

Научная статья

УДК 676.038:676.017.44

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-4-169-179

## Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи

А.А. Пенкин<sup>1</sup>✉, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [GUS-7006-2022](https://orcid.org/0000-0001-5773-6797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5773-6797>

Я.В. Казаков<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13 а, Минск, Республика Беларусь, 220006; penkin@belstu.by✉

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; j.kazakov@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.07.22 / Одобрена после рецензирования 23.10.22 / Принята к печати 30.10.22

**Аннотация.** Процесс размола волокнистой массы из вторичного волокнистого сырья в зависимости от режима связан со значительным изменением структурно-морфологических характеристик вторичного волокна и возникновением дополнительных количеств волокнистой мелочи. Последняя оказывает существенное влияние на свойства волокнистой массы, технологический процесс изготовления бумаги и показатели качества получаемой продукции. Степень влияния волокнистой мелочи на качество продукции и процесс ее изготовления, в свою очередь, зависит от структурно-морфологических свойств частиц мелочи. Цель работы – исследование структурно-морфологических свойств волокнистой мелочи, содержащейся во вторичном волокне из влагопрочного сырья, образующейся в процессе мягкого размола волокнистой массы. Вторичное волокно получено в результате роспуска влагопрочной тисью на основе беленой сульфатной целлюлозы по нескольким вариантам: в условиях тепловой обработки массы в присутствии едкого натра (NaOH), в условиях реагентно-щелочной обработки с применением в качестве активаторов роспуска персульфата натрия (NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) и моноперсульфата калия (NaOH + KHSO<sub>5</sub>). С использованием оптического анализатора L&W Fiber Tester установлено, что при мягком размоле волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением персульфата натрия и моноперсульфата калия, происходит незначительное увеличение доли мелочи – в среднем на 0,20...0,28 % по длине и на 0,9...1,5 % по количеству частиц мелочи. Волокнистая мелочь представляет собой относительно прямые частицы (средневзвешенный по длине фактор формы – 93,5...94,0 %), обладающие малой полидисперсностью (отношение средневзвешенного по длине и среднеарифметического значения длины – 1,08...1,09). Средний коэффициент вытянутости частиц мелочи составляет около 7, в отдельных классах длины – до 8...9. Микрофотографии поверхности бумаги – результаты работы сканирующего электронного микроскопа, – а также значения средних длины частиц волокнистой мелочи (132...134 мкм) и ширины вторичных волокон (29,7...30,0 мкм) показывают, что мелочь способна участвовать в дополнительном межволоконном связеобразовании посредством формирования мостиков между волокнами в зоне их потенциального контакта.

© Пенкин А.А., Казаков Я.В., 2023

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

**Ключевые слова:** влагопрочная макулатура, роспуск, вторичное волокно, мягкий размол, мелочь, структурно-морфологические свойства

**Для цитирования:** Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагопрочного сырья при мягком размоле. Часть 2. Характеристика волокнистой мелочи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 169–179. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-169-179>

Original article

## Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 2. Fines Characteristics

**Anton A. Penkin**<sup>✉</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [GUS-7006-2022](https://orcid.org/0000-0001-5773-6797), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5773-6797>

**Yakov V. Kazakov**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, ul. Sverdlova, 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus; [penkin@belstu.by](mailto:penkin@belstu.by)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [j.kazakov@narfu.ru](mailto:j.kazakov@narfu.ru)

Received on July 10, 2022 / Approved after reviewing on October 23, 2022 / Accepted on October 30, 2022

