯ БУМАГИ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ФОРМОВАНИИ

© *Г.К. Малиновская<sup>1\*</sup>, Е.Г. Смирнова<sup>1</sup>, А.К. Хрипунов<sup>2</sup>, Н.Н. Сапрыкина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198092 (Россия), e-mail: m-gk@mail.ru

<sup>2</sup> Институт высокомолекулярных соединений РАН, В.О. Большой пр., 31, Санкт-Петербург, 199004 (Россия)

Исследовано применение природных наноконпонентов для повышения механической прочности бумаги при аэродинамическом способе формования. В качестве наноконпонентов использовали измельченную бактериальную целлюлозу и мелкую фракцию сульфатной беленой хвойной целлюлозы, образующуюся в процессе размола (вторичную мелочь). Введение наноконпонентов проводили при увлажнении волокнистого слоя с применением антиадгезионного материала, обеспечивающего равномерное одностороннее нанесение веществ в виде суспензии на поверхность бумаги. Рост показателей механической прочности бумаги происходил за счет образования дополнительных водородных связей и возрастания межфазного взаимодействия между волокнистым слоем из растительной целлюлозы и наноконпонентами. Установлено, что использование суспензии бактериальной целлюлозы более перспективно из-за малого расхода при значительном повышении показателей механической прочности бумаги. Нанесение покровного слоя бактериальной целлюлозы на бумагу аэродинамического формования из сульфатной беленой эвкалиптовой целлюлозы позволяет повысить значение механической прочности бумаги до потребительских требований при расходе бактериальной целлюлозы в количестве от 0.9 до 1.5% к массе абсолютно сухой целлюлозы.

*Ключевые слова:* аэродинамическое формование бумаги, сульфатная целлюлоза, наноконпоненты, бумага с покрытием, бактериальная целлюлоза, вторичная мелочь, механическая прочность.

### **Введение**

Аэродинамическое формование бумаги (АДФ) в настоящее время не нашло применения в промышленности в силу объективных причин, несмотря на ряд преимуществ по сравнению с традиционным формованием бумаги, а именно: ограниченный расход воды, экологическая безопасность, значительное снижение энергозатрат на роспуск целлюлозного полуфабриката и сушку бумаги. Изменяется металлоемкость оборудования за счет исключения из схемы традиционной бумагоделательной машины формирующего секционного стола, что влечет за собой уменьшение производственных площадей. Перечисленные затраты составляют до 30% общих затрат производства бумаги традиционным способом [1–3].

Предыдущими исследованиями показана возможность изготовления методом АДФ печатных и санитарно-гигиенических видов бумаги, упаковочной бумаги и тарного картона, изделий из макулатурного сырья [4–8]. В технологии АДФ происходит разделение в диспергаторе целлюлозного полуфабриката на отдельные волокна и образование волокнистого слоя плотностью 25 г/м<sup>2</sup> на формирующей сетке. Такие волокна могут использоваться как самостоятельный продукт производства (пушонка), а также вводиться в качестве внутренних слоев многослойной бумаги или картона [9]. Высокая воздухопроницаемость, пористость и пухлость бумаги АДФ может быть востребована при производстве фильтровальных видов бумаги для очистки воздуха от мелких твердых частиц.

Технология АДФ бумаги позволяет осуществлять однородность смешения компонентов и

---

*Малиновская Галина Кирилловна* – кандидат химических наук, ведущий инженер, e-mail: m-gk@mail.ru

*Смирнова Екатерина Григорьевна* – доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии бумаги и картона, e-mail: smirnovalta@gmail.com

*Хрипунов Альберт Константинович* – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, e-mail: m-gk@mail.ru

*Сапрыкина Наталья Николаевна* – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, e-mail: m-gk@mail.ru

\* Автор, с которым следует вести переписку.

равномерное распределение плотности вещества в объеме материала. На стадии изготовления в объем или на поверхность бумаги можно вводить необходимые компоненты (наполнители, проклеивающие и связующие вещества, антисептические добавки).

В качестве связующих веществ как в традиционном, так и в аэродинамическом способе формования бумаги используют различные виды крахмала, производные целлюлозы, синтетические полимеры, смолы и пр. [1, 10].

В данной работе для повышения механической прочности бумаги АДФ применяли волокнистые наноконпоненты: мелкую фракцию сульфатной беленой хвойной целлюлозы, образующуюся в процессе размола (вторичную мелочь) и измельченную бактериальную целлюлозу. Известно, что положительное влияние на прочность бумаги оказывают обрывки волокон, микро- и наночибриллы и содержание низкомолекулярных гемицеллюлозных фракций [11, 12]. Согласно представлениям Пейджа, разрывная прочность бумажного полотна пропорциональна увеличению площади, вовлеченной в межволоконные связи. Площадь межволоконных контактов и возможность физико-химического взаимодействия контактирующих участков волокон с образованием межволоконных связей определяется физическим состоянием поверхности волокон [11]. Размолотые целлюлозные волокна в традиционном формовании бумаги увеличивают реальную площадь контакта волокон, образуя водородные связи между гидроксильными и карбоксильными группами макромолекул целлюлозы при сушке бумаги и картона.

