

УДК 676.038:676.017.44

РЕЦИКЛИНГ ВЛАГОПРОЧНОЙ БУМАГИ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ. ЧАСТЬ 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВТОРИЧНЫХ ВОЛОКОН

© *А.А. Пенкин^{1*}, Я.В. Казаков²*

¹ *Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, Минск, 220006 (Республика Беларусь),
e-mail: penkin@belstu.by*

² *Северный (Арктический) федеральный университет имени
М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002 (Россия)*

Исследованы морфологические, прочностные и оптические свойства вторичных волокон, полученных при различных режимах роспуска влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения из 100% белой сульфатной хвойной целлюлозы. Установлено, что внешний вид, распределение длины и ширины волокон, а также их средневзвешенные по длине значения остаются практически неизменными независимо от продолжительности роспуска влагопрочной бумаги и присутствия активаторов роспуска. Ускоренный роспуск влагопрочной бумаги с применением персульфатов в условиях щелочной обработки массы способствует повышению фактора формы с 83.0 до 84.1–84.4%, снижению числа изломов волокон с 0.84 до 0.72–0.74 и увеличению собственной прочности волокон по показателю нулевой разрывной длины на 10–12%. В то же время наблюдается повышение грубости полученных вторичных волокон со 190 мг/м до 230–235 мг/м, приводящее к некоторому ухудшению способности волокон к уплотнению во влажном состоянии и снижению их когезионной способности по показателю энергии внутренних связей по Скотту в среднем на 8%. Применение активаторов роспуска на основе персульфатов способствует улучшению оптических свойств бумаги из вторичных волокон, которое выражается в повышении ее белизны на величину до 3% и улучшении цветовых характеристик бумаги.

Ключевые слова: бумага санитарно-гигиенического назначения, роспуск, персульфаты, активация, вторичные волокна, свойства.

Введение

Особенностью композиционного состава влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения, как отмечено в первой части исследования [1], является наличие полиамидамин-эпихлоргидриновой смолы, которая придает бумаге необходимые эксплуатационные свойства за счет значительного повышения прочности во влажном состоянии, но в следствие этого существенно затрудняет процесс переработки ее технологических отходов. Начальной стадией механохимической переработки отходов влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения является ее роспуск на волокна в водной среде в гидроразбивателе в особых температурных и щелочных условиях и присутствии специальных химикатов, например, персульфатов [2–5], выполняющих роль активаторов процесса дезинтеграции вторичных влагопрочных материалов. Данный процесс протекает в результате комплексного механического воздействия на материал гидродинамических усилий сдвига, возникающих при турбулентном движении массы, сил трения между волокнами и/или неразволокненными фрагментами и непосредственных механических нагрузок на распуска-

Пенкин Антон Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель декана факультета технологии органических веществ, доцент кафедры химической переработки древесины, e-mail: penkin@belstu.by

Казаков Яков Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств, e-mail: j.kazakov@narfu.ru

емый материал со стороны активных элементов гидроразбивателя [6–8].

Наряду с достижением требуемой степени дезинтеграции волокнистого материала длительное механическое воздействие при повышенной

* Автор, с которым следует вести переписку.

температуре и рН, характерное для роспуска влагопрочной макулатуры [9–11], может являться причиной изменения морфологических свойств волокон вследствие возникновения различного рода локальных деформаций (перегибов, морщин и пр.), приводящих к излому вторичных волокон [12–16]. Персульфаты как активаторы процесса роспуска влагопрочной макулатуры значительно сокращают его продолжительность [2, 3, 9] и с этой точки зрения оказывают положительное влияние на морфологические свойства волокон, снижая уровень накопленного механического воздействия на них. С другой стороны, персульфаты являются химическими агентами с выраженными окислительными свойствами [17–19], поэтому наряду с прямой окислительной деструкцией отвержденной влагопрочной смолы [2, 3, 20], они также способны оказывать побочное химическое воздействие на структурные компоненты клеточной стенки волокон и приводить к изменению их морфологических, прочностных и оптических свойств. Таким образом, персульфаты могут оказывать неоднозначное влияние на комплекс основных свойств получаемых вторичных волокон.

Несмотря на то, что первые научные исследования, показавшие возможность активации процесса роспуска влагопрочной макулатуры персульфатами, были опубликованы достаточно давно [2, 3], вопросы о влиянии условий роспуска с использованием персульфатов на свойства вторичных волокон до настоящего времени являются мало изученными. В основном авторы имеющихся немногочисленных исследований [2, 3] уделяют внимание прочностным свойствам бумаги, сравнивая сопротивление разрыву или разрывную длину лабораторных образцов с аналогичными показателями для исходного волокнистого сырья, при этом персульфаты используются совместно с щелочной обработкой массы при роспуске. Таким образом, вклад в изменение свойств вторичных волокон со стороны химических активаторов роспуска влагопрочной макулатуры, в частности, персульфатов, в условиях совместной активации процесса (персульфаты + щелочная обработка массы) является невыясненным. В недавней работе [21] исследуется безножевой размол вторичного волокна, полученного из влагопрочной макулатуры с использованием предварительной гидротермической обработки (варки) измельченного сырья в щелочной среде в присутствии 2–6% персульфатов в течение 1–3 ч. перед роспуском. При этом основное внимание уделяется исследованию морфологических свойств волокон – длине, ширине, фактору формы волокон в зависимости от параметров процесса варки макулатуры (а не роспуска), а также процессу безножевого размола.

