

УДК 676.038:676.017.44

**А. А. Пенкин<sup>1</sup>, Я. В. Казаков<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ВТОРИЧНЫХ ВОЛОКОН,  
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РОСПУСКЕ ВЛАГОПРОЧНОЙ МАКУЛАТУРЫ**

Влагопрочная макулатура ввиду непрерывно возрастающей технико-экономической и социально-экологической целесообразности ее переработки является перспективным источником вторичных волокон. Роспуск влагопрочной макулатуры как первичная стадия ее рециклинга имеет ряд особенностей по сравнению с обычной, невлагопрочной макулатурой: существенно большую продолжительность, повышенную температуру и рН макулатурной массы в ванне гидроразбивателя, присутствие специальных окислительных реагентов. Особые условия роспуска влагопрочной макулатуры находят свое отражение в изменении фундаментальных свойств получаемых вторичных волокон, которые определяют их бумагообразующий потенциал. В связи с этим в статье выполнена комплексная оценка 5 фундаментальных свойств вторичных волокон из макулатуры в виде влагопрочной бумаги на основе сульфатной беленой хвойной целлюлозы.

Установлено, что средняя длина волокон ( $L_n, L_l, L_w, L_v$ ) является практически индифферентной по отношению к двух- и трехкратному сокращению продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры, достигаемому за счет ее специальной реагентно-щелочной обработки.

Показано, что собственная прочность вторичных волокон, полученных при ускоренном роспуске влагопрочной макулатуры в результате реагентно-щелочной обработки, при аналогичной степени помола (24°ШР) в среднем на 11% выше прочности волокон, полученных при более длительной щелочной обработке. При этом способность вторичных волокон к уплотнению во влажном состоянии и их когезионная способность уменьшаются незначительно – на 5 и 8% соответственно, а грубость вторичных волокон возрастает со 171 до 193–213 мг/м.

**Ключевые слова:** влагопрочная макулатура, роспуск, вторичные волокна, фундаментальные свойства.

**Для цитирования:** Пенкин А. А., Казаков Я. В. Фундаментальные свойства вторичных волокон, полученных при роспуске влагопрочной макулатуры // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С. 80–88.

**А. А. Penkin<sup>1</sup>, Ya. V. Kazakov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov**PRINCIPAL PROPERTIES OF SECONDARY FIBERS  
OBTAINED BY WET-STRENGTH PAPER REPULPING**

Wet-strength recovered paper, due to the continuous growth of economic, social and environmental significance of its recycling, is becoming an important source of secondary fiber. Repulping of wet-strength paper, as the primary stage of its recycling process, has a number of features in comparison with ordinary recovered paper: a much longer repulping time, higher temperature and pH, the usage of oxidizing reagents. The special conditions for the repulping of wet-strength paper affect the principal properties of the secondary fibers that determine their papermaking potential. In this regard, the article contains a comprehensive assessment of the 5 principal properties of secondary fibers obtained by repulping of wet-strength paper from bleached softwood kraft pulp.

The results showed that the values of average fiber length ( $L_n, L_l, L_w, L_v$ ) were almost indifferent in relation to 2–3 times shortening of wet-strength paper repulping time due to the application of sodium persulfate or potassium monopersulfate. It was found that intrinsic strength of the secondary fibers obtained by fast oxidizer-alkaline repulping at 24°SR is on average 11% higher than the strength of fibers obtained by long alkaline repulping. At the same time, the wet fiber compactability and the fiber cohesiveness decreased insignificantly (5 and 8%, respectively), while the coarseness of fibers increased from 171 to 193–213 mg/m.

**Key words:** wet-strength paper, repulping, secondary fibers, principal properties.

**For citation:** Penkin A. A., Kazakov Ya. V. Principal properties of secondary fibers obtained by wet-strength paper repulping. *Proceeding of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 1 (253), pp. 80–88 (In Russian).

**Введение.** Высокий спрос и растущие цены на массово используемые марки макулатуры, непрерывное совершенствование экологического законодательства, необходимость рационального использования вторичных материальных ресурсов, а также расширяющаяся база вторичного влагопрочного сырья являются основными факторами, определяющими целесообразность эффективного рециклинга влагопрочной макулатуры как в настоящее время, так и в ближайшей перспективе [1, 2].

Внутренними источниками влагопрочной макулатуры в Республике Беларусь являются технологические отходы производства и переработки различных видов бумажной продукции: бумаги и изделий санитарно-гигиенического назначения, бумаги документной, бумаги упаковочной с барьерными свойствами, бумаги для изготовления обоев на флизелиновой основе, бумаги-основы декоративных облицовочных материалов [1, 2].

Все перечисленные виды бумаги содержат в своем композиционном составе полиамидамин-эпихлоргидриновую смолу. Она придает бумаге необходимую прочность во влажном состоянии и поэтому существенно затрудняет стадию роспуска ее технологических отходов в процессе рециклинга [3–5]. Последнее сопровождается снижением производительности оборудования узла роспуска и понесением дополнительных энергетических затрат. Поэтому роспуск влагопрочной макулатуры имеет ряд особенностей по сравнению с обычной, невлагопрочной макулатурой: существенно большую продолжительность, повышенную температуру и рН макулатурной массы в ванне гидроразбивателя, присутствие специальных окислительных реагентов [6–8].