В процессе АДФ размолотые целлюлозные волокна контактируют с воздушной низкополярной средой. В результате контакта с воздушной средой в поверхностном слое волокон увеличивается доля функциональных групп, вовлеченных во внутриволоконные водородные связи, т.е. снижается способность волокон образовывать межволоконные связи. Дополнительное введение наноконпонентов целлюлозного происхождения также может оказывать положительное воздействие на связеобразование волокон и упрочнение бумаги.

В настоящее время растет интерес к изучению и применению бактериальной целлюлозы в связи с тем, что она обладает уникальными структурными и механическими свойствами. Бактериальная целлюлоза характеризуется наличием тончайших микрофибрилл, высокой сорбционной способностью и высокой механической прочностью [13–15]. Несмотря на сложность получения и выделения бактериальной целлюлозы проводятся исследования по ее применению в технологии бумаги [16–25]. Однако введение бактериальной целлюлозы при традиционном мокром формовании значительно снижает способность бумажной массы к обезвоживанию [26]. Использование ограниченного количества воды при аэродинамическом формовании бумаги (не более 2.3 кг/кг сухого волокна) исключает проблемы, связанные с обезвоживанием волокнистого слоя, что явилось предпосылкой к изучению влияния добавок бактериальной целлюлозы как связующего компонента при получении бумаги методом АДФ.

### *Экспериментальная часть*

Образцы бумаги получены на лабораторной установке аэродинамического формования [3]. При увлажнении волокнистого слоя в вальцовом прессе на его поверхность наносили связующее в виде суспензии вторичной мелочи или бактериальной целлюлозы.

В качестве полуфабрикатов для получения бумаги аэродинамического формования использовали сульфатную хвойную целлюлозу марки ХБ-1 (Россия, Архангельский ЦБК) и сульфатную листовую белую целлюлозу издревесины эвкалипта (Бразилия, VCP). Сопротивление бумаги разрыву определяли по ГОСТ ИСО 1924-1-96. Плотность листа вычисляли по ГОСТ 27015; сопротивление раздиранию определяли по ГОСТ 13525.3-97; жесткость при изгибе – по ГОСТ 30435-96; сопротивление излому – по ГОСТ 13525-2; капиллярную впитываемость – по ГОСТ 12605; межслоевую прочность определяли на приборе Скотт-Бонда.

### *Обсуждение результатов*

Технологические параметры процесса АДФ обеспечивают сохранение влажности волокон не ниже 30% на формирующей сетке. Дополнительное увлажнение сформованного слоя активизирует подвижность фибрилл поверхностного слоя волокон и восстанавливает способность контактирующих волокон к межволоконному связеобразованию [3]. Однако отклонение температурно-влажностного режима получения

аэровзвеси от заданных значений может привести к снижению влажности волокон во время формирования волокнистого слоя, необратимому «ороговению» поверхностных слоев волокон и снижению механической прочности бумаги.

Установлено, что в процессе получения аэровзвеси волокон из размолотой целлюлозы в оборудовании АДФ внешняя фибрилляция не сохраняется. Фибриллы скручиваются или прилипают к поверхности волокон в результате капиллярного стягивания фибрилл тонкими пленками воды на границе раздела фаз «вода – воздух – волокно». Механическая прочность получаемых образцов бумаги находится на уровне прочности образцов из неразмолотых волокон.

Условием получения влажной аэровзвеси волокон в диспергаторе является величина разрывной прочности полуфабриката во влажном состоянии [27]. На рисунке 1 представлены зависимости индекса прочности полуфабриката от влажности при различных степенях помола хвойной целлюлозы. При работе на лабораторном диспергаторе, имеющем постоянную окружную скорость вращения внешнего среза лопаток ротора, равную 30 м/с, величина индекса прочности увлажненного материала должна быть не более 1.2 Н м/г. Для размолотой целлюлозы требуемое значение разрывной прочности соответствует влажности материала 70%. Конструкция существующего диспергатора не позволяет перерабатывать полуфабрикат с высокой влажностью из-за ограниченной окружной скорости вращения ротора.

Данные рисунка 1 показывают, что в диспергаторе аэродинамического формирования роспуск целлюлозы даже с небольшой степенью помола, равной 21°ШР, невозможен без дополнительного введения компонентов, снижающих разрывную прочность материала до 1 Нм/г, тогда как роспуск неразмолотой целлюлозы обеспечивается при влажности выше 40%.

Для увеличения прочности бумаги аэроформования использовали вторичную мелочь. Предполагалось, что дополнительное введение мелочи в волокнистую массу увеличит фактическую площадь межволоконных контактов за счет образования фибриллярных мостиков в зонах контакта волокон. Вторичную мелочь получали размолотом хвойной сульфатной беленой целлюлозы в дезинтеграторе в течение 1.5 ч до значения степени помола 90°ШР и отделяли на ситовом анализаторе фракцию мелочи с сита Р200 меш. В состав фракции мелочи входили как грубые частицы (обрывки волокон, короткие и тонкие волокна), так и частицы с наноразмерным размером (целлюлозные фибриллы и микрофибриллы). Для образования покровных пленок проводили разбавление суспензии мелочи водой до различных концентраций.