**Abstract.** The process of recycled pulp refining is usually associated with a significant change in the morphological characteristics of the secondary fiber and the formation of additional amounts of fines. It is well known that fines have a great impact on the pulp properties, the papermaking process and the quality of the resulting paper. At the same time, the effect of fines both on the paper properties and on the papermaking process depends on the morphological characteristics of the fines. The aim of the study was to evaluate the changes in the morphological characteristics of the fines during gentle low-consistency refining of the recycled pulp. The recycled pulp was obtained from commercial wet-strength tissue paper, consisting of 100 % bleached softwood kraft pulp (BSKP) made from pine (*Pinus sylvestris* L.). The repulping of wet-strength paper was performed at 60 °C in three ways, namely, repulping with sodium hydroxide (indicated as RP (NaOH)), repulping with sodium hydroxide and sodium persulfate (RP (NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)), and finally repulping with sodium hydroxide and potassium monopersulfate (RP (NaOH + KHSO<sub>5</sub>)). Using an optical fiber analyzer, L&W Fiber Tester, it was found that accelerated persulfate and monopersulfate repulping of the wet-strength paper led to an increase in fines content after pulp refining by 0.20...0.28 % on length and by 0.9...1.5 % on number of particles. In addition, some fines were not detected due to the limited resolution of the measuring device. The morphological characteristics of the recycled pulps showed that the studied fines were relatively straight particles ( $S_l = 93.5...94.0$  %) with low length polydispersity ( $(L_l/L_n) = 1.08...1.09$ ). Fines had a mean slenderness ratio  $(L/W)_l$  and  $(L/W)_w$  of about 7, which in some length classes reached 8...9. Taking into account the experimental data on fines length ( $L_l = 132...134$  μm) and fiber width ( $W_l = 29.7...30.0$  μm), as well as SEM images of recycled paper, we can conclude that



these particles can form fines-assisted bridges between several close deposited fibers in the fiber network, thus strengthening the paper web.

**Keywords:** wet-strength paper, repulping, recycled pulp, gentle refining, fines, morphological characteristics

**For citation:** Penkin A.A., Kazakov Y.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 2. Fines Characteristics. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 4, pp. 169–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-169-179>

### *Введение*

Использование мягких режимов размола с целью максимального сохранения исходной длины и других структурно-морфологических характеристик вторичного волокна (ВВ) является одним из основных принципов подготовки макулатурной массы [3, 5, 10]. В ходе 1-й части работы [2] установлено, что на изменение структурно-морфологических свойств ВВ при мягком размол волокнистой массы из влагопрочной макулатуры оказывают влияние специфические условия процесса ее роспуска, такие как тепловая и реагентно-щелочная обработка. Мягкий размол волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  и  $\text{KHSO}_5$ , приводит к определенному выпрямлению волокон и соответствующему увеличению их фактора формы. При этом ускоренный роспуск обеспечивает около 60 %, а мягкий размол – около 40 % от общего роста фактора формы ВВ, достигаемого в результате комбинирования условий массоподготовки [2].

Учитывая, что процесс размола вторичных волокнистых полуфабрикатов в той или иной степени приводит к появлению дополнительных количеств мелочи [7, 14, 19], а также принимая во внимание существенное влияние мелочи на свойства волокнистой массы, технологический процесс изготовления и показатели качества получаемой бумаги [7, 14, 15, 18, 19], в настоящей работе изучены структурно-морфологические свойства волокнистой мелочи. Использован автоматический анализатор, реализующий оптический метод оценки структурно-морфологических характеристик волокнистых полуфабрикатов. Несмотря на то, что некоторое количество частиц мелочи лежит за пределами уровня детекции, свойственного для оптических анализаторов, данному методу оценки мелочи уделяется значительное внимание [13, 15, 16]. Применительно к влагопрочной макулатуре исследования подобного типа выполнены впервые.

Цель работы – изучение структурно-морфологических свойств волокнистой мелочи, содержащейся во ВВ из влагопрочного сырья, образующейся в процессе мягкого размола волокнистой массы.

### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования, как и в 1-й части работы, стало ВВ, полученное из макулатуры в виде влагопрочной тисью на основе беленой сульфатной целлюлозы из древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) – СФАХБЦ. Предметом – структурно-морфологические свойства волокнистой мелочи.

Свойства использованной влагопрочной макулатуры, лабораторные условия процессов ее роспуска, размола волокнистой массы, особенности применяемого для размола лабораторного оборудования были подробно описаны в 1-й части работы. При этом ВВ было получено в процессе роспуска влагопрочной макулатуры по нескольким вариантам: в условиях тепловой обработки массы в присутствии едкого натра – ВВ (NaOH), в условиях реагентно-щелочной обработки с применением в качестве активаторов роспуска персульфата натрия – ВВ (NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) – и моноперсульфата калия – ВВ (NaOH + KHSO<sub>5</sub>) [2].