Очевидно, что перечисленные особенности роспуска влагопрочной макулатуры могут оказывать влияние на главные или, так называемые, фундаментальные свойства получаемых вторичных волокон. К ним относят 5 основных свойств: среднюю длину волокон, грубость волокон, собственную прочность волокон, способность к уплотнению во влажном состоянии, когезионную способность [9].

Фундаментальные свойства вторичных волокон применительно к влагопрочной макулатуре до настоящего времени являются все еще мало освещенными в специальной научной и технической литературе, в связи с чем их комплексное исследование представляется несомненно актуальным. Определенную значимость имеет и то, что в качестве вторичного сырья авторами впервые исследована влагопрочная макулатура на основе сульфатной беленой целлюлозы, произведенной из районированного в Республике Беларусь древесного сырья на вновь

освоенном в 2017 г. единственном отечественном сульфатцеллюлозном производстве на ОАО «Светлогорский ЦКК».

Целью исследования является комплексная оценка фундаментальных свойств вторичных волокон, полученных из влагопрочной макулатуры.

**Основная часть.** В качестве влагопрочной макулатуры использована санитарно-гигиеническая бумага, состоящая из сульфатной беленой хвойной целлюлозы. Выбор объекта исследования обусловлен двумя основными причинами. Во-первых, производство тисью относится к одному из самых быстрорастущих сегментов картоно-бумажной промышленности. Так, по прогнозам до 2030 г. среднее увеличение мирового спроса на бумагу и картон в целом будет составлять около 1% в год, тогда как санитарно-гигиенических видов бумаги – около 3% в год [10]. Во-вторых, рециклинг влагопрочной бумаги из сульфатной хвойной беленой целлюлозы, являющейся дорогостоящим полуфабрикатом с высоким бумагообразующим потенциалом, имеет вследствие этого не только социально-экологическую, но и технико-экономическую целесообразность. Влагопрочность использованной бумаги составила 21%.

Роспуск влагопрочной макулатуры осуществлялся в лабораторном гидроразбивателе ЛГ-3. 3D-модель гидроразбивателя и его вид изнутри во время роспуска макулатуры представлены на рис. 1.

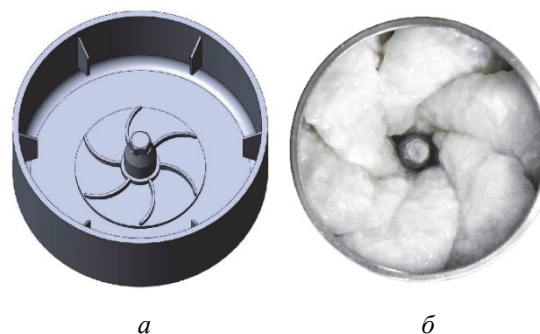


Рис. 1. Лабораторный гидроразбиватель:  
а – 3D-модель; б – вид изнутри

Для того чтобы исключить влияние на результат роспуска размеров распускаемого влагопрочного сырья, выполнялось его предварительное измельчение на прямоугольные фрагменты размером 2,5×2,5 см.

В качестве методов ускорения роспуска влагопрочной макулатуры использованы: горячая щелочная обработка массы в гидроразбивателе – контрольный вариант, реагентно-щелочная обработка массы персульфатом натрия и реагентно-щелочная обработка массы пероксомоносульфатом калия. Первый способ, судя по наблюдаемой

динамике разволокнения макулатуры, являлся наименее результативным, поэтому продолжительность роспуска по нему составила максимальное значение – 120 мин. Второй способ показал существенно большую результативность продолжительность роспуска по нему составила 60 мин, третий способ являлся наиболее результативным, продолжительность роспуска по нему составила 40 мин.

Использование для реагентной обработки влагопрочной макулатуры персульфата натрия и пероксомоносульфата калия было обусловлено тем, что они являются кислородсодержащими окислителями, которые в отличие от хлорсодержащих окислителей, например, гипохлоритов, не вызывают образования в процессе роспуска макулатуры и последующего накопления в сточных водах бумажного производства таких токсичных веществ, как тетрахлордифенилоксидин, хлороформ, адсорбируемые органические галогениды [11–13].

После основного роспуска влагопрочной макулатуры в гидроразбивателе с целью окончательного разделения на волокна остаточных фрагментов макулатуры осуществлялся дороспуск волокнистой массы в лабораторной дисковой мельнице. Степень помола готовой волокнистой массы по всем вариантам роспуска составила 24°ШР, что соответствовало степени помола исходной бумажной массы, из которой была изготовлена влагопрочная бумага.

Для расширенной количественной оценки структурно-морфологических свойств вторичных волокон, в том числе и для определения их средней длины, использован оптический анализатор L&W Fiber Tester (Lorentzen & Wettre, Швеция) [14–16], внешний вид которого представлен на рис. 2.