Из суспензии мелочи мокрым отливом сформован волокнистый слой и определены его свойства. В таблице 1 представлены значения прочностных характеристик слоя из мелочи и двухслойного образца бумаги, состоящего из волокон хвойной целлюлозы, покрытых слоем мелочи. Массовая доля слоя мелочи и слоя волокна в двухслойном образце бумаги составляла 46% и 54%, а толщина слоев, измеренная на поперечном срезе образца бумаги, равнялась 43.4 мкм и 96.6 мкм соответственно.

Высокая разрывная прочность по нормали к плоскости образца двухслойной бумаги свидетельствует о хорошей межслоевой адгезии.

Сравнение экспериментов на разрыв слоя мелочи и двухслойной бумаги показали различие в напряженно-деформированном состоянии объектов исследования: вследствие более однородной структуры слоя мелочи зона пластической деформации распространяется на всю длину образца, тогда как в двухслойной бумаге она локализована вблизи линии разрыва.

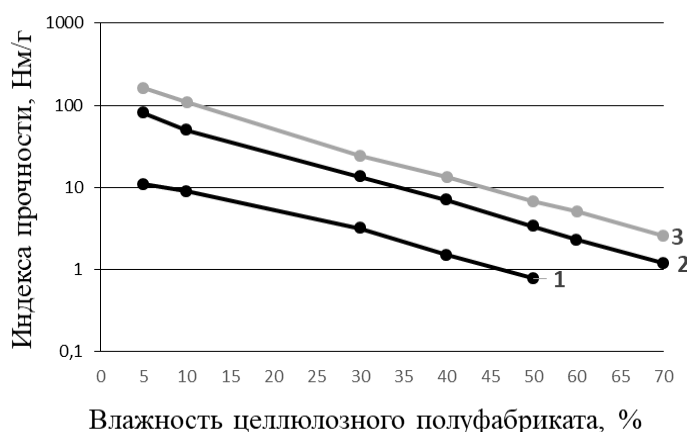


Рис. 1. Зависимость индекса прочности полуфабриката от влажности при степени помола хвойной целлюлозы: 1 – 12°ШР; 2 – 21°ШР; 3 – 36°ШР

Таблица 1. Основные свойства слоя мелочи и двухслойного образца бумаги

Образец	Слой мелочи	Двухслойная бумага
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	950±10	700±7
Разрывная прочность, Н/г	40.4±1.6	41.7±1.6
Сопротивление раздиранию, Дж/кг	1480±60	650±30
Индекс жесткости, МНм/кг	3.95±0.15	5.56±0.20
Межслоевая прочность, Дж/м <sup>2</sup>	–	540±20

Способ обработки сформованного методом АДФ волокнистого слоя суспензией мелочи реализован на установке, схематически представленной на рисунке 2.

Изучено влияние весового содержания мелочи на прочность двухслойных образцов бумаги АДФ, полученные данные представлены в таблице 2.

Разрывная прочность бумаги из неразмолотых хвойных волокон невысока, увеличение разрушающего усилия двухслойного образца заметно при введении 0.18 г мелочи на 1 г волокнистого слоя. Тонкие слои мелочи не влияют на прочность, а улучшают лишь состояние поверхности бумаги. С увеличением толщины поверхностной пленки мелочи при плотности образца 700 кг/м<sup>3</sup> (табл. 2, №5) возрастает хрупкость пленки, что сказывается на общей прочности бумаги.

При нанесении суспензии вторичной мелочи на бумагу происходит проникновение поверхностных функциональных групп волокнистого связующего в целлюлозную матрицу, что увеличивает площадь межволоконных контактов и способствует развитию межфазной адгезии.

Однако существенное увеличение весового содержания фракции мелочи в бумаге экономически нецелесообразно. Расход энергии на водный размол целлюлозы при подготовке мелочи влечет за собой значительные энергозатраты, разбавление суспензии мелочи до необходимых концентраций требует как дополнительного оборудования, так и времени.

В качестве другого нанокон компонента для повышения прочности бумаги АДФ использовали бактериальную целлюлозу, синтезированную штаммом *Comagataeibacter xylinus* B-13015 [13] Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов в Институте высокомолекулярных соединений РАН. Для получения суспензии бактериальную целлюлозу подвергали размолу в дезинтеграторе при скорости вращения ротора 15000 об./мин в течение 10 мин при концентрации 1.0%.