Структурно-морфологические свойства ВВ исследованы с помощью оптического анализатора L&W Fiber Tester [1]. В соответствии с международным стандартом ISO 16065-1:2014 [11], регламентирующим условия определения длины волокнистых полуфабрикатов оптическим методом, мелочью являются объекты волокнистой массы длиной менее 200 мкм. Разбиение исходных данных (Raw Data) на 2 группы: данные для волокон и данные для мелочи – и выполнение соответствующих расчетов дают возможность детальной характеристики не только волокон (как это происходит при автоматических расчетах на оптическом анализаторе), но и частиц мелочи.

На основании первичных данных для частиц мелочи был определен еще один структурно-геометрический параметр – коэффициент формы, или коэффициент вытянутости, представляющий собой отношение длины частиц мелочи к их ширине [4, 6, 16]. Коэффициент вытянутости применительно к частицам мелочи имеет важное значение, поскольку определяет ее тип и свойства [16].

Исходные данные разбивали на 10 классов по длине: |50...65|, |65...80|, |80...95|, |95...110|, |110...125|, |125...140|, |140...155|, |155...170|, |170...185| и |185...200| мкм.

В каждом классе для частиц мелочи находили средние длину  $l_i$ , ширину  $w_i$ , фактор формы (прямызны)  $s_i$  и коэффициент вытянутости  $l_i/w_i$ .

С учетом количества частиц мелочи в каждом классе по формулам [9, 11, 16] рассчитывали средние арифметические и средневзвешенные по длине и массе значения длины  $L_n, L_l, L_w$ , ширины  $W_n, W_l, W_w$ , фактора формы  $S_n, S_l, S_w$  и коэффициента формы  $(L/W)_n, (L/W)_l, (L/W)_w$ .

Полидисперсность частиц мелочи по длине и по массе вычисляли соответственно как отношение  $L_l/L_n$  и  $L_w/L_n$  [20].

Для построения диаграмм распределения мелочи по длине долю по длине мелочи определяли как процентное отношение суммарной длины частиц мелочи в  $i$ -м классе к общей длине мелочи во всех классах ( $i = 1...10$ ), долю по числу частиц мелочи – как процентное отношение суммарного количества частиц мелочи в  $i$ -м классе к общему количеству мелочи во всех классах. Содержание мелочи по длине находили как процентное отношение суммарной длины мелочи к общей длине волокон и длине мелочи в анализируемой пробе, содержание мелочи по числу частиц – как процентное отношение количества частиц мелочи к общему количеству волокон и количеству частиц мелочи в анализируемой пробе.

## Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показано влияние мягкого размола волокнистой массы на содержание мелочи.

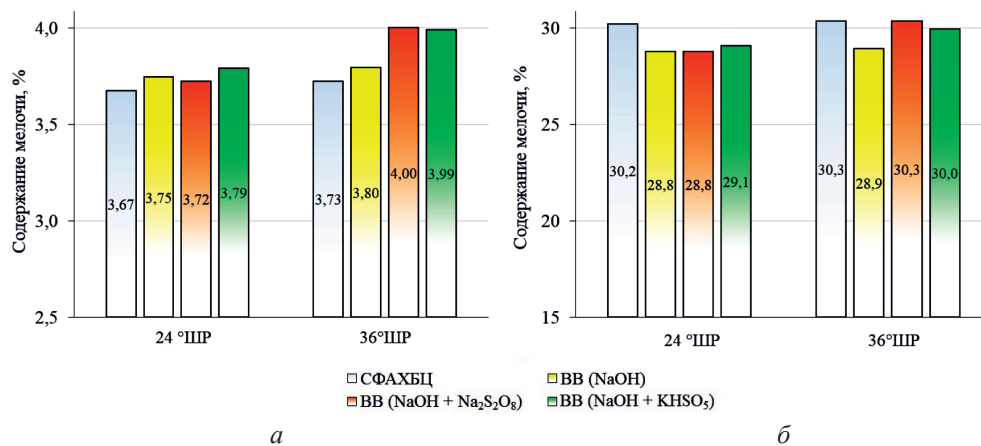


Рис. 1. Влияние мягкого размола на содержание мелочи: *a* – по длине; *б* – по числу частиц  
Fig. 1. Effect of gentle refining of the pulps on length weighted (*a*) and arithmetic (*б*) fines content (L&W Fiber Tester)