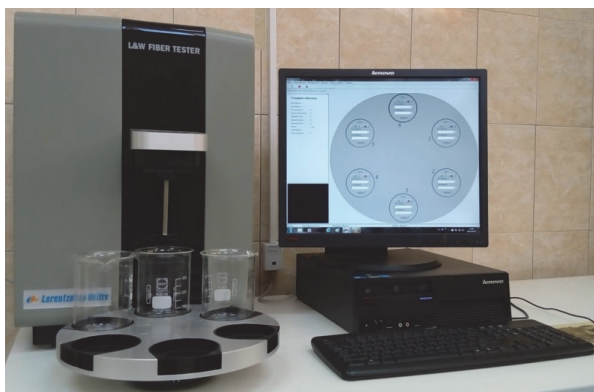


Рис. 2. Анализатор волокна L&W Fiber Tester

В основе принципа работы данного прибора лежит автоматический анализ цифровых изображений, полученных в поляризованном свете, для сильно разбавленной волокнистой суспензии

при прохождении ее через специальную измерительную ячейку прибора [14–16].

Для всех вариантов полученной волокнистой массы на анализаторе L&W Fiber Tester проведено по 3 параллельных измерения. При этом высокая достоверность каждого параллельного измерения основана на анализе большой выборки волоконистых элементов – до 20 тыс. единиц [14]. На основании автоматического анализа размерных характеристик каждого волокнистого элемента анализатор L&W Fiber Tester позволяет получить распределение волокон по длине, ширине, фактору формы (прямоизне). По полученным распределениям показателей определяются их средние величины [14–18]. Последние могут быть рассчитаны как среднеарифметические значения, но гораздо чаще рассчитываются в виде средневзвешенных значений, которые наиболее точно характеризуют фактическую длину волокон. В качестве факторов взвешивания наиболее широко используется длина и масса волокон, реже их объем [14–18]. Для всесторонней характеристики длины вторичных волокон в настоящем исследовании используются 4 показателя [15–18]:

– среднеарифметическая длина  $L_n$ :

$$L_n = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i}{\sum_{i=1}^m n_i}; \quad (1)$$

– средневзвешенная длина по длине  $L_l$ :

$$L_l = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i l_i}; \quad (2)$$

– средневзвешенная длина по массе  $L_w$ :

$$L_w = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i^3}{\sum_{i=1}^m n_i l_i^2}; \quad (3)$$

– средневзвешенная длина по объему  $L_v$ :

$$L_v = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i v_i}{\sum_{i=1}^m n_i v_i}, \quad (4)$$

где  $i$  – количество классов длин (от 1 до  $m$  классов,  $m = 10$ : 0,2–0,5 мм, 0,5–1,0 мм, 1,0–1,5 мм, 1,5–2,0 мм, 2,0–2,5 мм, 2,5–3,0 мм, 3,0–3,5 мм, 3,5–4,0 мм, 4,0–5,0 мм, 5,0–7,5 мм);  $n_i$  – количество волокон в  $i$ -том классе, шт.;  $l_i$  – средняя

длина волокон в  $i$ -том классе, мм;  $v_i$  – средний объем волокон в  $i$ -том классе (произведение квадрата ширины и длины волокон в  $i$ -том классе [15]).

Известно, что большое влияние на свойства бумаги оказывает не только длина волокон исходных полуфабрикатов, но и их форма [15, 19]. Это объясняется тем, что форма волокон отражает наличие различного рода деформаций волокон, образующихся на технологических этапах получения волокнистых полуфабрикатов, переработки их в бумагу и, наконец, рециклинга бумаги [16–18]. Использование современных оптических методов анализа структурно-морфологических свойств волокнистых полуфабрикатов, которые непосредственно реализованы в анализаторе L&W Fiber Tester, позволяет производить автоматическую оценку как размеров самих волокон, так и их формы [14–16].

Количественная оценка формы вторичных волокон выполнена с помощью показателя фактора формы  $S$ , характеризующего отсутствие деформированности или прямизну волокон [15, 20]:

$$S = \frac{l}{L} 100, \quad (5)$$

где  $l$  – проекционная длина волокна, определяемая расстоянием между его концами (диаметр Ферета), мм;  $L$  – истинная длина волокна, мм, т. е. длина вдоль его контура (рис. 3).

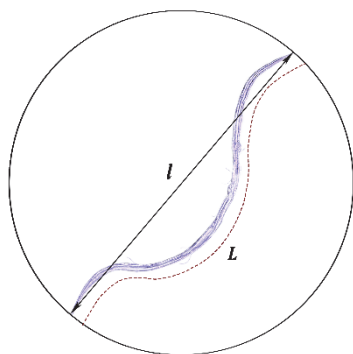


Рис. 3. К определению фактора формы волокон

Фактор формы волокон рассчитан как средневзвешенное значение по длине волокон  $S_i$  [15]:

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^m n_i l_i s_i}{\sum_{i=1}^m n_i l_i}, \quad (6)$$

где  $s_i$  – средний фактор формы волокон в  $i$ -том классе длины.

С помощью оптического анализатора L&W Fiber Tester также выполнена оценка еще одного

фундаментального свойства волокон – их грубости, представляющей собой массу волокон в единице длины [16, 18].