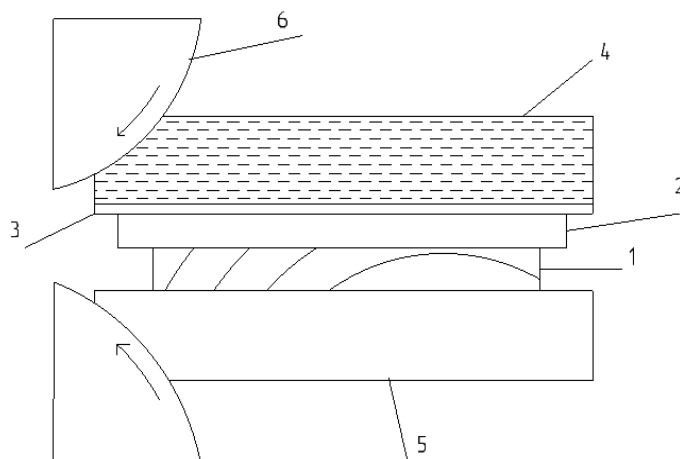


Рис. 2. Схема обработки волокнистого слоя суспензией связующего вещества: 1 – волокнистый слой аэроформования; 2 – слой водной суспензии связующего; 3 – антиадгезионный материал; 4 – водонасыщенное сукно; 5 – сухое сукно; 6, 7 – верхний и нижний валы прессы

Таблица 2. Результаты упрочнения бумаги из сульфатной беленой хвойной целлюлозы суспензией мелочи

№	Концентрация суспензии мелочи, г/л	Масса кв. метра бумаги, г/м <sup>2</sup>	Плотность бумаги, кг/м <sup>3</sup>	Содержание мелочи, Г м/Г волокна	Разрушающее усилие, Н
1	0	80	650	0	18.7
2	3.7	80	750	0.16	18.7
3	7.4	100	750	0.18	27.4
4	7.4	100	700	0.28	37.2
5	10.0	100	700	0.43	24.0
Погрешность		1%	1%	1%	4%

Бактериальная целлюлоза отличается от природных волокон по ряду параметров: волокна образуют сетевую структуру, имеют два наноразмерных размера (ширина – 50–100 нм и толщина – 13–15 нм) [20, 23]. Разница свойств и геометрии волокон природной и бактериальной целлюлозы определяет невозможность их совместной переработки в оборудовании АДФ. Бактериальная целлюлоза прочно удерживает воду при соотношении сухого вещества и воды  $\approx 1/100$  и не может разделяться на волокна в используемом диспергаторе. Суспензию бактериальной целлюлозы разбавляли до концентрации 0.1%. Разбавленная суспензия бактериальной целлюлозы обеспечила получение тонкого слоя на антиадгезионном материале (рис. 2, поз. 3) и перевод заданного количества бактериальной целлюлозы на поверхность волокнистого слоя с образованием равномерного покрытия.

На сканирующем электронном микроскопе SUPRA 55VP фирмы ZEISS получены снимки фибриллярной структуры бактериальной целлюлозы и поверхности двухслойных образцов бумаги АДФ (рис. 3, 4).

Волокна бактериальной целлюлозы образуют плотную пространственную сетку, что демонстрируется рисунком 3. Из рисунка 4 следует, что суспензия бактериальной целлюлозы образует на поверхности бумаги тонкую пленку. Несмотря на неполное покрытие волокон целлюлозы пленкой бактериальной целлюлозы, созданы условия для повышения показателей прочности бумаги на разрыв и сопротивление излому. Данные измерения разрывного усилия образцов бумаги от количества нанесенной на волокнистый слой суспензии бактериальной целлюлозы представлены на рисунке 5 и в таблице 3.