Из представленных на рис. 1 данных видно, что наименьшее содержание мелочи по длине, как до, так и после мягкого размола, характерно для первичного волокна – сульфатной хвойной целлюлозы. Более низкое содержание мелочи по количеству частиц отмечено для ВВ. Первое можно объяснить большей средней длиной волокон целлюлозы. Так, средневзвешенные значения длины  $L_l$  и  $L_w$  для целлюлозы до размола составляют соответственно 2,15 и 2,72 мм, для ВВ из влагопрочной макулатуры – соответственно 2,01...2,02 и 2,58 мм [2]. Значения  $L_l$  и  $L_w$  для целлюлозы после размола – 2,14 и 2,70 мм соответственно, для ВВ из влагопрочной макулатуры – 1,99...2,00 и 2,57...2,58 мм [2] соответственно. Второе обстоятельство, на наш взгляд, связано с частичным вымыванием мелочи при формовании бумаги в сеточной части бумагоделательной машины.

В процессе мягкого размола волокнистой массы, полученной с применением ускоренного роспуска, доля мелочи увеличивается в среднем на 0,20...0,28 % по длине и на 0,9...1,5 % по количеству частиц. Как отмечалось ранее [2], средняя длина волокон в процессе мягкого размола практически не изменяется. Поэтому можно полагать, что образование дополнительного количества мелочи происходит в основном не за счет поперечного измельчения (рубки) волокон, а в результате продольного деламинирования фрагментов клеточной стенки и внешнего фибриллирования волокон. Образование мелочи при мягком размоле ВВ, полученного в результате ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры, выражено в большей степени, чем при продолжительной щелочной обработке макулатуры.

На рис. 2 представлены диаграммы распределения по длине частиц мелочи.

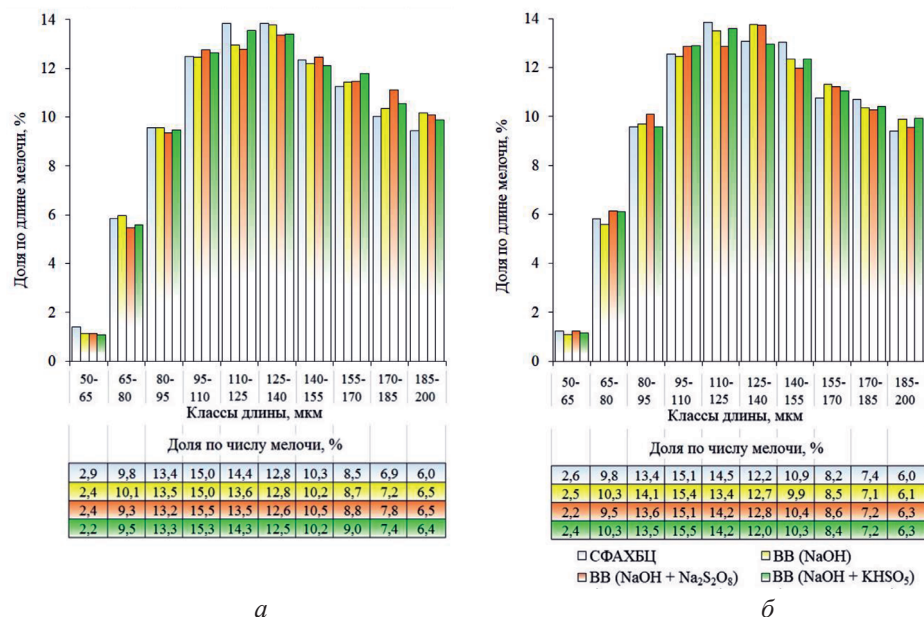


Рис. 2. Распределение частиц мелочи по длине в процессе мягкого размола волокнистой массы: *а* – до размола (24 °ШР); *б* – после размола (36 °ШР)

Fig. 2. Fines length distributions (L&W Fiber Tester): *a* – before gentle refining of the pulps (24 °SR); *б* – after gentle refining of the pulps (36 °SR)

Как видно из рис. 2, мягкий размол волокнистой массы практически не изменяет распределение по длине частиц мелочи. Это справедливо как для первичного полуфабриката в виде сульфатной хвойной целлюлозы, так и для вторичного влагопрочного сырья, изготовленного на ее основе.