Для характеристики собственной прочности волокон использован широко применяемый для этой цели показатель нулевой разрывной длины [21], т. е. разрывной длины, определенной при нулевом расстоянии между зажимами разрывной машины. Измерение нулевой разрывной длины выполнено на разрывной машине Pulmac Zero Span Tensile Tester, представленной на рис. 4.

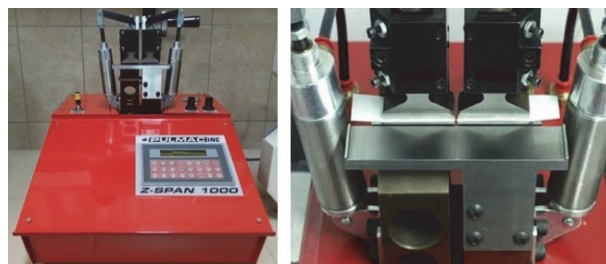


Рис. 4. Разрывная машина Pulmac Zero Span Tensile Tester: а – общий вид; б – образец после испытания

Способность вторичных волокон к уплотнению во влажном состоянии характеризуется показателем плотности лабораторных образцов бумаги  $\rho$ , которую рассчитывали исходя из массы  $1 \text{ м}^2$  и средней толщины:

$$\rho = \frac{m}{D_{\text{cp}} 1000}, \quad (7)$$

где  $m$  – массы  $1 \text{ м}^2$  бумаги, г;  $D_{\text{cp}}$  – средняя толщина бумаги, м.

Когезионная способность вторичных волокон определена в Z-направлении бумаги и характеризуется показателем энергии внутренних связей по Скотту, измерение которого выполнено на аппарате Internal Bond Tester (TMI Group, США).

На рис. 5 представлена гистограмма распределения полученных вторичных волокон по длине. При этом доля волокон рассчитана как процентное отношение суммарной длины волокон  $i$ -того класса к общей длине волокон во всех классах.

Как видно из рис. 5, двух- и трехкратное сокращение продолжительности процесса розпуска за счет использования реагентно-щелочной обработки массы практически не оказывает влияния на фракционный состав получаемой волокнистой массы. Это подтверждается и данными о средней длине волокон, представленными в таблице.

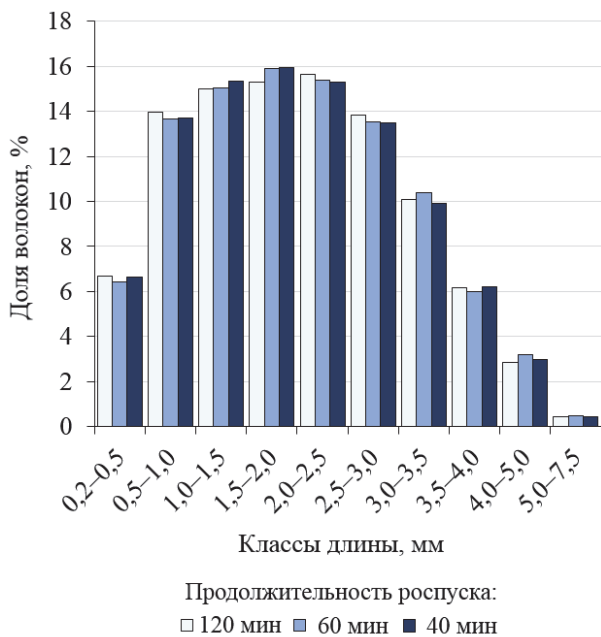


Рис. 5. Распределение волокон по длине

## Данные о средней длине вторичных волокон

Длина волокон, мм	Продолжительность роспуска, мин		
	120	60	40
Среднеарифметическая $L_n$	1,28	1,29	1,28
Средневзвешенная по длине $L_l$	2,01	2,02	2,01
Средневзвешенная по массе $L_w$	2,58	2,58	2,58
Средневзвешенная по объему $L_v$	2,12	2,12	2,12

Как видно из таблицы, значения длины волокон сильно зависят от метода их оценки. Так, среднеарифметическая длина вторичных волокон составляет 1,28–1,29 мм, средневзвешенная по длине – 2,01–2,02 мм, средневзвешенная по массе – 2,58 мм, средневзвешенная по объему – 2,12 мм. Полученные результаты хорошо согласуются с известными литературными данными [20] для первичных волокон сульфатной хвойной целлюлозы. Дж. Кларк отмечает [9], что средняя длина, например, волокон черной ели в зависимости от методов ее оценки по данным разных авторов колеблется в очень широком диапазоне – от 0,74 до 3,48 мм. Таким образом, оценка средней длины, выполненная одновременно по 4 показателям, позволяет впоследствии исключить их неоднозначное толкование из-за возникновения отмеченных методических противоречий.

Относительная доля мелочи, т. е. волокнистых элементов, имеющих длину менее 0,2 мм, для всех полученных волокнистых масс составила 3,7–3,8% и практически не зависела от продолжительности роспуска. Такое же содержание мелочи – 3,7% при аналогичной степени помола (24°ШР) имеет сульфатная беленая хвойная

целлюлоза, из которой была получена влагопрочная бумага. Таким образом, роспуск влагопрочной макулатуры даже при большой продолжительности процесса не приводит к возникновению дополнительных количеств вторичной мелочи.