Рис. 3. Микрофотографии фибриллярной структуры бактериальной целлюлозы

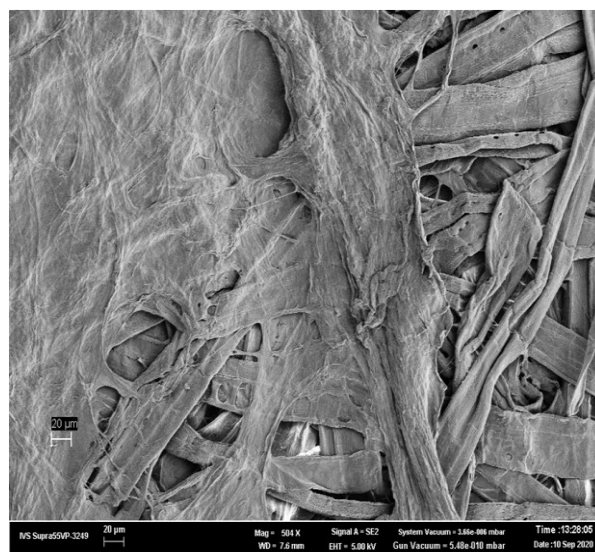
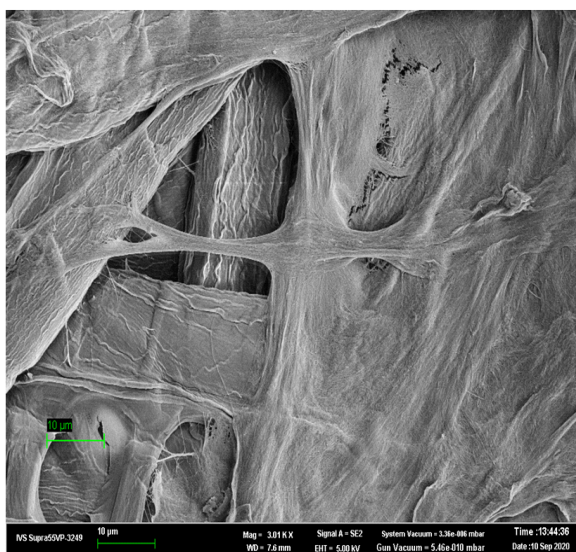
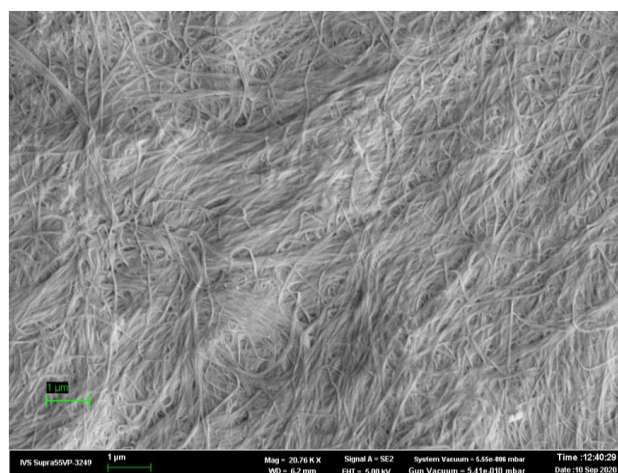


Рис. 4. Микрофотографии поверхности бумаги, полученной способом АДФ из хвойной целлюлозы, с поверхностным слоем из бактериальной целлюлозы

Для всех образцов двухслойной бумаги наблюдается повышение значений разрушающего усилия с увеличением содержания бактериальной целлюлозы на поверхности образца. Наилучшие показатели получены для бумаги из целлюлозы из древесины эвкалиптамассой  $100 \text{ г/м}^2$ , причем величина разрушающего усилия в  $40 \text{ Н}$  достигается при содержании бактериальной целлюлозы в количестве  $0.015 \text{ г}$  на  $1 \text{ г}$  целлюлозы (рис. 5). Повышенные показатели прочности бумаги из лиственной целлюлозы, по-видимому, объясняются тем, что она образует более сомкнутую структуру волокнистого слоя, содержит больше функциональных групп, участвующих в межволоконном связеобразовании, и лучше уплотняется при прессовании благодаря более коротким волокнам, по сравнению с волокнами хвойных пород древесины.

Данные таблицы 3 показывают, что с увеличением содержания бактериальной целлюлозы в образце от  $0.3$  до  $1.2\%$  механические показатели бумаги повышаются: разрушающее усилие возросло в  $1.3$  раза, сопротивление излому – в  $8$  раз. Величина капиллярной впитываемости снизилась в  $1.3$  раза по мере увеличения содержания бактериальной целлюлозы, что коррелирует с увеличением прочности бумаги.

Таким образом, показана возможность повышения механической прочности образцов бумаги аэродинамического формования при использовании наноконструктивных волоконной структуры, имеющих химическое сродство с целлюлозными волокнами. Введение связующих, размеры частиц которых значительно отличаются от размеров волокон древесной целлюлозы, возможно только в процессе увлажнения сформованного слоя в вальцовом прессе с использованием антиадгезионного материала.

Использование бактериальной целлюлозы может оказаться более перспективным при решении проблем, связанных с технологией биосинтеза и снижением себестоимости процесса.

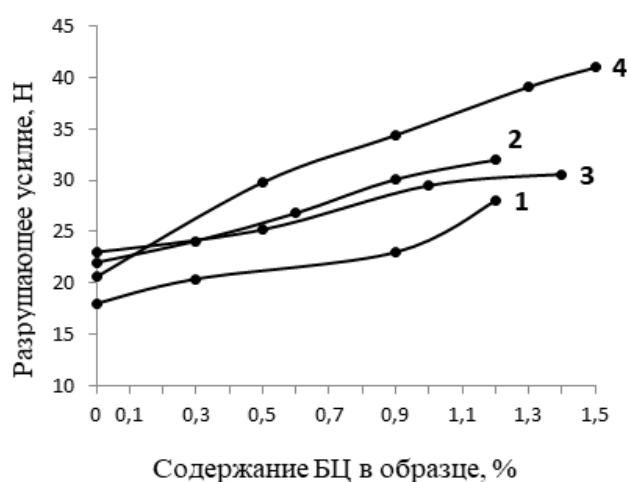


Рис. 5. Зависимость показателя разрушающего усилия бумаги от количества бактериальной целлюлозы на поверхности образца, где 1, 2 – образцы из сульфатной белой хвойной целлюлозы массой  $80$  и  $130 \text{ г/м}^2$ ; 3, 4 – образцы из сульфатной белой эвкалиптовой целлюлозы массой  $80$  и  $100 \text{ г/м}^2$  соответственно