Цель работы – комплексное исследование морфологических, прочностных и оптических свойств вторичных волокон, полученных при роспуске влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения в присутствии персульфатов.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследований использованы промышленные образцы влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения, композиционный состав по волокну которой представлен 100% белой сульфатной хвойной целлюлозы. Роспуск влагопрочного сырья осуществлялся в лабораторном гидроразбивателе, процедура роспуска описана в первой части исследования. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 1.

В соответствии с рисунком 1 роспуск влагопрочного сырья в гидроразбивателе проводили по двум основным режимам – в режиме длинного цикла и режиме короткого цикла.

Как показано в первой части исследования [1], дезинтеграция влагопрочной бумаги с использованием в качестве метода интенсификации роспуска только щелочной обработки массы (60 °С, рН=10.5) протекает достаточно медленно. Этим обусловлена необходимость использования длинного цикла роспуска, продолжительность которого составила 120 мин (вариант №1). Установлено [1], что применение персульфатов в условиях щелочной обработки массы способствует значительному росту константы скорости дезинтеграции влагопрочной бумаги при роспуске, что позволяет существенно сократить его продолжительность и осуществить роспуск в режиме короткого цикла. Для варианта №4 продолжительность роспуска составила 60 мин, для варианта №5 – 40 мин. Сравнение свойств волокон, полученных по вариантам №1 с вариантами №4 и 5, позволяет оценить общий технический эффект от ускоренного роспуска влагопрочной бумаги за счет использования персульфатов со щелочным активированием процесса.

В качестве дополнительных вариантов роспуска по длинному циклу использовано два варианта, эквивалентных по продолжительности основному, но отличающихся наличием персульфатов в исходном и химически активированном виде – варианты №2 и №3 соответственно. Использование данных вариантов роспуска позволяет выяснить вклад в изменение свойств вторичных волокон, вносимый персульфатами в

условиях совместной активации процесса (сравнение вариантов №1 с вариантами №2 и 3). Сравнение свойств волокон, полученных по вариантам №2 и 3 с вариантами №4 и 5, позволяет оценить эффект от сокращения продолжительности роспуска.

Дороспуск полученной волокнистой массы по всем экспериментальным вариантам осуществляли в лабораторной дисковой мельнице с установленной величиной зазора между статорным и роторным дисками в 0.7 мм до достижения остаточного содержания неразволокненных фрагментов в массе не более 0.1%. Мягкий размол волокнистой массы от исходной степени помола в 24°ШР до конечной степени помола в 36°ШР проводили также в лабораторной дисковой мельнице, но при величине зазора между дисками в 0.5 мм.

Для расширенной количественной оценки морфологических свойств вторичных волокон [22] использован оптический анализатор L&W Fiber Tester и собственное дополнительное программное обеспечение [23]. Принцип работы данного автоматического прибора основан на анализе цифровых изображений, полученных в поляризованном свете, для сильно разбавленной волокнистой суспензии при прохождении ею через стеклянную измерительную ячейку прибора. Конструктивной особенностью измерительной ячейки анализатора L&W Fiber Tester является то, что она позволяет реализовать движение волокнистой суспензии в виде тонкого и плоского ламинарного потока без закупоривания ячейки волокнами. Благодаря этому становится возможным выполнять двумерные измерения волокон без их искусственной деформации и с очень высокой точностью. По каждому варианту получения волокнистой массы проведено 3 параллельных измерения характеристик волокон в соответствии со стандартом ISO 16065-1, при этом анализу в каждой из проб подвергалось суммарно до 20 тыс. волокнистых элементов (собственно волокон и частиц волокнистой мелочи).

Для характеристики собственной прочности вторичных волокон использован показатель нулевой разрывной длины бумаги [24], значения которого были определены с помощью разрывной машины Pulmac Zero Span Tensile Tester в соответствии со стандартом TAPPI T 231. Данные о показателях, характеризующих прочность бумаги при разрыве, были получены с использованием горизонтальной разрывной машины L&W Tensile Tester в соответствии с ISO 1924-3:2005. Когезионную способность вторичных волокон характеризовали показателем энергии внутренних связей по Скотту, который определяли в соответствии со стандартом TAPPI T 569.