На рис. 3–5 показаны зависимости ширины, коэффициента вытянутости и фактора формы от средней длины частиц мелочи в классах до и после мягкого размола волокнистой массы.

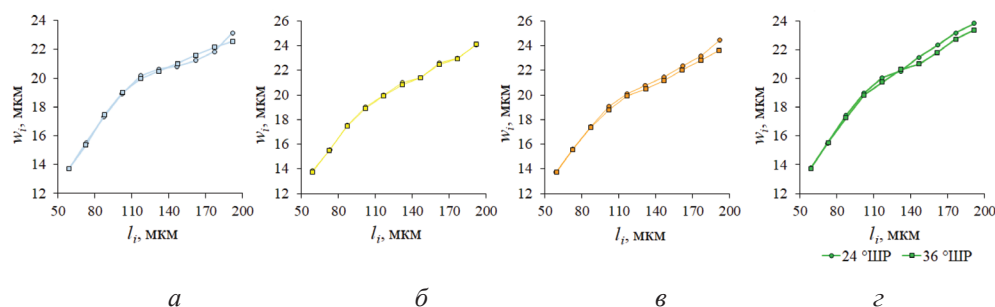


Рис. 3. Зависимость ширины от длины частиц мелочи до и после мягкого размола волокнистой массы: *а* – СФАХБЦ; *б* – ВВ (NaOH); *в* – ВВ (NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>); *г* – ВВ (NaOH + KHSO<sub>5</sub>)

Fig. 3. Fines length vs fines width before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>); *г* – RP(NaOH + KHSO<sub>5</sub>)

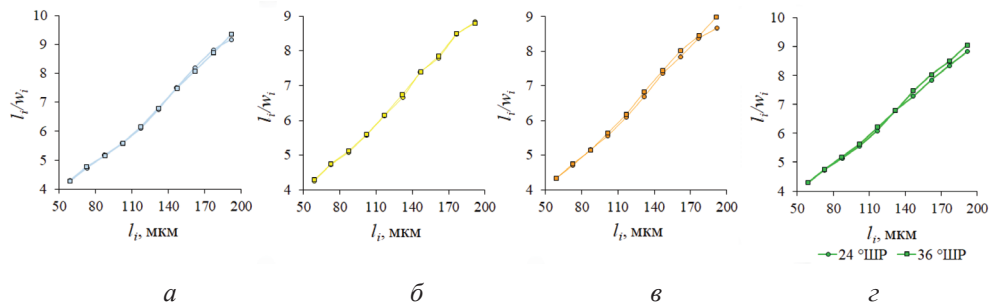


Рис. 4. Зависимость коэффициента вытянутости от длины частиц мелочи до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б* – ВВ (NaOH); *в* – ВВ (NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>); *г* – ВВ (NaOH + KHSO<sub>5</sub>)

Fig. 4. Fines length vs fines slenderness ratio before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>); *г* – RP(NaOH + KHSO<sub>5</sub>)

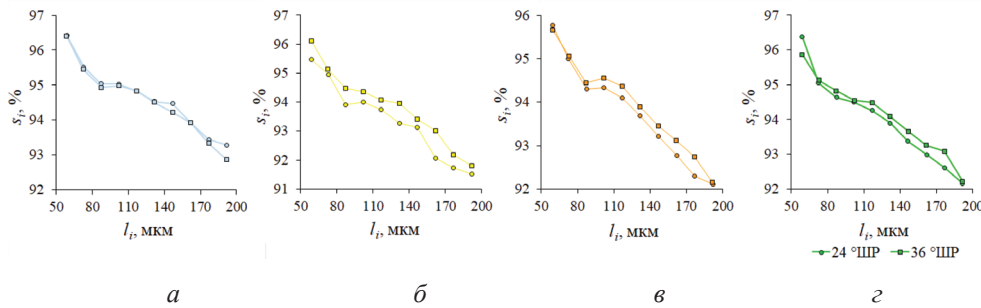


Рис. 5. Зависимость фактора формы от длины частиц мелочи до и после мягкого размола волокнистой массы: *a* – СФАХБЦ; *б* – ВВ (NaOH); *в* – ВВ (NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>); *г* – ВВ (NaOH + KHSO<sub>5</sub>)