Таблица 3. Результаты упрочнения бумаги из сульфатной хвойной целлюлозы суспензией бактериальной целлюлозы (масса образца –  $130 \text{ г/м}^2$ )

№	Содержание БЦ в образце, г БЦ /г целл.	Разрушающее усилие, Н	Сопротивление излому, ч.д.п.	Капиллярная впитываемость, мм
1	0	22.5	6	122
2	0.003	23.0	12	114
3	0.006	26.0	18	106
4	0.009	30.0	24	102
5	0.012	30.2	47	93
Погрешность		4%	4%	2 мм

### Выводы

Методом аэродинамического формования изготовлены и исследованы двухслойные образцы бумаги с поверхностным слоем из связующих наноконструктивных волокон. Для нанесения суспензий связующих на поверхность волокнистого слоя использован антиадгезионный материал, что позволило полностью перевести заданное количество связующего компонента на образец бумаги.

Отмечено повышение механической прочности бумаги при введении суспензий вторичной мелочи и бактериальной целлюлозы в бумагу при очень малых расходах наноконпонентов. Значительное повышение показателя разрывной прочности бумаги наблюдается при расходе вторичной мелочи в количестве 0.28 г/г волокна.

Для образцов бумаги из хвойной целлюлозы введение бактериальной целлюлозы в количестве 0.012 г/1 г волокна повышает значение разрушающего усилия в 1.3 раза, а сопротивление излому в 8 раз.

Нанесение покровного слоя бактериальной целлюлозы на бумагу аэродинамического формования из сульфатной целлюлозы древесины эвкалипта позволяет повысить значение механической прочности бумаги АДФ до потребительских требований при расходе бактериальной целлюлозы в количестве от 0.9% до 1.5% к массе абсолютно сухой целлюлозы.

*Авторы выражают благодарность сотруднику Санкт-Петербургского государственного университета А.В. Мигуновой за синтез бактериальной целлюлозы.*

### Список литературы

1. Патент №2100508 (РФ). Способ аэродинамического изготовления картона, писчей или печатной бумаги / О.А. Терентьев, В.М. Дробосюк. 27.12.1997.
2. Kononov A., Paulapuro H., Drobosyuk V., Malinovskaya G., Terentiev O. Air Dinamic Forming as an Alternative to Commercial Papermarking Concepts // *Industriadella Carta*. 2002. Vol. 40 (8). Pp. 37–48.
3. Дробосюк В.М. Технология бумаги аэродинамическим способом: научное издание. СПб., 2011. 56 с.
4. Патент №2159304 (РФ). Аэродинамический способ изготовления санитарно-гигиенической бумаги / В.М. Дробосюк. 20.11.2000.
5. Патент №2426828 (РФ). Способ введения наполнителя в бумагу / Л.В. Литвинова, Г.К. Малиновская, В.М. Дробосюк. 20.08.2011.
6. Дробосюк В.М., Малиновская Г.К., Литвинова Л.В. Аэродинамическое формование бумаги санитарно-гигиенического назначения // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2015. №1. С. 126–129.
7. Литвинова Л.В., Малиновская Г.К. Использование древесной массы в композиции бумаги аэродинамического формования // *Вестник СПбГУТД*. 2018. №2. С. 103–105.
8. Малиновская Г.К., Литвинова Л.В. Способ мелования при аэродинамическом формовании бумаги // *Химия растительного сырья*. 2019. №2. С. 297–304. DOI: 10.14258/jcrpm.2019023969.
9. Мидуков Н.П., Ефремкина П.А., Малиновская Г.К., Куров В.С., Смолин А.С. Получение трехслойного вайтлайнера из вторичных волокон методом аэродинамического формования // *Химические волокна*. 2017. №1. С. 22–26.
10. Технология целлюлозно-бумажного производства. Т. 2. Производство бумаги и картона (Часть 1). СПб., 2005. 423 с.
11. Кларк Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний). М., 1983. 456 с.
12. Джайме Г., Хунгер Г. Изменение расположения микрофибрилл в высушенной целлюлозе и влияние этого изменения на ее свойства // *Основные представления о волокнах, применяемых в бумажном производстве: материалы симпозиума*. М., 1962. 500 с.
13. Malcolm R., Brown J.R. The Biosynthesis of cellulose // *Pure Applied Chemistry*. 1996. Vol. 33. N10. Pp. 1345–1373.
14. Zhijiang C., Jaehwan K. Bacterial Cellulose/poly (ethylene glycol) composite characterization and evaluation of bio-compatibility // *Cellulose*. 2010. Vol. 17. Pp. 83–91.
15. Keshk S. Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications // *J. Bioprocess Biotech*. 2014. Vol. 4. N2. 1000150.
16. Резник А.С. Повышение термостабильности компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции путем структурной модификации целлюлозной бумаги: дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 212 с.
17. Патент №2415221 (РФ). Способ получения электроизоляционной бумаги / Н.М. Журавлева, Б.И. Сажин, Е.Г. Смирнова, А.К. Хрипунов, А.А. Ткаченко. 27.03.2011.
18. Gao W., Chen K., Yang R., Yang F., Han W. Properties of Bacterial Cellulose and its Influence on the Physical Properties of Paper // *Bio Resources*. 2011. Vol. 6. Pp. 144–153.
19. Basta A.N., El-Saied H. Perfomance of improved bacterial cellulose application in production of functional paper // *Journal of Applied Microbiology*. 2009. Vol. 107. Pp. 2098–2107. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04467.
20. Yang J., Zhao C., Jiang Y., Han W. The research of adding bacterial cellulose to improve the strength of long-fiber paper // *4th International Conference on Machinery. Materialsand Computing Technology*. 2016. Pp. 391–394.
21. *Материалы из нетрадиционных видов волокон: технологии получения, свойства, перспективы применения* / под ред. А.В. Вураско. Екатеринбург, 2020. 252 с.
22. Смирнова Е.Г. Повышение устойчивости бумаги к старению формированием ее композиционного состава: дисс. ... докт. техн. наук. СПб., 2014. 311 с.