На рис. 6 показано влияние продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры на нулевую разрывную длину во взаимосвязи с фактором формы вторичных волокон.

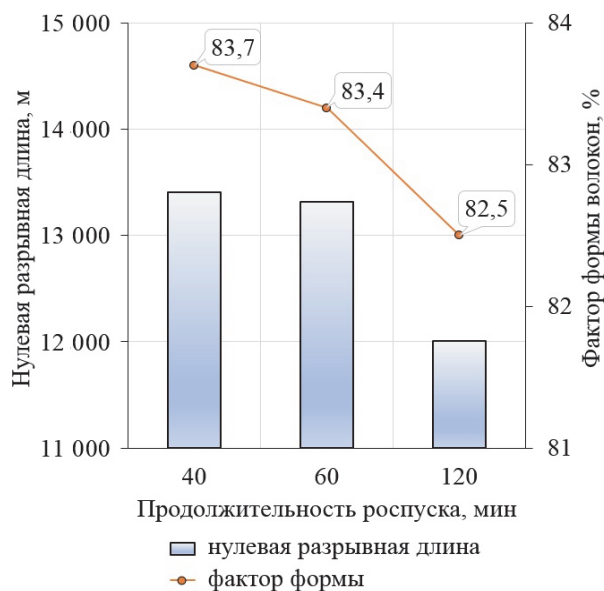


Рис. 6. Влияние продолжительности роспуска на нулевую разрывную длину и фактор формы волокон

Как видно из рис. 6, сокращение продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры в результате применения реагентно-щелочной обработки массы сопровождается получением вторичных волокон с большей собственной прочностью по показателю нулевой разрывной длины – 13 320–13 410 м (в среднем 13 370 м) против 12 010 м, что соответствует относительной разнице в 11%. Получение вторичных волокон с большей собственной прочностью можно рационально объяснить через соответствующее увеличение фактора их формы с 82,5 до 83,4–83,7% следующим образом. Известно, что фактор формы кумулятивно и количественно отражает все виды деформаций волокон, т. е. чем выше его значение, тем меньше степень деформированности и выше прямизна волокон [15, 16, 18]. С позиций механики разрушения материалов, деформации волокон могут быть рассмотрены как своеобразные локальные концентраторы напряжений. Последние вызывают разрушение материала, в данном случае бумаги, при существенно меньших растягивающих усилиях. В свою очередь, степень деформированности вторичных волокон зависит от накопленного количества

механических воздействий, оказываемых на них в процессе дезинтеграции макулатуры активными элементами гидроразбивателя. С этой точки зрения становится понятным, почему сокращение продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры благоприятно сказывается на собственной прочности вторичных волокон.

На рис. 7 представлена гистограмма распределения фактора формы по классам длины вторичных волокон.

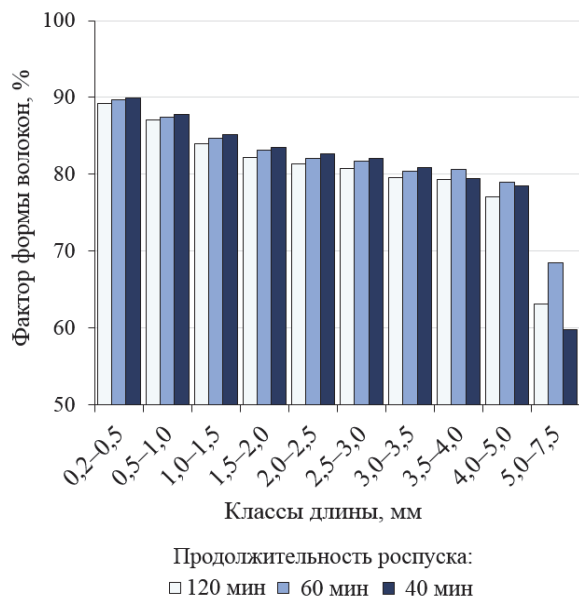


Рис. 7. Распределение фактора формы по длине волокон

Из рис. 7 видно, что прямизна вторичных волокон, полученных из влагопрочной макулатуры, снижается при увеличении их длины, т. е. она демонстрирует типичное поведение, характерное как для первичных, так и для вторичных волокон. При этом во всех классах длины значения фактора формы волокон, полученных при ускоренном роспуске влагопрочной макулатуры, больше аналогичных значений для волокон, полученных при длительной щелочной обработке массы (контрольный вариант).

На рис. 8 представлено влияние продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры на способность вторичных волокон к уплотнению во влажном состоянии по показателю плотности отливок, а на рис. 9 – на когезионную способность волокон по показателю энергии внутренних связей по Скотту.

Как видно из рис. 8, сокращение продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры приводит к незначительному, порядка 5%, снижению показателя плотности бумаги. Снижение плотности бумаги можно было бы объяснить снижением фактора формы, однако в нашем случае он, напротив, демонстрирует рост.