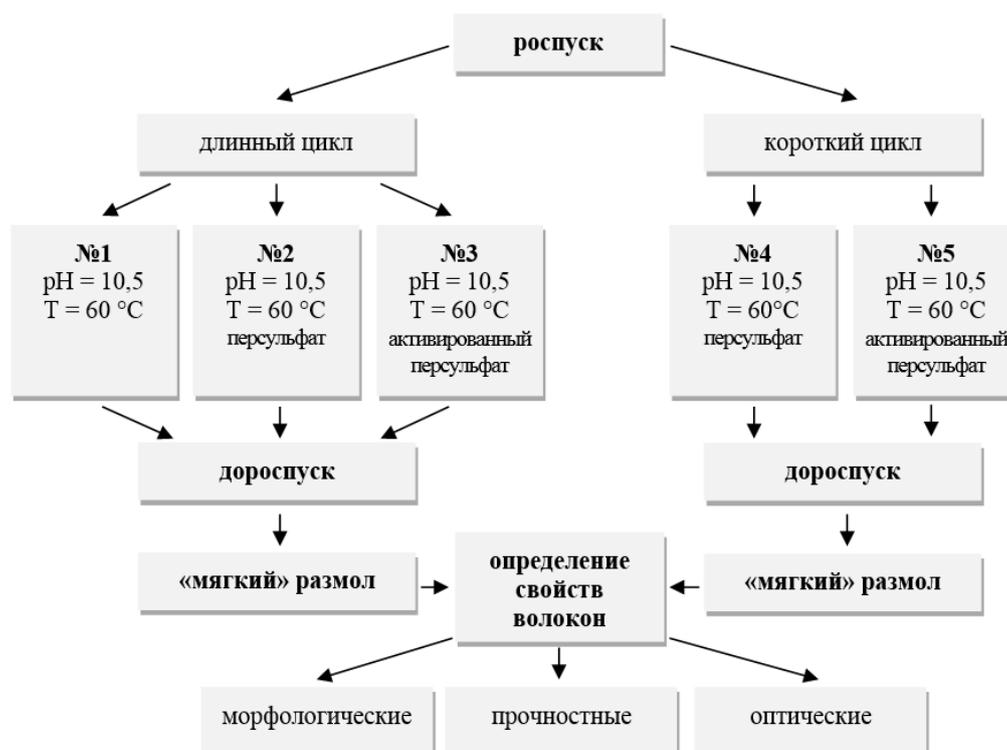


Рис. 1. Структурная схема проведения экспериментальных исследований

Для оценки оптических свойств вторичных волокон осуществляли измерение показателей цвета и белизны бумаги с помощью фотометра «Колир». Цвет бумаги определен в равноконтрастной колориметрической системе CIE $L^*a^*b^*$, рекомендованной Международной комиссией по освещению CIE (фр. Commission Internationale de l'Eclairage) [25]. Для этого осуществляли перевод координат цвета X, Y, Z неравноконтрастной системы CIE XYZ, полученных с помощью фотометра, в рекомендуемые координаты цвета L^*, a^*, b^* в соответствии со стандартом TAPPI T 527. Описание цвета бумаги координатами данной равноконтрастной колориметрической системы позволяет осуществить количественную оценку цветовых различий между различными экспериментальными вариантами.

Обсуждение результатов

Внешний вид вторичных волокон, полученных при различных режимах роспуска влагопрочной бумаги в сравнении с первичными волокнами исходной сульфатной хвойной целлюлозы, представлен на рисунке 2.

Из представленных на рисунке 2 фотографий сильноразбавленных волокнистых суспензий, полученных с помощью оптического микроскопа в проходящем свете, видно, что вторичные волокна из влагопрочной макулатуры для всех использованных режимов роспуска очень близки по внешнему виду к волокнам исходной хвойной беленой целлюлозы. В образцах №1, 2 и 3 (длинный цикл роспуска) визуально наблюдается несколько большее количество вторичной мелочи, образовавшейся при длительном роспуске и последующем «мягком» размоле.

На рисунке 3 приведена количественная характеристика морфологических свойств вторичных волокон в виде распределения по двум важнейшим размерным показателям, таким как длина и ширина волокон. Представленные распределения учитывают все волокнистые элементы массы – собственно волокна и волокнистую мелочь, представляющую собой в соответствии с ISO 16065-1 частицы с длиной менее 0.2 мм. Средневзвешенные по длине значения длины и ширины получены после исключения из расчетов мелочи и характеризуют основные волокнистые элементы – волокна.

Как следует из рисунка 3, распределение длины и ширины волокон, а также их средневзвешенные по длине значения ($L_1^1-L_1^5$ и $W_1^1-W_1^5$ соответственно), остаются практически неизменными независимо от режима роспуска влагопрочной бумаги и присутствия активаторов роспуска.

На рисунке 4 показано влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на показатели, характеризующие деформированность полученных вторичных волокон, – фактор формы и число изломов волокон в расчете на одно волокно.

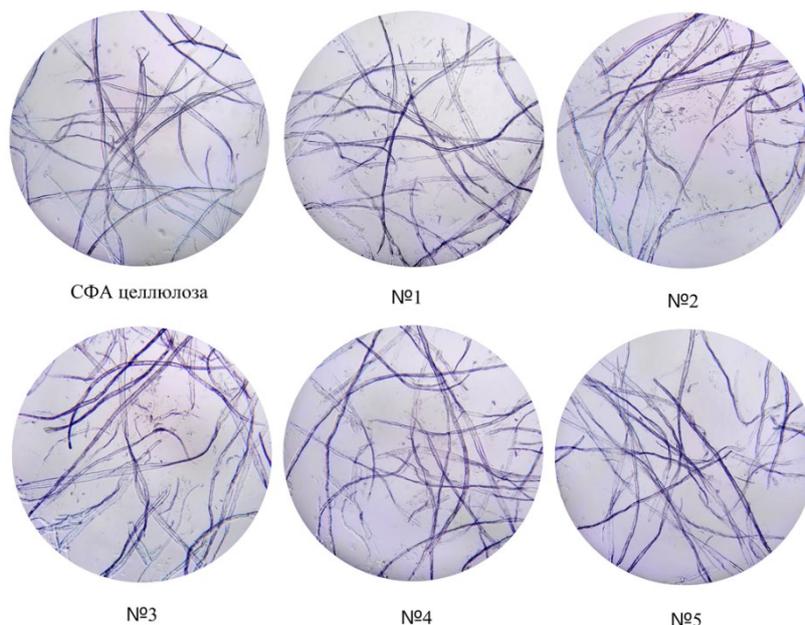


Рис. 2. Внешний вид вторичных волокон, полученных при различных режимах роспуска влагопрочной бумаги