23. Völkel L., Ahn K., Hähner U., Gindl- Altmutter W., Potthast A. Nano meets the sheet: adhesive-free application of nanocellulosic suspensions in paper conservation // *Heritage Science*. 2017. Vol. 5. P. 23. DOI: 10.1186/s40494-017-0134-5.
24. Surma-Slusarska B., Presler S., Danielewicz D. Characteristics of Bacterial Cellulose Obtained from *Acetobacter* Culture for Application in Papermaking // *FIBES & TEXTILES in Eastern Europe*. 2008. Vol. 16. N4 (69). Pp. 108–111.
25. Chawla P.R., Bajaj I.B., Survase S.A., Singhal R.S. Fermentative Production of Microbial Cellulose // *Food Technology. Biotechnology*. 2009. Vol. 47. N2. Pp. 107–124.
26. Смирнова Е.Г., Лоцманова Е.М. Применение бактериальной целлюлозы в композиции бумажной массы для механизированной реставрации старинных документов // *Вестник СПбГУТД*. 2019. №2. С. 83–87.
27. Дробосюк В.М., Малиновская Г.К. Диспергирование целлюлозных материалов в процессе аэродинамического формования бумаги: научное издание. СПб., 2015. 72 с.

*Поступила в редакцию 17 февраля 2021 г.*

*После переработки 23 августа 2021 г.*

*Принята к публикации 15 декабря 2021 г.*

**Для цитирования:** Малиновская Г.К., Смирнова Е.Г., Хрипунов А.К., Сапрыкина Н.Н. Модификация бумаги при аэродинамическом формовании // *Химия растительного сырья*. 2022. №1. С. 367–376. DOI: 10.14258/jcrpm.2022019222.



*Malinovskaya G.K.<sup>1\*</sup>, Smirnova E.G.<sup>1</sup>, Khripunov A.K.<sup>2</sup>, Saprykina N.N.<sup>2</sup>* MODIFICATION OF AERODYNAMIC FORMING PAPER

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, ul. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198092 (Russia), e-mail: m-gk@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences, V.O. Bolshoy pr., 31, St. Petersburg, 199004 (Russia)

The use of natural nanocomponents for increasing the mechanical strength of paper in the aerodynamic method has been investigated. Milled bacterial cellulose and a fine fraction of sulphate bleached softwood cellulose formed during grinding (secondary fines) were used as nanocomponents. The treatment with nanocomponents was carried out while moistening the fibrous layer with the use of an anti-adhesive material providing uniform one sided application of substances in the form of a suspension on the paper surface. The growth of the indicators of the mechanical strength of paper occurred due to the formation of additional hydrogen bonds and an increase in the interfacial interaction between the fibrous layer of plant cellulose and the nanocomponent. It was found that the use of a suspension of bacterial cellulose is more promising due to the low consumption of the binder with a significant increase in the mechanical strength of the paper. The application of a bacterial cellulose coating layer on aerodynamically molded eucalyptus cellulose makes it possible to increase the mechanical strength of the paper to consumer requirements with the consumption of bacterial cellulose in an amount of 0.9% to 1.5% by weight of absolutely dry eucalyptus cellulose.

*Keywords:* aerodynamic paper forming, nanocomponents, paper, bacterial cellulose, secondary fines, mechanical strength.