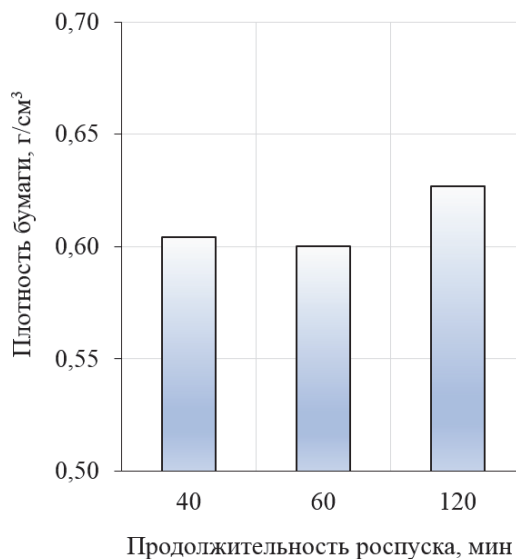


Рис. 8. Влияние продолжительности роспуска на плотность бумаги

Наиболее вероятное объяснение этому можно получить при рассмотрении плотности бумаги во взаимосвязи с другим фундаментальным свойством волокон – их грубостью. В частности, грубость вторичных волокон при продолжительности роспуска 120 мин составила 171 мг/м, при сокращении времени роспуска до 60–40 мин она возросла соответственно до 193–213 мг/м.

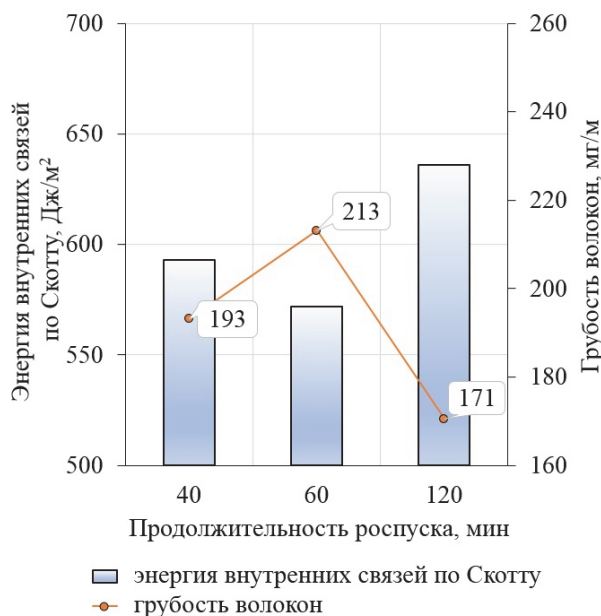


Рис. 9. Влияние продолжительности роспуска на энергию внутренних связей по Скотту и грубость волокон

С учетом стандартного отклонения показателя грубости, которое для оптических методов оценки по известным данным [22] достигает 12 мг/м, можно констатировать, что вторичные

волокна, полученные при ускоренном роспуске влагопрочной макулатуры, имеют грубость в среднем на 17% больше, чем при длительной щелочной обработке массы. Более грубые волокна менее пластичны и поэтому дают при формировании более пухлый, т. е. менее плотный лист [9, 22].

Изменение грубости вторичных волокон при сокращении продолжительности роспуска со 120 до 40–60 мин, как видно из рис. 9, также отражается еще на одном фундаментальном свойстве волокон – их когезионной способности. Так, при увеличении грубости вторичных волокон происходит некоторое снижение когезионной способности волокон по показателю энергии внутренних связей по Скотту с 635 Дж/м<sup>2</sup> до 570–595 Дж/м<sup>2</sup> (в среднем до 585 Дж/м<sup>2</sup>), или на 8%. Это связано с тем, что более грубые волокна являются менее пластичными и конформными, образуя более рыхлую структуру листа бумаги с меньшим количеством межволоконных контактов [9, 22]. Несмотря на отмеченное снижение, показатель энергии внутренних связей по Скотту для всех вариантов вторичных волокон все же находится на высоком уровне –  $600 \pm 50$  Дж/м<sup>2</sup>.

**Заключение.** Выполненная комплексная оценка фундаментальных свойств вторичных волокон из влагопрочной макулатуры на основе сульфатной беленой хвойной целлюлозы позволила получить следующие новые научные результаты.

Установлено, что средняя длина вторичных волокон является практически индифферентной по отношению к двух-, трехкратному сокращению продолжительности процесса роспуска влагопрочной макулатуры за счет реагентно-щелочной обработки массы. При степени помола волокнистой массы 24°ШР среднеарифме-

тическая длина вторичных волокон составила 1,28–1,29 мм, средневзвешенная по длине – 2,01–2,02 мм, средневзвешенная по массе – 2,58 мм, средневзвешенная по объему – 2,12 мм. Относительная доля мелочи для всех полученных волокнистых масс составила 3,7–3,8%. Такое же содержание мелочи – 3,7% при аналогичной степени помола – имела сульфатная беленой хвойная целлюлоза, из которой была получена влагопрочная бумага.

Установлено, что собственная прочность вторичных волокон, полученных при ускоренном роспуске влагопрочной макулатуры за счет использования ее реагентно-щелочной обработки на 11% выше соответствующей прочности вторичных волокон, полученных при более длительной щелочной обработке.