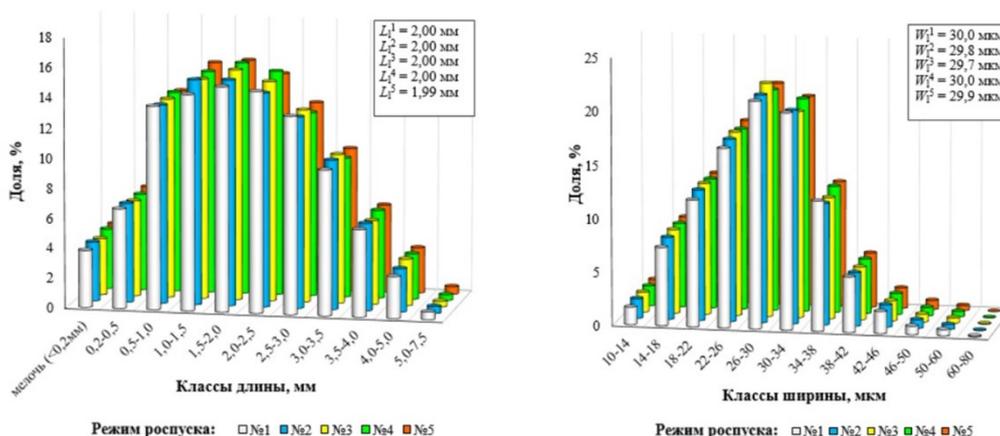


Рис. 3. Влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на длину и ширину полученных вторичных волокон

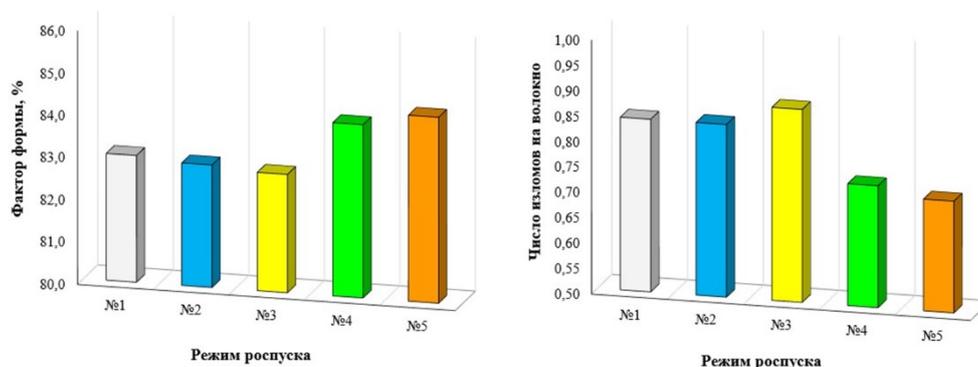


Рис. 4. Влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на фактор формы и число изломов волокон

При сравнении данных рисунка 4 о морфологических характеристиках волокон, полученных по режиму №1, с данными по режиму №2 и 3 видно, что применение персульфатов в условиях щелочной обработки массы практически не приводит к повышению степени деформированности полученных вторичных волокон. Так, средний фактор формы волокон по варианту №1 составляет 83,0%, по варианту №2 – 82,9%, по варианту №3 – 82,9%. Максимальный относительный рост числа изломов на волокно составляет менее 5% (сравнение данных по режимам №1 и 3). По-видимому, персульфаты в условиях даже длительной щелочной обработки волокнистой массы оказывают очень слабое побочное химическое воздействие на стенку волокон, которое практически не сопровождается ее ослаблением и, как следствие, снижением прямизны волокон.

Сокращение продолжительности роспуска влагопрочной бумаги, достигаемое за счет персульфатов в исходном и химически активированном виде (сравнение данных по режиму №2 и 3 с данными по режиму №4 и 5 соответственно), способствует существенному улучшению морфологических характеристик вторичных волокон: средний фактор формы увеличивается с 82,9 до 84,1–84,4%, число изломов на волокно снижается с 0,84–0,88 до 0,72–0,74. Таким образом, положительный вклад персульфатов, как активаторов роспуска, в повышение прямизны и снижение числа изломов волокон достигается за счет превалирования более значимого положительного эффекта от сокращения продолжительности роспуска вследствие их использования над несущественным эффектом от их побочного химического воздействия на волокна.

В целом, результатом сокращенного роспуска влагопрочной бумаги с применением персульфатов в условиях щелочной обработки массы является повышение фактора формы с 83,0 до 84,1–84,4% и снижение числа изломов волокон с 0,84 до 0,72–0,74 (сравнение данных по режимам роспуска №1 с №4 и 5).

На рисунке 5 показано влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на нулевую разрывную длину и нормальную разрывную длину бумаги, полученной из вторичных волокон, а также взаимосвязь этих показателей с фактором формы волокон.

На основании сравнительного анализа представленных выше данных по нулевой разрывной длине для режимов роспуска №1, 2 и 3 с учетом коэффициента вариации показателя (не более 3%) можно считать, что вторичные волокна, полученные в присутствии персульфатов, обладают собственной прочностью, эквивалентной прочности волокон без использования персульфатов. Это свидетельствует о слабом или практически отсутствующем побочном воздействии персульфатов на основные компоненты клеточной стенки вторичных волокон.