Fig. 5. Fines length vs fines shape factor before and after gentle refining of the pulps: *a* – BSKP; *б* – RP(NaOH); *в* – RP(NaOH + Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>); *г* – RP(NaOH + KHSO<sub>5</sub>)

Из представленных графических зависимостей видно, что характеристики мелочи при мягком размоле волокнистой массы практически не изменяются, исключение составляет фактор формы, который демонстрирует незначительное увеличение в случае использования вторичного влаготочного сырья. Также стоит иметь ввиду, что некоторое количество частиц мелочи может находится за пределами уровня детекции оптического анализатора.

Средние значения структурно-морфологических параметров мелочи до и после размола волокнистой массы также остаются приблизительно на одном уровне (см. таблицу).

Данные таблицы в целом характеризуют мелочь, находящуюся в волокнистой массе из вторичного влаготочного сырья, как относительно прямые частицы –  $S_l = 93,5...94,0$  %, – обладающие малой полидисперсностью –  $(L_f/L_n) = 1,08...1,09$ . Средний коэффициент вытянутости частиц мелочи составляет около 7, достигая в классах длины |155...170|, |170...185|, |185...200| мкм до 8...9 (рис. 4, б–г). На основании данных значений коэф-

фициента вытянутости частиц мелочи можно полагать, что они способны к образованию мостичных структур, или мостиков [16], между близлежащими волокнами в структуре бумажного листа (рис. 6).

**Структурно-морфологических параметры частиц мелочи**  
**Morphological characteristics of pulp fines**

Структурно-морфологический параметр мелочи	Значение параметра							
	СФАХБЦ		NaOH		NaOH + Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>		NaOH + KHSO <sub>5</sub>	
	Степень помола, °ШР							
	24	36	24	36	24	36	24	36
Средняя длина, мкм: $L_n$	122	123	123	123	124	122	123	122
$L_l$	133	133	134	133	134	132	134	133
$L_w$	142	143	143	143	144	142	143	143
Полидисперсность: по длине ( $L_l/L_n$ )	1,09	1,08	1,09	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09
по массе ( $L_w/L_n$ )	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,17
Средняя ширина, мкм: $W_n$	19,6	19,6	20,0	20,0	20,1	19,7	20,0	19,7
$W_l$	20,1	20,1	20,6	20,6	20,7	20,3	20,6	20,2
$W_w$	20,6	20,6	21,3	21,2	21,3	20,9	21,2	20,8
Средний коэффициент вытянутости: $(L/W)_n$	6,6	6,6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
$(L/W)_l$	6,9	6,9	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9
$(L/W)_w$	7,3	7,3	7,1	7,2	7,1	7,2	7,1	7,2
Средний фактор формы, %: $S_n$	94,6	94,5	93,4	93,8	93,7	94,0	93,9	94,1
$S_l$	94,5	94,4	93,1	93,6	93,5	93,8	93,7	93,9
$S_w$	94,3	94,2	92,8	93,3	93,3	93,5	93,5	93,7

Средняя длина частиц мелочи ( $L_l = 132...134$  мкм) больше средней ширины волокон ( $W_l = 29,7...30,0$  мкм [2]), поэтому в зону потенциального контакта могут одновременно попадать более двух близлежащих волокон. Образование мостиков с участием частиц мелочи позволяет более равномерно распределять нагрузку в зоне контакта волокон [16] и, как следствие, способно оказывать дополнительное к внешнему и внутреннему фибриллированию волокон при размоле [8, 12, 17] положительное влияние на механические свойства бумаги.