Показано, что способность вторичных волокон к уплотнению во влажном состоянии, судя по показателю плотности бумаги, уменьшается при сокращении продолжительности роспуска влагопрочной макулатуры незначительно – на 5%. Более значимое изменение характерно для грубости волокон, которая увеличивается со 171 до 193–213 мг/м и тем самым вызывает снижение когезионной способности волокон на 8%. Несмотря на это, показатель энергии внутренних связей по Скотту для всех вариантов вторичных волокон остается на высоком уровне –  $600 \pm 50$  Дж/м<sup>2</sup>.

Полученные результаты характеризуют исследованную влагопрочную макулатуру как перспективную вторичное волокнистое сырье, а реагентно-щелочную обработку массы как эффективный способ повышения производительности оборудования узла роспуска, снижения энергетических затрат и получения вторичных волокон с высоким бумагообразующим потенциалом.

### Список литературы

1. Пенкин А. А. Перспективы рециклинга труднорастворимой макулатуры, содержащей полиамидамин-эпихлоргидриновые смолы // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2. С. 159–165.
2. Пенкин А. А. Химическая интенсификация процесса роспуска вторичного влагопрочного сырья // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти профессора В. И. Комарова, Архангельск, 9–11 сент. 2021 г. / Архангельск, 2021. С. 184–191.
3. Yang D., Sotra A., Pelton R. H. Switching of PAE wet strength // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 2019. Vol. 34, no 1. P. 88–95. DOI: 10.1515/npprj-2018-0074.
4. Effect of chemical additives on the degradation of polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) films and PAE based papers made from bleached kraft pulps / E. Siqueira [et al.] // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 2013. Vol. 28, no 4. P. 529–540. DOI: 10.3183/npprj-2013-28-04-p529-540.
5. Carboxymethylcellulose (CMC) as a model compound of cellulose fibers and polyamideamine epichlorohydrin (PAE) – CMC interactions as a model of PAE – fibers interactions of PAE-based wet strength papers / E. Siqueira [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. 2015. Vol. 132, no 26. DOI: 10.1002/app.42144.
6. Holik H. Handbook of Paper and Board. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2013, 992 p.

7. Nagiopol C., Johnston J.W. Chemistry of Modern Papermaking. Georgia-Pacific Chemicals LLC, 2012. 415 p.
8. Особенности переработки трудноразволокняемой макулатуры / С. С. Пузырёв [и др.] // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 10. С. 40–44.
9. Кларк Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе в бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытания) / пер. с англ. А. В. Оболенской, Г. А. Пазухиной. М.: Лесная пром-ть, 1983. 456 с.
10. Suhonen T., Oksanen N. Future outlook for the forest industry // Swedish Association of Pulp and Paper Engineers (SPCI), 2016. URL: [http://www.spci.se/shared/files/SPCI\\_forest\\_industry\\_future\\_scenarios\\_FINAL.pdf](http://www.spci.se/shared/files/SPCI_forest_industry_future_scenarios_FINAL.pdf) (date of access: 03.03.2017).
11. Espy H. H., Geist W. G. Persulfates as repulping reagents for neutral/alkaline wet-strength broke // TAPPI Journal. 1993. Vol. 76, no. 2. P. 139–141.
12. Fischer S. A. Repulping wet-strength paper // TAPPI Journal. 1997. Vol. 80, no. 11. P. 141–147.
13. Yang R., Luetgen C. Repulping of wet strength paper towel with potassium monopersulfate // TAPPI Journal. 2020. Vol. 19, no. 9. P. 463–470. DOI: 10.32964/TJ19.9.463.
14. 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.
15. Hakan Karlsson, Rinnevuoto Timo. Fibre guide: fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry: a handbook. Kista: AB Lorentzen & Wettre, 2006. 120 p.
16. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester / B. Li [et al.] // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2011. Vol. 50. P. 12572–12578. DOI: 10.1021/ie201631q.
17. Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlöf M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps – ranking of pulps may shift // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 2018. Vol. 33, no. 3. P. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058.
18. Measurement of fiber length, coarseness, and shape with the fiber quality analyzer / G. Robertson [et al.] // TAPPI Journal. 1999. Vol. 82, no. 10. P. 93–98.
19. Ferreira P. J., Matos S., Figueiredo M. M. Size characterization of fibres and fines in hardwood kraft pulps // Particle and Particle Systems Characterization. 1999. Vol. 16. P. 20–24.
20. An Analyzer for fibre shape and length / J. A. Olson [et al.] // Journal of Pulp and Paper Science. 1995. Vol. 21, no. 11. P. 367–373.
21. Fiserova M., Gigac J., Balbercak J. Relationship between fibre characteristics and tensile strength of hardwood and softwood kraft pulps // Cellulose Chemistry and Technology. 2010. Vol. 44, no. 7–8. P. 249–253.
22. Joutsimo O. P., Asikainen S. Effect of fiber wall pore structure on pulp sheet density of softwood kraft pulp fibers // BioResources. 2012. Vol. 8, no. 2. P. 2719–2737. DOI: 10.15376/BIORES.8.2.2719-2737.