Сравнение данных по нулевой разрывной длине для режимов роспуска №1 с данными по режиму №4 и 5 показывает, что сокращение продолжительности роспуска влагопрочной бумаги, достигаемое за счет использования персульфатов, способствует повышению собственной прочности волокон на 10–12%. Аналогичное заключение можно сделать и для нормальной разрывной длины бумаги. Основной причиной этого, на наш взгляд, является значительное снижение степени деформированности волокон по сравнению с более продолжительным роспуском влагопрочной макулатуры в случае применения в качестве метода активации только щелочной обработки массы. Данные рисунка 5 подтверждают, что чем выше фактор формы вторичных волокон, тем больше значения разрывной длины. Это хорошо согласуется с литературными сведениями [15] для хвойной целлюлозы, согласно которым повышение фактора формы первичных волокон с 81.3 до 84.6% приводит к существенному росту прочности бумаги при растяжении. Наблюдаемое увеличение нулевой разрывной длины за счет уменьшения числа изломов вторичных волокон также соответствует аналогичному выводу, сделанному для первичных волокон в виде хвойной сульфатной целлюлозы в работе [26].

На рисунке 6 показано влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на энергию внутренних связей по Скотту во взаимосвязи с пухлостью бумаги и грубостью вторичных волокон.

Как следует из рисунка 6, применение персульфатов при роспуске влагопрочной бумаги сопровождается уменьшением энергии внутренних связей по Скотту с 730 (№1) до 665–675 Дж/м² (№4 и 5) или приблизительно на 8%, при этом коэффициент вариации показателя энергии внутренних связей по Скотту составил не более 5%. Основной причиной этого, на наш взгляд, является ухудшение способности вторичных волокон к уплотнению во влажном состоянии, о чем свидетельствует некоторое повышение пухлости полученных отливок в случае роспуска исходной влагопрочной бумаги с использованием персульфатов, особенно в случае короткого цикла роспуска (режимы №4 и 5). Коэффициент вариации показателя пухлости составил не более 3%. На повышение пухлости листа очевидно влияет изменение грубости вторичных волокон, которая возрастает со 190 мг/м (режим №1) до 230–235 мг/м при использовании персульфатов по короткому циклу роспуска (режимы №4 и 5).

Таким образом, ускоренный роспуск влагопрочной бумаги за счет применения в качестве активаторов роспуска персульфатов сопровождается одновременным повышением собственной прочности волокон по показателю нулевой разрывной длины на 10–12% и снижением их когезионной способности по показателю энергии внутренних связей по Скотту в среднем на 8%. Это находит свое закономерное отражение в менее интенсивном увеличении нормальной разрывной длины бумаги по сравнению с нулевой разрывной длиной (рис. 5), поскольку нормальная разрывная длина бумаги зависит от когезионной способности и собственной прочности волокон интегрально, а нулевая разрывная длина определяется в основном только прочностью самих волокон.

В таблице приведены оптические свойства бумаги из вторичных волокон, полученных по различным режимам роспуска. На рисунке 7 представлены данные о цветоразличии ΔE и изменении координаты цвета b^* , характеризующей желтизну бумаги, для всех режимов роспуска с использованием персульфатов относительно режима роспуска №1, то есть без их применения.

Из таблицы следует, что применение активаторов роспуска на основе персульфатов способствует повышению белизны бумаги на величину до 3% и уменьшению координаты цвета b^* . Как следует из рисунка 7, а также таблицы, значения координаты цвета a^* изменяются мало, значения Δb^* находятся в отрицательной области (до -0.9), что говорит об уменьшении желтизны бумаги [25], а значения цветоразличия ΔE – в положительной (до 1.2). Последнее обусловлено двумя факторами – смещением цвета бумаги в более предпочтительную синюю область спектра и увеличением яркости такого цвета.

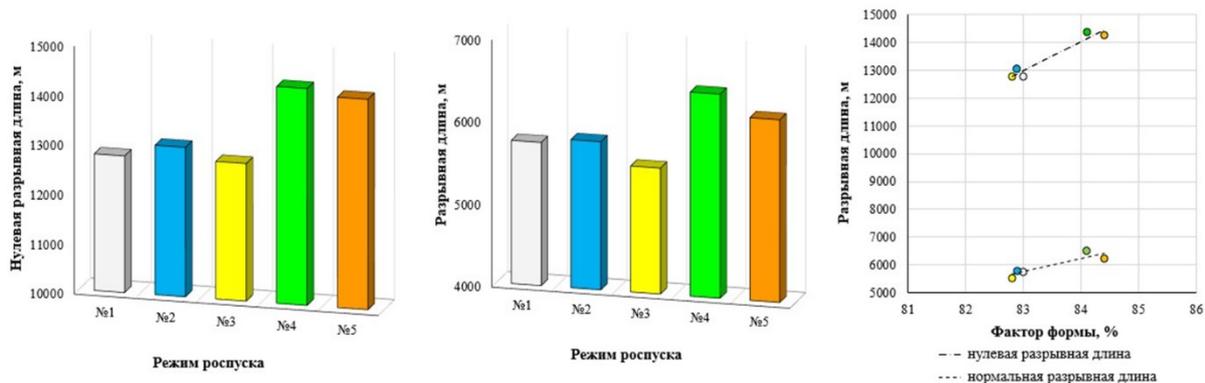


Рис. 5. Влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на нулевую разрывную длину и нормальную разрывную длину бумаги, полученной из вторичных волокон

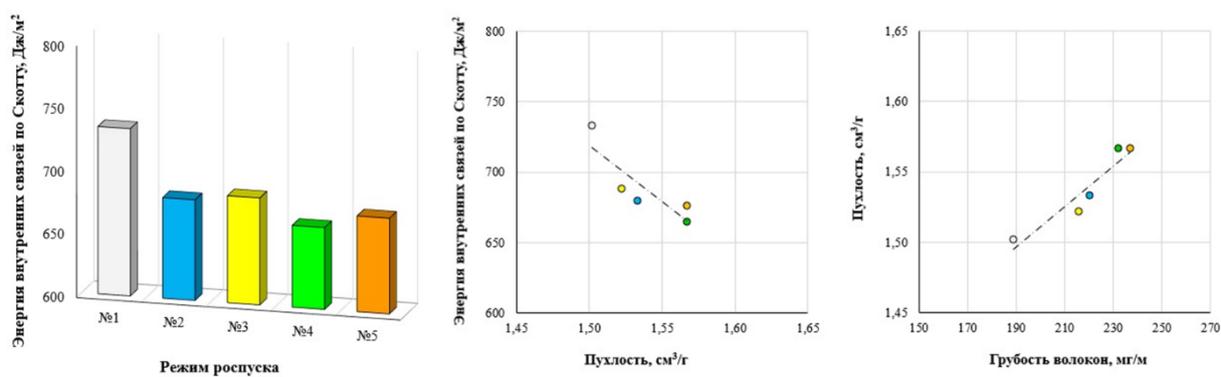


Рис. 6. Влияние режимов роспуска влагопрочной бумаги на энергию внутренних связей по Скотту, пухлость бумаги и грубость вторичных волокон

Оптические свойства бумаги из вторичных волокон

Режим роспуска	Белизна, %	Колориметрическая система					
		CIE XYZ			CIE $L^*a^*b^*$		
		X	Y	Z	L^*	a^*	b^*
№1	79.4	83.4	85.2	93.2	94.0	-0.5	4.9
№2	81.2	85.2	87.2	95.6	94.8	-0.6	4.8
№3	82.2	85.5	87.5	96.6	94.9	-0.6	4.3
№4	81.4	85.0	87.0	95.7	94.7	-0.5	4.5
№5	82.3	85.2	87.2	96.7	94.8	-0.6	4.0

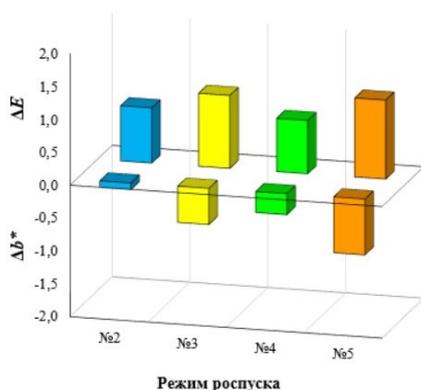


Рис. 7. Влияние режима роспуска влагопрочной макулатуры на ΔE и Δb^*

Заключение

При исследовании морфологических, прочностных и оптических свойств вторичных волокон, полученных при различных режимах роспуска влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения из 100% беленой сульфатной хвойной целлюлозы, установлено, что внешний вид, распределение длины и ширины волокон, а также их средневзвешенные по длине значения остаются практически неизменными независимо от использованной в ходе эксперимента продолжительности роспуска влагопрочной бумаги и присутствия активаторов роспуска. Результатом сокращенного роспуска влагопрочной бумаги с применением персульфатов в условиях щелочной обработки массы является повышение фактора формы с 83.0 до 84.1–84.4% и снижение числа изломов волокон с 0.84 до 0.72–0.74, что нашло отражение в увеличении собственной прочности волокон по показателю нулевой разрывной длины на 10–12%.

В то же время ускоренный роспуск влагопрочной бумаги за счет применения персульфатов приводит к повышению грубости полученных вторичных волокон со 190 до 230–235 мг/м и, как следствие, к некоторому ухудшению способности волокон к уплотнению во влажном состоянии и снижению их когезионной способности по показателю энергии внутренних связей по Скотту в среднем на 8%.

Применение активаторов роспуска на основе персульфатов способствует улучшению оптических свойств бумаги из вторичных волокон, которое выражается в повышении ее белизны на величину до 3%, а также в смещении цвета бумаги в более предпочтительную синюю область спектра и увеличению яркости такого цвета – Δb^* и ΔE составляют -0.9 и 1.2 соответственно.

Список литературы

1. Пенкин А.А. Рециклинг влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения. Часть 1. Кинетика дезинтеграции вторичного сырья при роспуске // *Химия растительного сырья*. 2022. №1. С. 355–365. DOI: 10.14258/jcprm.2022019893.
2. Espy H.H., Geist W.G. Persulfates as repulping reagents for neutral/alkaline wet-strength broke // *TAPPI Journal*. 1993. Vol. 76. N2. Pp. 139–141.
3. Fischer A.S. Repulping wet-strength paper // *TAPPI Journal*. 1997. Vol. 80. N11. Pp. 141–147.
4. Gigac J., Fiserova M., Osvaldik Z. Recycling of wet-strength paper // *Wood research*. 2005. Vol. 50. N3. Pp. 73–84.
5. Алашкевич Ю.Д., Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В. Переработка влагопрочной макулатуры с полимерным покрытием. 1. Роспуск макулатуры // *Химия растительного сырья*. 2019. №4. С. 399–405. DOI: 10.14258/jcprm.2019045486.
6. Saville F., Martinez M., Olson J. Energy and paper recycling: modelling the time and energy requirements for low consistency batch repulping // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 94. Pp. 446–453. DOI: 10.1002/CJCE.22421.
7. Ковалёва О.П. Гидроразбиватели макулатурного сырья // *ЛесПромИнформ*. 2007. №8 (48). С. 104–107.
8. Дулькин Д.А., Южанинова Л.А., Миронова В.Г., Спиридонов В.А. Научные основы переработки макулатуры // *Лесной журнал*. 2005. №1–2. С. 105–122.
9. Siqueira E., Naoui W., Marlin N., Schott S., Mauret E. Effect of chemical additives on the degradation of polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) films and PAE based papers made from bleached kraft pulps // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 2013. Vol. 28. N4. Pp. 529–540. DOI: 10.3183/npprj-2013-28-04-p529-540.
10. Su J., Mosse K.J.W., Sharman S., Batchelor W., Garnier G. Paper strength development and recyclability with polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) // *BioResources*. 2012. Vol. 7. N1. Pp. 913–924. DOI: 10.15376/BIORES.7.1.0913-0924.
11. Пузырёв С.С., Логинова Т.В., Ковалева О.П. Особенности переработки трудноразволокняемой макулатуры // *Целлюлоза. Бумага. Картон*. 2006. №10. С. 40–44.
12. Chen Z., Song Z., Qian X., Shen J. Repulping high wet-strength waste banknote paper by a dual-pH pretreatment process // *BioResources*. 2012. Vol. 7. N3. Pp. 3701–3710.
13. Kouko J., Jajcinovic M., Fischer W., Ketola A., Hirn U., Retulainen E. Effect of mechanically induced micro deformations on extensibility and strength of individual softwood pulp fibers and sheets // *Cellulose*. 2019. Vol. 26. Pp. 1995–2012. DOI: 10.1007/s10570-018-2163-y.
14. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review // *BioResources*. 2007. Vol. 2. N4. Pp. 739–788. DOI: 10.15376/BIORES.2.4.739-788.
15. Karlsson H., Rinnevu T. Fibre guide: fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry: a handbook. Kista: AB Lorentzen & Wettre, 2006. 120 p.
16. Seth R.S. The importance of fibre straightness for pulp strength // *Pulp and Paper Canada*. 2006. Vol. 107. N1. Pp. 34–42.
17. Wang J., Wang S. Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 334. Pp. 1502–1517. DOI: 10.1016/j.cej.2017.11.059.

18. Guerra-Rodriguez S., Rodriguez E., Singh D.N., Rodriguez-Chueca J. Assessment of sulfate radical-based advanced oxidation processes for water and wastewater treatment: a review // *Water*. 2018. Vol. 10. N12. 1828. DOI: 10.3390/w10121828.
19. Lee C., Kim H.-H., Park N.-B. Chemistry of persulfates for the oxidation of organic contaminants in water // *Membrane Water Treatment*. 2018. Vol. 9. N6. Pp. 405–419. DOI: 10.12989/mwt.2018.9.6.405.
20. Yang D., Sotra A., Pelton R.H. Switching of PAE wet strength // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 2019. Vol. 34. N1. Pp. 88–95. DOI: 10.1515/npprj-2018-0074.
21. Алашкевич Ю.Д., Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В., Кожухов В.А., Воронин И.А. Переработка влагопрочной макулатуры с полимерным покрытием. Сообщение 2. Свойства вторичного волокна // *Химия растительного сырья*. 2020. №2. С. 365–371. DOI: 10.14258/jcprm.2020025638.
22. Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. Pp. 12572–12578. DOI: 10.1021/ie201631q.
23. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // *Химия растительного сырья*. 2014. №1. С. 269–275. DOI: 10.14258/jcprm.1401269.
24. Zeng X., Retulainen E., Heinemann S., Fu S. Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 2012. Vol. 27. N2. Pp. 335–342. DOI: 10.3183/npprj-2012-27-02-p335-342.
25. Cortez R., Luna-Vital D. A., Margulis D., Gonzalez de Mejia E. Natural pigments: stabilization methods of anthocyanins for food applications // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017. Vol. 16. Pp. 180–198. DOI: 10.1111/1541-4337.12244.
26. Martín-Sampedro R., Rodríguez A., Eugenio M. Improvement of TCF bleaching of olive tree pruning residue pulp by addition of a laccase and/or xylanase pre-treatment // *BioResources*. 2012. Vol. 7. N2. Pp. 1488–1503. DOI: 10.15376/biores.7.2.1488-1503.

Поступила в редакцию 19 октября 2021 г.

После переработки 17 ноября 2021 г.

Принята к публикации 23 ноября 2021 г.

Для цитирования: Пенкин А.А., Казаков Я.В. Рециклинг влагопрочной бумаги санитарно-гигиенического назначения. Часть 2. Основные свойства вторичных волокон // *Химия растительного сырья*. 2022. №2. С. 323–332. DOI: 10.14258/jcprm.20220210501.

Penkin A.A.^{1}, Kazakov Ya.V.² RECYCLING OF WET-STRENGTH TISSUE PAPER. PART 2. BASIC PROPERTIES OF SECONDARY FIBERS*

¹ *Belarusian state technological university, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006 (Republic of Belarus), e-mail: penkin@belstu.by*

² *Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 (Russia)*

The present investigation focuses on morphological characteristics, tensile and optical properties of secondary fibers obtained in various conditions of batch low-consistency repulping process for wet-strength tissue paper with 100% of bleached softwood kraft pulp. It was found that length-weighted fiber length and fiber width values as well as fiber length and fiber width distributions remained almost unchanged regardless of the repulping time and the presence of persulfates. The shortened repulping cycle due to the use of persulfates lead to an increase in the shape factor from 83.0% to 84.1–84.4%, decrease in the number of fiber kinks from 0.84 to 0.72–0.74 and an increase in zero-span tensile strength of recycled handsheets by 10–12%. At the same time, the shortened repulping cycle resulted in increase in the coarseness of secondary fibers from 190 mg/m to 230–235 mg/m leading to a slight increase in the bulk of the paper and a decrease in its internal bond strength by an average of 8%. The use of persulfates during wet-strength tissue paper repulping improves the color of recycled handsheets and its brightness by up to 3%.

Keywords: wet-strength tissue paper, repulping, persulfates, chemical activation, secondary fibers, properties.

* Corresponding author.

Referenses

1. Penkin A.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 1, pp. 355–365. DOI: 10.14258/jcprm.2022019893. (in Russ.).
2. Espy H.H., Geist W.G. *TAPPI Journal*, 1993, vol. 76, no. 2, pp. 139–141.
3. Fischer A.S. *TAPPI Journal*, 1997, vol. 80, no. 11, pp. 141–147.
4. Gigac J., Fiserova M., Osvaldik Z. *Wood research*, 2005, vol. 50, no. 3, pp. 73–84.
5. Alashkevich Yu.D., Pen R.Z., Karetnikova N.V., Chendylova L.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 4, pp. 399–405. DOI: 10.14258/jcprm.2019045486. (in Russ.).
6. Saville F., Martinez M., Olson J. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2016, vol. 94, pp. 446–453. DOI: 10.1002/CJCE.22421.
7. Kovalova O.P. *LesPromInform*, 2007, no. 8 (48), pp. 104–107. (in Russ.).
8. Dul'kin D.A., Yuzhaninova L.A., Mironova V.G., Spiridonov V.A. *Lesnoy zhurnal*, 2005, no. 1–2. pp. 105–122. (in Russ.).
9. Siqueira E., Naoui W., Marlin N., Schott S., Mauret E. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2013, vol. 28, no. 4, pp. 529–540. DOI: 10.3183/npprj-2013-28-04-p529-540.
10. Su J., Mosse K.J.W., Sharman S., Batchelor W., Garnier G. *BioResources*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 913–924. DOI: 10.15376/BIORES.7.1.0913-0924.
11. Puzyrov S.S., Loginova T.V., Kovaleva O.P. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2006, no. 10, pp. 40–44. (in Russ.).
12. Chen Z., Song Z., Qian X., Shen J. *BioResources*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 3701–3710.
13. Kouko J., Jajcinovic M., Fischer W., Ketola A., Hirn U., Retulainen E. *Cellulose*, 2019, vol. 26, pp. 1995–2012. DOI: 10.1007/s10570-018-2163-y.
14. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. *BioResources*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 739–788. DOI: 10.15376/BIORES.2.4.739-788.
15. Karlsson H., Rinnevuoto T. *Fibre guide: fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry: a handbook*. Kista: AB Lorentzen & Wettre, 2006, 120 p.
16. Seth R.S. *Pulp and Paper Canada*, 2006, vol. 107, no. 1, pp. 34–42.
17. Wang J., Wang S. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 334, pp. 1502–1517. DOI: 10.1016/j.cej.2017.11.059.
18. Guerra-Rodriguez S., Rodriguez E., Singh D.N., Rodriguez-Chueca J. *Water*, 2018, vol. 10, no. 12, 1828. DOI: 10.3390/w10121828.
19. Lee C., Kim H.-H., Park N.-B. *Membrane Water Treatment*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 405–419. DOI: 10.12989/mwt.2018.9.6.405.
20. Yang D., Sotra A., Pelton R.H. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 88–95. DOI: 10.1515/npprj-2018-0074.
21. Alashkevich Yu.D., Pen R.Z., Karetnikova N.V., Chendylova L.V., Kozhukhov V.A., Voronin I.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 2, pp. 365–371. DOI: 10.14258/jcprm.2020025638. (in Russ.).
22. Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, pp. 12572–12578. DOI: 10.1021/ie201631q.
23. Kazakov Ya.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2014, no. 1, pp. 269–275. DOI: 10.14258/jcprm.1401269. (in Russ.).
24. Zeng X., Retulainen E., Heinemann S., Fu S. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2012, vol. 27, no. 2, pp. 335–342. DOI: 10.3183/npprj-2012-27-02-p335-342.
25. Cortez R., Luna-Vital D.A., Margulis D., Gonzalez de Mejia E. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, vol. 16, pp. 180–198. DOI: 10.1111/1541-4337.12244.
26. Martín-Sampedro R., Rodríguez A., Eugenio M. *BioResources*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 1488–1503. DOI: 10.15376/biores.7.2.1488-1503.

Received October 19, 2021

Revised November 17, 2021

Accepted November 23, 2021

For citing: Penkin A.A., Kazakov Ya.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 323–332. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220210501.