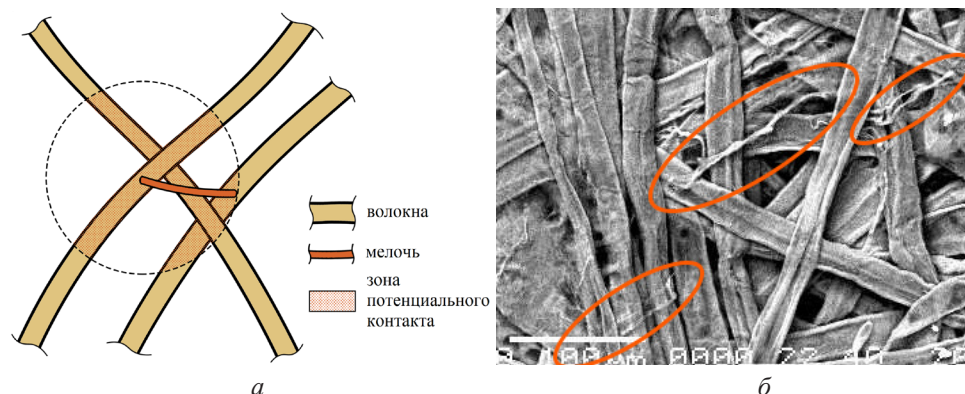


Рис. 6. Мостики между близлежащими волокнами, образованные с участием частиц мелочи: *a* – принцип образования; *б* – присутствие в структуре бумаги

Fig. 6. Load-carrying bridges composed of fines material in fiber network: *a* – mechanism of bridges formation; *б* – presence of bridges in the paper web (SEM)

### Заключение

Исследованы структурно-морфологические свойства волокнистой мелочи, содержащейся во вторичном волокне из влагопрочного сырья, образующейся в процессе мягкого размола волокнистой массы.

Установлено, что при мягком размоле волокнистой массы, полученной в условиях ускоренного роспуска влагопрочной макулатуры с применением персульфата натрия и моноперсульфата калия, происходит незначительное увеличение доли мелочи – в среднем на 0,20...0,28 % по длине и на 0,9...1,5 % по количеству частиц.

Волокнистая мелочь представляет собой относительно прямые частицы (средневзвешенный по длине фактор формы – 93,5...94,0 %), обладающие малой полидисперсностью (отношение средневзвешенного по длине и среднеарифметического значения длины – 1,08...1,09). Средний коэффициент вытянутости частиц мелочи составляет около 7, в классах длины |155...170|, |170...185|, |185...200| мкм достигает до 8...9.

С учетом найденных средних длины частиц мелочи (132...134 мкм) и ширины волокон (29,7...30,0 мкм) показано, что частицы волокнистой мелочи способны участвовать в дополнительном межволоконном связеобразовании посредством формирования мостиков между волокнами в зоне их потенциального контакта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Казаков Я.В. Характеристика геометрических параметров волокон целлюлозных полуфабрикатов с использованием вероятностных методов // Химия растит. сырья. 2014. № 1. С. 269–275.

Kazakov Y.V. The Characteristic of Geometrical Parameters of Cellulose Fibers in Pulp Using Probabilistic Approach. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Material, 2014, no. 1, pp. 269–275. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1401269>

2. Пенкин А.А., Казаков Я.В. Структурно-морфологические свойства вторичного волокна из влагонепроницаемого сырья при мягком размоле. Часть 1. Характеристика волокон // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 157–172.

Penkin A.A., Kazakov Y.V. Changes in the Morphological Characteristics of Secondary Fiber Obtained from Wet-Strength Paper During Gentle Refining of the Recycled Pulp. Part 1: Fiber Characteristics. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 5, pp. 157–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-157-172>

3. Смолин А. Вторичные волокна в современной технологии ЦБП // ЛесПромИнформ. 2015. № 4(110). С. 146–148.

Smolin A.S. Secondary Fibres in Modern Pulp and Paper Technology. *LesPromInform*, 2015, no. 4(110), pp. 146–148. (In Russ.).