## References

1. Penkin A. A. Future perspectives in recycling of wet-strength paper containing polyamidoamine-epichlorohydrin resins. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2021, no. 2, pp. 159–165 (In Russian).
2. Penkin A. A. Properties of secondary fibers obtained from wet-strength paper in the presence of activated persulfates. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora V. I. Komarova* [The issues in mechanics of pulp-and-paper materials: proceedings of 6th International conference in memory of professor Valery Komarov]. Arkhangelsk, 2021, pp. 184–191 (In Russian).
3. Yang D., Sotra A., Pelton R. H. Switching of PAE wet strength. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 88–95. DOI: 10.1515/npprj-2018-0074.
4. 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, no. 4, pp. 529–540. DOI: 10.3183/npprj-2013-28-04-p529-540.
5. Siqueira E., Salon M.-C. B., Belgacem M. N., Mauret E. Carboxymethylcellulose (CMC) as a model compound of cellulose fibers and polyamideamine epichlorohydrin (PAE) – CMC interactions as a model of PAE – fibers interactions of PAE-based wet strength papers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, no. 26. DOI: 10.1002/app.42144.
6. Holik H. Handbook of Paper and Board. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2013. 992 p.



7. Hagiopol C., Johnston J. W. Chemistry of Modern Papermaking. Georgia-Pacific Chemicals LLC, 2012. 415 p.
8. Puzyrev S. S., Tyurin E. T., Loginova T. V., Kovaleva O. P. Recycling of waste paper hard to defiber. *Селлюлоза. Бумага. Картон* [Pulp. Paper. Board], 2006, no. 10, pp. 40–44 (In Russian).
9. Clark J. Pulp technology and treatment for paper. San Francisco, Miller Freeman Publications Inc., 1978. 751 p. (Russ. ed.: Clark J. *Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе в бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытания)*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 456 p.).
10. Suhonen T., Oksanen N. Future outlook for the forest industry. Available at: [http://www.spci.se/shared/files/SPCI\\_forest\\_industry\\_future\\_scenarios\\_FINAL.pdf](http://www.spci.se/shared/files/SPCI_forest_industry_future_scenarios_FINAL.pdf) (accessed 03.03.2017).
11. Espy H. H., Geist W. G. Persulfates as repulping reagents for neutral/alkaline wet-strength broke. *TAPPI Journal*, 1993, vol. 76, no. 2, pp. 139–141.
12. Fischer S. A. Repulping wet-strength paper. *TAPPI Journal*, 1997, vol. 80, no. 11, pp. 141–147.
13. Yang R., Luettgen C. Repulping of wet strength paper towel with potassium monopersulfate. *TAPPI Journal*, 2020, vol. 19, no. 9, pp. 463–470. DOI: 10.32964/TJ19.9.463.
14. Kazakov Ya. V. The characteristic of geometrical parameters of cellulose fibers in pulp using probabilistic approach. *Химия Растительного Сырья* [Chemistry of Plant Raw Material], 2014, no. 1, pp. 269–275 (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm1401269.
15. Hakan Karlsson, Rinnevuoto Timo. Fibre guide: fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry: a handbook. Kista, AB Lorentzen & Wettre, 2006. 120 p.
16. Li B., Bandekar R., Zha Q., Alsaggaf A., Ni Y. Fiber Quality Analysis: OpTest Fiber Quality Analyzer versus L&W Fiber Tester. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, pp. 12572–12578. DOI: 10.1021/ie201631q.
17. Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlöf M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps – ranking of pulps may shift. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058.
18. Robertson G., Olson J., Allen P., Chan B., Seth A. Measurement of fiber length, coarseness, and shape with the fiber quality analyzer. *TAPPI Journal*, 1999, vol. 82, no. 10, pp. 93–98.
19. Ferreira P. J., Matos S., Figueiredo M. M. Size characterization of fibres and fines in hardwood kraft pulps. *Particle and Particle Systems Characterization*, 1999, vol. 16, pp. 20–24.
20. Olson J. A., Robertson A. G., Finnigan T. D., Turner R. R. H. An Analyzer for fibre shape and length. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1995, vol. 21, no. 11, pp. 367–373.
21. Fiserova M., Gigac J., Balbercak J. Relationship between fibre characteristics and tensile strength of hardwood and softwood kraft pulps. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2010, vol. 44, no. 7–8, pp. 249–253.
22. Joutsimo O. P., Asikainen S. Effect of fiber wall pore structure on pulp sheet density of softwood kraft pulp fibers. *BioResources*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 2719–2737. DOI: 10.15376/BIORES.8.2.2719-2737.

### Информация об авторах

**Пенкин Антон Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [penkin@belstu.by](mailto:penkin@belstu.by)

**Казakov Яков Владимирович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств. Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, Российская Федерация). E-mail: [j.kazakov@narfu.ru](mailto:j.kazakov@narfu.ru)

### Information about the authors

**Penkin Anton Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Chemical Wood Processing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [penkin@belstu.by](mailto:penkin@belstu.by)

**Kazakov Yakov Vladimirovich** – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Pulp and Paper and Wood Chemical Production. Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina emb., 163002, Arkhangelsk, Russian Federation). E-mail: [j.kazakov@narfu.ru](mailto:j.kazakov@narfu.ru)

Поступила 30.11.2021