### References

1. Patent 2100508 (RU). 27.12.1997. (in Russ.).
2. Kononov A., Paulapuro H., Drobosyuk V., Malinovskaya G., Terentiev O. *Industrialdella Carta*, 2002, vol. 40 (8), pp. 37–48.
3. Drobosyuk V.M. *Tekhnologiya bumagi aerodinamicheskim sposobom: nauchnoye izdaniye*. [Paper technology in an aerodynamic way: scientific edition]. St. Petersburg, 2011, 56 p. (in Russ.).
4. Patent 2159304 (RU). 20.11.2000. (in Russ.).
5. Patent 2426828 (RU). 20.08.2011. (in Russ.).
6. Drobosyuk V.M., Malinovskaya G.K., Litvinova L.V. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 2015, no. 1, pp. 126–129. (in Russ.).
7. Litvinova L.V., Malinovskaya G.K. *Vestnik SPbGUTD*, 2018, no. 2, pp. 103–105. (in Russ.).
8. Malinovskaya G.K., Litvinova L.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 2, pp. 297–304. DOI: 10.14258/jcprm.2019023969. (in Russ.).
9. Midukov N.P., Yefremkina P.A., Malinovskaya G.K., Kurov V.S., Smolin A.S. *Khimicheskiye volokna*, 2017, no. 1, pp. 22–26. (in Russ.).
10. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. T. 2. Proizvodstvo bumagi i kartona (Chast' 1)*. [Technology of pulp and paper production. Vol. 2. Manufacture of paper and cardboard (Part 1)]. St. Petersburg, 2005, 423 p. (in Russ.).
11. Klark Dzh. *Tekhnologiya tsellyulozy (nauka o tsellyuloznoy masse i bumage, podgotovka massy, pererabotka yeye na bumagu, metody ispytaniy)*. [Pulp technology (pulp and paper science, pulp preparation, paper processing, test methods)]. Moscow, 1983, 456 p. (in Russ.).
12. Dzhayme G., Khunger G. *Osnovnyye predstavleniya o voloknakh, primenyayemykh v bumazhnom proizvodstve. Materialy simpoziuma*. [Basic ideas about fibers used in paper production. Symposium materials]. Moscow, 1962, 500 p. (in Russ.).
13. Malcolm R., Brown J.R. *Pure Applied Chemistry*, 1996, vol. 33, no. 10, pp. 1345–1373.
14. Zhijiang C., Jaehwan K. *Cellulose*, 2010, vol. 17, pp. 83–91.
15. Keshk S. J. *Bioprocess Biotech.*, 2014, vol. 4, no. 2, 1000150.
16. Reznik A.S. *Povysheniye termostabil'nosti komponentov vysokovol'tnoy bumazhno-propitannoy izolyatsii putem strukturnoy modifikatsii tsellyuloznoy bumagi: diss. ... kand. tekhn. nauk*. [Increasing the thermal stability of the components of high-voltage paper-impregnated insulation by structural modification of cellulose paper: diss. ... cand. tech. Sciences]. St. Petersburg, 2017, 212 p. (in Russ.).
17. Patent 2415221 (RU). 27.03.2011. (in Russ.).
18. Gao W., Chen K., Yang R., Yang F., Han W. *Bio Resources*, 2011, vol. 6, pp. 144–153.
19. Basta A.N., El-Saied H. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, vol. 107, pp. 2098–2107. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04467.
20. Yang J., Zhao C., Jiang Y., Han W. *4th International Conference on Machinery. Materials and Computing Technology*, 2016, pp. 391–394.
21. *Materialy iz netraditsionnykh vidov volokon: tekhnologii polucheniya, svoystva, perspektivy primeneniya* [Materials from non-traditional fiber types: production technologies, properties, application prospects], ed. A.V. Vurasko. Yekaterinburg, 2020, 252 p. (in Russ.).

\* Corresponding author.

22. Smirnova Ye.G. *Povysheniye ustoychivosti bumagi k stareniyu formirovaniyem yeye kompozitsionnogo sostava: diss. ... dokt. tekhn. nauk.* [Increasing the resistance of paper to aging by the formation of its composition: diss. ... doc. tech. Sciences]. St. Petersburg, 2014, 311 p. (in Russ.).
23. Völkel L., Ahn K., Hähner U., Gindl-Altmutte W., Potthast A. *Heritage Science*, 2017, vol. 5, p. 23. DOI: 10.1186/s40494-017-0134-5.
24. Surma-Slusarska B., Presler S., Danielewicz D. *FIBES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2008, vol. 16, no. 4 (69), pp. 108–111.
25. Chawla P.R., Bajaj I.B., Survase S.A., Singhal R.S. *Food Technology. Biotechnology*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 107–124.
26. Smirnova Ye.G., Lotsmanova Ye.M. *Vestnik SPbGUTD*, 2019, no. 2, pp. 83–87. (in Russ.).
27. Drobosyuk V.M., Malinovskaya G.K. *Dispergirovaniye tsellyuloznykh materialov v protsesse aerodinamicheskogo formovaniya bumagi. Nauchnoye izdaniye.* [Dispersion of cellulose materials in the process of aerodynamic formation of paper. Scientific publication]. St. Petersburg, 2015, 72 p. (in Russ.).

*Received February 17, 2021*

*Revised August 23, 2021*

*Accepted December 15, 2021*

**For citing:** Malinovskaya G.K., Smirnova E.G., Khripunov A.K., Saprykina N.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 1, pp. 367–376. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2022019222.