4. Area M.C., Popa V.I. *Wood Fibres for Papermaking*. Shawbury, Smithers Rapra Technology Ltd. Publ., 2014. 106 p.

5. Debnath M., Salem K.S., Naithani V., Musten E., Hubbe M.A., Pal L. Soft Mechanical Treatments of Recycled Fibers Using a High Shear Homogenizer for Tissue and Hygiene Product. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 7981–7994. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04024-0>

6. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Bashar S., Jahan M.S. Anatomical, Morphological and Chemical Characteristics of Kaun Straw (*Seetaria-Italika*). *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 288–298. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0057>

7. Fischer W.J., Mayr M., Spirk S., Reishofer D., Jagiello L.A., Schmiedt R., Colson J., Zankel A., Bauer W. Pulp Fines – Characterization, Sheet Formation, and Comparison to Microfibrillated Cellulose. *Polymers*, 2017, vol. 9, iss. 8, art. no. 366. <https://doi.org/10.3390/polym9080366>

8. Gharekhani S., Sadeghinezhad E., Kazi S.N., Yarmand H., Badarudin A., Safaei M.R., Zubir M.N. Basic Effects of Pulp Refining on Fiber Properties – A Review. *Carbohydrate Polymers*, 2015, vol. 115, pp. 785–803. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047>

9. Karlsson H., Rinnevuoto T. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry: A Handbook*. Kista, AB Lorentzen & Wettre Publ., 2006. 120 p.

10. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What Happens to Cellulosic Fibers During Papermaking and Recycling? A Review. *BioResources*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 739–788. <https://doi.org/10.15376/BIORES.2.4.739-788>

11. ISO 16065-1:2014 *Pulps – Determination of Fibre Length by Automated Optical Analysis. Part 1: Polarized Light Method*. 2014. 10 p.

12. Johnsen I.A., Stenius P.I., Tammelin T., Österberg M., Johansson L., Laine J. The Influence of Dissolved Substances on Resin Adsorption to TMP Fine Material. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2006, vol. 21, no. 5, pp. 629–637. <https://doi.org/10.3183/npprj-2006-21-05-p629-637>

13. Luukko K., Kemppainen-Kajola P., Paulapuro H. Characterization of Mechanical Pulp Fines by Image Analysis. *Appita Journal*, 1997, vol. 50, pp. 387–392.

14. Mandlez D., Zangl-Jagiello L., Eckhart R., Bauer W. Softwood Kraft Pulp Fines: Application and Impact on Specific Refining Energy and Strength Properties. *Cellulose*, 2020, vol. 27, pp. 10359–10367. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03467-1>

15. Mayr M., Eckhart R., Thaller A., Bauer W. Characterization of Fines Quality and Their Independent Effect on Sheet Properties. In *Advances in Pulp and Paper Research. Proceedings of the 16th Fund. Res. Symp. Oxford, 2017*. Ed. by W. Batchelor, D. Söderberg. Manchester, FRC Publ., 2018, pp. 299–322. <https://doi.org/10.15376/frc.2017.1.299>

16. Motamedian H.R., Halilović A.E., Kulachenko A. Mechanisms of Strength and Stiffness Improvement of Paper After PFI Refining with a Focus on the Effect of Fines. *Cellulose*, 2019, vol. 26, pp. 4099–4124. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02349-5>

17. Popa V.I. *Pulp Production and Processing: From Papermaking to High-Tech Products*. Shawbury, Smithers Rapra Technology Ltd. Publ., 2013. 520 p.

18. Pöhler T., Ketoja J.A., Lappalainen T., Luukkainen V., Nurminen I., Lahtinen P., Torvinen K. On the Strength Improvement of Lightweight Fibre Networks by Polymers, Fibrils and Fines. *Cellulose*, 2020, vol. 27, pp. 6961–6976. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03263-x>

19. Winter A., Gindl-Altmutter W., Mandlez D., Bauer W., Eckhart R., Leitner J., Veigel S. Reinforcement Effect of Pulp Fines and Microfibrillated Cellulose in Highly Densified Binderless Paperboards. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 115, art. no. 125258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125258>

20. Wistara N.J., Young R.A. Properties and Treatments of Pulps from Recycled Paper. Part I. Physical and Chemical Properties of Pulps. *Cellulose*, 1999, vol. 6, pp. 291–324. <https://doi.org/10.1023/A:1009221125962>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest