

УДК 66.023.2

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОН СУХОГО СПОСОБА ПОДГОТОВКИ МАКУЛАТУРЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАРТОНА

© *Н.П. Мидуков**, *Ю.А. Лялина*, *В.С. Куров*, *А.С. Смолин*

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095 (Россия), e-mail: mnr83@mail.ru

Статья посвящена исследованию морфологических свойств волокон, подготовленных из макулатуры сухим способом. Сравняются длина волокна, грубость, скрученность, изогнутость, фибриляция, количество мелочи и другие свойства волокон, подготовленных традиционным мокрым и сухим способами. Оцениваются потери наполнителя – мела при подготовке макулатуры сухим способом. Исследуемые морфологические свойства волокон и содержание мела определяют поверхностные (шероховатость, толщину, белизну) и механические (сопротивление продавливанию, разрывную длину) показатели картона тест-лайнера с белым покровным слоем. Определение показателей морфологических характеристик волокон макулатурной массы позволяет рекомендовать комбинированный способ подготовки макулатуры (включающий сухую подготовку) для производителей тест-лайнера в нашей стране и в мире. А данные по изменению зольности до и после сухой подготовки волокон определяют потери наполнителя мела, содержание которого влияет на механические и поверхностные свойства картона. Предварительные результаты расчетов экономии энергии от внедрения сухого способа, проведенные при осуществлении промышленной выработки, показали, что при добавлении волокон (25% от общей массы волокна в картоне), подготовленных сухим способом к основному потоку с сохранением механических показателей производимого картона экономится до 50 кВт·ч/т энергии.

Ключевые слова: морфологические свойства волокон, зольность, мел, механические показатели, поверхностные показатели, картон тест-лайнер, белый покровный слой.

Результаты научной работы, представленные в статье, выполнены в рамках государственного задания FSEZ-2020-0004.

Введение

На сегодняшний день наиболее перспективным является производство тест-лайнера с белым покровным слоем, так как на него качественно и красочно наносится цветная иллюстрация, информация об упакованном товаре, реклама, в связи с чем картон с белым слоем стоит примерно на 25–30% дороже картона бурого цвета [1–3]. В России для производства белого покровного слоя гофрокартона, его верхнего плоского слоя (тест-лайнера) в основном используются первичные целлюлозные волокна, но они имеют высокую стоимость (около 40 тыс. руб./т), в то время как макулатура, содержащая вторичные волокна, стоит 12–18 тыс. руб./т в зависимости от марки [4–6]. По этой причине использование макулатуры при производстве картона тест-лайнера с белым покровным слоем является актуальной задачей для отечественной целлюлозно-бумажной промышленности.

Мидуков Николай Петрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: mnr83@mail.ru

Лялина Юлия Артемовна – студент, e-mail: julliajullia.22@yandex.ru

Куров Виктор Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, e-mail: vskurov18@mail.ru

Смолин Александр Семёнович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бумаги и картона, e-mail: smolin@gturp.spb.ru

В технологии картона тест-лайнера важным этапом является подготовка макулатурной массы. При ее подготовке традиционным мокрым способом затрачивается большое количество энергии. Концентрация волокон в массе в среднем составляет 4%, поэтому насосами перекачиваются большие объемы воды [7–9]. Целесообразным является повышение концентрации для уменьшения объема

* Автор, с которым следует вести переписку.

транспортируемой воды. Результаты расчетов экономии энергии, проведенные при осуществлении промышленной выработки, показали, что при добавлении волокон (25% от общей массы волокна в картоне), подготовленных сухим способом, к основному потоку с сохранением механических показателей производимого картона экономится до 50 кВт·ч/т энергии [9, 10]. После успешно реализованной опытно-промышленной выработки понимание причин изменения поверхностных и механических показателей при добавлении сухих волокон макулатуры в массоподготовительный отдел производства картона стало актуальным направлением исследований. Известно, что механические и поверхностные показатели тест-лайнера во многом зависят от морфологических свойств волокон макулатурной массы и от содержания наполнителя [11–14]. Поэтому исследование влияния морфологических свойств волокон макулатурной массы и содержания наполнителя на качество картона при использовании сухих волокон стало целью научной работы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: анализ показателей морфологических характеристик волокон макулатурной массы при различных способах подготовки; определение зольности сырья при подготовке макулатуры сухим способом и зольности двухслойного картона, полученного сухим способом в комбинации с мокрым. Определение показателей морфологических характеристик волокон макулатурной массы позволит рекомендовать комбинированный способ подготовки макулатуры для других производителей тест-лайнера в нашей стране и в мире.

Данные по изменению зольности до и после сухой подготовки волокон будут определять потери наполнителя мела, содержание которого влияет на механические и поверхностные свойства картона.

Материалы и методы исследования

Морфологические свойства волокон оценивались с помощью оборудования Morfi Compact (2009 г.), разработанного исследовательским центром бумаги Франции (СТР) и Французским институтом бумажной и печатной промышленности (EFPG).

Анализ волокон осуществлялся камерой высокого разрешения (1360×1024 пикселей) в специальной измерительной ячейке размером 30×1.5 мм, конструкция которой исключает риски деформации волокон и закупоривания ячейки [16].

При проведении эксперимента использовалась макулатура МС-7Б, характеристика которой представлена в ГОСТе [17]. Определение зольности макулатуры осуществлялось с помощью муфельной печи SNOL 15/1200. В работе исследовались: волокна, полученные сухим диспергированием; макулатура МС-7Б; картон тест-лайнер, полученный с использованием сухих волокон и полученный традиционным способом. Процедура определения зольности осуществлялась согласно ГОСТ 7629-93 [18].

Подготовка сырья проводилась в лаборатории технологии целлюлозы и композиционных материалов Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна согласно международным и российским стандартам. Вес абсолютно сухого волокна в образце и в полуфабрикате определялся по ISO 638 [19], влажность образцов контролировалась согласно ISO 287 [20]. Макулатурная масса для получения образцов подготавливалась при определенной концентрации согласно ISO 4119 [21]. Подготовка массы включала в себя роспуск макулатуры согласно стандарту ISO 5263-1 [22], размол в мельнице Валлей – согласно стандарту ISO 5264-2 [23]. В ходе подготовки контролировались морфологические характеристики волокон по ISO 16065-1 и степень помола согласно стандарту ISO 5267-1:1999 [24, 25]. Из подготовленной макулатуры выполнялись многослойные отливки в листоотливном аппарате согласно ISO 5269-2 [26]. Белизна определялась с помощью спектрофотометра Frank PТI (Германия, 2010 г.) с источником света D65 согласно ГОСТу 30113-94 (ISO 2470-77) [27], а шероховатость образцов – по методу Бендтсена [28]. Образцы для оценки механических показателей готовились в соответствии с ГОСТ-14363.4-89 [29]. Макулатура сухим способом подготавливалась в два этапа. На первом этапе листы измельчались до размеров не более 5×5 см), а на втором этапе диспергировались в роторно-вихревой мельнице РВМ 22. Образцы полученного двухслойного картона с белым покровным слоем включали в себя нижний слой, содержащий макулатуру МС-5Б около 65 г/м² и в верхний слой из макулатуры МС-7Б, не содержащей печатную краску, также массой около 65 г/м². Характеристика картона, полученного на предприятии, представлена в работах [30, 31], в ней же дано описание технологии производства картона тест-лайнера с белым покровным слоем.

Результаты и обсуждение

Объектом исследований была технология двухслойного картона тест-лайнера с белым покровным слоем из макулатуры МС-7Б. Содержание мела в макулатуре и в сухих волокнах, полученных после диспергирования в роторно-вихревой мельнице, определялись путем оценки зольности (рис. а), а зольность промышленных образцов картона, произведенного по традиционной мокрой технологии и по технологии с добавлением сухих волокон в массу, представлены на рисунке б.

Как следует из рисунка а, при подготовке сырья сухим способом теряется около 3% мела. Это связано с тем, что при сухой подготовке в роторно-вихревой мельнице мел удаляется при очистке. Однако при определении зольности промышленных образцов (рис. б), полученных традиционным способом и с добавкой сухого волокна в массу, существенного отличия не наблюдалось. Это связано по всей вероятности с тем, что мел одинаково вымывается на стадиях тонкой очистки и формирования покровного слоя, для которого волокна, подготовленные сухим и мокрым способом, перемешаны в массном бассейне перед размолом. При анализе графиков (рис. б) необходимо учесть, что исследуемый картон был двухслойным, нижний слой которого составлял 50% от общей массы картона и содержал преимущественно вторичные волокна сульфатной небеленой целлюлозы, практически не содержащей мел.

В экспериментальной части представлены данные морфологических характеристик волокон, подготовленных сухим способом. Данные морфологических характеристик волокон представлены в таблице 1.

Рубящее воздействие ножей роторно-вихревой мельницы и отсутствие пластифицирующей среды (воды) уменьшает длину волокна при использовании сухого способа подготовки макулатуры, что приводит к снижению механических показателей картона. Повышение доли мелочи также снижает механические показатели. Количество мелочи, микрофибрилляция, грубость снижают способность волокон к образованию межволоконных связей, что приводит к уменьшению прочности многослойного картона [32, 33]. Снижение фибрилляции волокон, которое отрицательно сказывается на механических показателях и положительно – на поверхностных, вызвано тем, что волокна, подготовленные сухим способом, не проходят стадию размола в массе. В результате внешняя стенка волокон остается неразрушенной, поэтому фибриллы, закрытые первичной стенкой, блокированы в волокне [34–37]. Вследствие снижения средней длины волокна уменьшается и количество макрофибрилл. В результате получается картон с менее прочным верхним слоем.

При подготовке макулатурной массы традиционным способом фибриллированные волокна соединяются между собой и формируют флокулы, сгустки, агломераты из волокон и пустоты, что приводит впоследствии к ухудшению качества формования и, как следствие, – к увеличению шероховатости картона. При добавлении волокон, подготовленных сухим способом, которые не склонны к фибрилляции и содержат много мелочи, получается картон с более низкой шероховатостью, что подтверждается исследованием промышленных образцов с использованием сухих волокон. В таблице 2 представлены данные для сопоставления шероховатости картона, полученного по традиционной мокрой технологии подготовки макулатуры и с использованием технологии сухого диспергирования (при подаче 25% сухих волокон в массу).

Использование технологии сухой подготовки макулатуры улучшает поверхностные свойства картона. При добавлении сухих волокон в массу вследствие некоторого ухудшения морфологического состава волокон снижаются механические показатели картона.



Средние значения зольности образцов: а – зольность сырья для получения картона (макулатура МС-7Б (1) и сухие волокна после мельницы РВМ22 (2)); б – зольность двухслойного картона (сухой способ в комбинации с мокрым (3) и традиционный способ (4))

Таблица 1. Показатели морфологических характеристик волокон макулатурной массы при различных способах подготовки

Параметры волокон	Способ подготовки макулатуры		Изменение параметров, %
	мокрый	сухой	
Длина волокна			
Среднеарифметическая Lc (n)	0.79	0.77	3
Средневзвешенная по длине Lc (l), мм	0.96	0.95	1.0
Ширина, мкм	24	23.7	1
Грубость, мг/м	0.24	0.33	32
Угол изгиба, °	134.7	135	–
Изогнутые волокна, %	25.9	36.2	33
Скрученность, %	7.3	8.6	16
Отношение к длине макрофибрилл, %	0.467	0.351	28
Поврежденные концы, %	30.57	33.04	8
Длина мелочи к Lc (n)	35.7	41.8	16
Длина мелочи к Lc (l), %	2.86	2.96	3
Площадь мелочи к общей площади объектов, %	9.56	13.62	35

Таблица 2. Сопоставление механических и поверхностные показатели картона тест-лайнера, полученного при различных способах подготовки

Показатели качества картона тест-лайнера	Способ подготовки макулатуры		Изменение параметров, %
	мокрый	комбинация сухого и мокрого	
Шероховатость, мл/мин	3200	2400	29
Толщина образцов, мкм	235	260	10
Белизна, %	75.4	75.7	–
Сопротивление продавливанию, кПа	265	255	4
Разрывная длина			
в продольном направлении MD, км	4.7	4.5	4
в поперечном направлении MC, км	2.3	2.25	2

Согласно морфологическим характеристикам волокон (табл. 1), увеличение грубости и скрученности волокон приводит к увеличению толщины отливки. В таблице 2 представлены поверхностные и механические показатели картона, согласно которым толщина образцов при добавлении волокон, подготовленных сухим способом, повышается примерно на 10%. Повышение толщины при добавлении волокон, подготовленных сухим способом и имеющих менее эластичную структуру (скрученных, грубых), объясняется тем, что волокна не укладываются плотно при формовании, оставляя пустое пространство. Низкая эластичность (при повышенной грубости, скрученности) и большее содержание мелочи отрицательно сказываются на образовании водородных связей, определяющих прочность картона. Как известно, для образования водородных связей необходимо, чтобы контактирующих между двумя волокнами зон было больше, а это возможно с уменьшением толщины картона равной массой квадратного метра. Повышение толщины картона, которое вызвано изменениями в морфологии волокон (повышении скрученности, грубости), косвенно объясняет снижение механических характеристик, зависящих от межволоконных сил связей, в большей степени обусловленных водородными связями.

Однако повышение толщины картона имеет и положительную сторону. Наряду с содержанием мела повышение толщины увеличивает оптическую плотность покровного слоя, за счет чего улучшаются поверхностные свойства. Поэтому белизна промышленных образцов, полученных с использованием технологии сухого диспергирования, несколько выше (табл. 2, п. 3). Механические характеристики картона, в том числе сопротивление продавливанию и разрывная длина при добавлении 25% сухих волокон, снизились незначительно.

Выводы

Проанализированы показатели морфологических характеристик волокон макулатурной массы при различных способах подготовки. Установлено, что сухой способ подготовки волокон снижает среднюю длину волокна в массе не более чем на 2.6% и повышает количество мелочи на 35%, что незначительно

снижает механические показатели произведенного из макулатурной массы картона при добавлении 25% волокон, подготовленных сухим способом. Сопротивление продавливанию и разрывная длина снизились не более чем на 5%.

Положительно сказывается добавка макулатуры, подготовленной сухим способом на поверхностные свойства. Согласно морфологическим характеристикам волокон макулатурной массы при сухом диспергировании повышается грубость (на 32%) и изогнутость волокон (на 33%), что приводит к повышению толщины получаемого двумя способами картона на 10%. Наиболее значимым положительным результатом от использования сухой подготовки макулатуры является снижение шероховатости с 3200 до 2400 мл/мин, которая определяется равномерностью распределения волокон в массе. При подаче волокон, подготовленных сухим способом, равномерность распределения волокон в массе повышается благодаря снижению фибрилляции (на 28.4%) и благодаря повышению содержания мелочи.

Экспериментально было установлено, что при сухом диспергировании часть мела удаляется воздушным потоком. Потери мела составили 3%, однако на зольность двухслойного тест-лайнера в целом, содержащего лишь 25% волокон, подготовленных сухим способом, потеря мела практически не повлияла.

Список литературы

1. Бондаренко А. Мировой рынок гофро материалов // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015. №10. С. 28–30.
2. Чуйко В.А. Курс – на новые технологии // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015. №10. С. 5–11.
3. Хасанов А. Новые драйверы роста // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016. №8. С. 30–31.
4. Бондаренко А. Макулатурные дела // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2014. №2. С. 38–39.
5. Сушко О.П., Пластинин А.В., Шиловская Н.А. К вопросу прогнозирования цен на мировом рынке на продукцию целлюлозно-бумажной промышленности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2013. №6. С. 135–151.
6. Алпеев Ю.В. Оценка текущей ситуации на рынке гофропродукции в РФ. Прогноз на 2016 год // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016. №4. С. 24–29.
7. Куров В.С., Кокушин Н.Н. Машины для производства бумаги и картона. СПб., 2017. 646 с.
8. Технология целлюлозно-бумажного производства. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. СПб.: Политехника, 2005. Т. 2. 423 с.
9. Мидуков Н.П., Куров В.С., Смолин А.С. Производство многослойного картона тест-лайнера с белым слоем. СПб., 2018. 208 с.
10. Мидуков Н.П., Куров В.С., Смолин А.С., Власов А.В., Дубравина Т.В. Технология многослойного композиционного картона тест-лайнера с использованием сухих волокон // Химическая технология. 2019. №10. С. 29–34.
11. Морозов Н.А., Кузнецов А.Г., Махотина Л.Г. Использование морфологических характеристик волокна для оценки качества переработки макулатурного сырья // Перспективы развития техники и технологий в целлюлозно-бумажной промышленности: материалы II Всероссийской отраслевой научно-практической конференции. Пермь, 2014. С. 305–311.
12. Midukov N.P., Schrinner T., Grossmann H., Smolin A.S. and Kurov V.S. Effect of virgin fiber content on strength and stiffness characteristics of a three-layer test-liner // BioRes. 2015. Vol. 10(1). Pp. 1747–1756.
13. Шрайнер Т., Гроссман Х., Мидуков Н.П., Смолин А.С., Куров В.С. Оценка технологических и энергетических параметров при подготовке бумажной массы для получения трёхслойного тест-лайнера // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. №7. С. 34–37.
14. Материалы концерна «BASF SE» – Техническая информация о химическом реагенте Plurafac®. 2014. 6 с.
15. Патент № 2687982 (РФ). Способ переработки целлюлозосодержащих отходов / Н.П. Мидуков, Д.С. Ефремов, В.С. Куров, А.С. Смолин / 17.05.2019.
16. Анализатор волокна Morfi Compact [Электронный ресурс]. URL: <http://pta-spb.ru/morfi-compact/>.
17. ГОСТ 10700-97. Макулатура бумажная и картонная. Технические условия. Взамен ГОСТ 10700-89. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 12 с.
18. ГОСТ 7629-93. Бумага и картон. Метод определения золы. М.: ИПК Издательство стандартов, 2018. 10 с.
19. ISO 638. Paper, board and pulps – Determination of dry matter content – Oven-drying method. 2008. 6 p.
20. ISO 287. Paper and board – Determination of moisture content of a lot – Oven-drying method. 2017. 10 p.
21. ISO 4119. Pulps – Determination of stock concentration. 1995. 3 p.
22. ISO 5263-1. Pulps – Laboratory wet disintegration – Part 1: Disintegration of chemical pulps. 2004. 6 p.
23. ISO 5264-2. Pulps – Laboratory beating – Part 2: PFI mill method. 2011. 11 p.
24. ISO 16065-1. Pulps – Determination of fibre length by automated optical analysis – Part 1: Polarized light method Pâtes. 2014. 10 p.
25. ISO 5267-1:1999. Pulps – Determination of drainability – Part 1: Schopper-Riegler method. 1999. 8 p.
26. ISO 5269-2. Pulps – Preparation of laboratory sheets for physical testing – Part 2: Rapid-Köthen method. 2004. 8 p.
27. ГОСТ 30113-94. Бумага и картон. Метод определения белизны. Взамен ГОСТ 7690-76. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. 11 с.

28. ISO 8791-2:1990. Бумага и картон. Определение шероховатости/ гладкости (методы воздушной утечки). Часть 2. Метод Бендстена. 1990. 11 с.
29. ГОСТ 14363.4-89. Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям. Взамен ГОСТ 14363.4-79. М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. 14 с.
30. Мидуков Н.П., Куров В.С., Смолин А.С., Власов А.В., Дубравина Т.В. Импортзамещающая технология производства картона вайт-лайнера из 100% макулатуры // Химическая технология. 2019. №1. С. 29–34.
31. Мидуков Н.П., Ефремов Д.С., Санников А.В., Зимин Р.А., Куров В.С., Смолин А.С. Разработка и промышленное внедрение технологии подготовки макулатуры сухим способом при производстве тест-лайнера // Гофроиндустрия на современном этапе развития. XVII междуна. науч.-практ. конф. СПб., 2018. С. 59–63.
32. Мидуков Н.П., Куров В.С., Смолин А.С. Межслоевая прочность картона // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2018. №1. С. 63–67.
33. Hirn U., Schennach R. Fiber-fiber bond formation and failure: mechanisms and analytical techniques. Oxford, 2017. Pp. 839–863.
34. Кларк Д. Технология целлюлозы. М., 1983. 456 с.
35. Бойкова В.С., Осовская И.И. Сорбционные свойства не размолотых целлюлозных волокон // Известия ВУЗ. Химия и химическая технология. 2015. №6. С. 74–78.
36. Гаузе А.А., Гончаров В.Н., Кугушев И.Д. Оборудование для подготовки бумажной массы. М., 1992. 352 с.
37. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling // BioResources. 2007. Vol. 2(4). Pp. 739–788.

Поступила в редакцию 17 декабря 2018 г.

После переработки 24 октября 2019 г.

Принята к публикации 24 октября 2019 г.

Для цитирования: Мидуков Н.П., Лялина Ю.А., Куров В.С., Смолин А.С. Морфологические свойства волокон сухого способа подготовки макулатуры при производстве картона // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 365–372. DOI: 10.14258/jcrpm.2020014821.

Midukov N.P.*, Lyalina Yu.A., Kurov V.S., Smolin A.S. MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF THE FIBERS OF DRY DEFIBRATION METHOD FOR CARDBOARD PRODUCTION

Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198095 (Russia), e-mail: mnp83@mail.ru

Article is devoted to a research of morphological properties of the fibers produced from recovered paper by dry defibration method. Fiber length, roughness, torsion, curvature, fibrillation, fines, etc. properties of the fibers produced by the traditional conventional and dry defibration method are compared. Filler (chalk) losses are estimated by recovered paper preparation in the dry defibration method. The studied morphological properties of fibers and content of chalk define surface (roughness, thickness, whiteness) and mechanical (bursting strength, breaking length) test-liner cardboard indicators with a white surface layer. Determination of morphological properties of recovered paper stock fibers allows recommending a combined method of recovered paper preparation (including dry defibration) for test-liner cardboard manufacturers in our country and in the world. Changes of ash content data before and after dry defibration of fibers determine losses of chalk filler. It is known that content of chalk affects mechanical and surface properties of cardboard. Preliminary results of calculations of energy saving from implementation of dry method, carried out during industrial production, showed that at addition of fibers (25% of total weight of fibers in cardboard) prepared by dry method to the main flow, with preservation of mechanical indices of produced cardboard, up to 50 kWh/t of energy is saved.

Keywords: morphological properties of fibers, ash cardboard, chalk, mechanical indicators, surface performance, roughness, cardboard test-liner, cardboard with a white surface layer.

References

1. Bondarenko A. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2015, no. 10, pp. 28–30 (in Russ.).
2. Chuyko V.A. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2015, no. 10, pp. 5–11 (in Russ.).
3. Khasanov A. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2016, no. 8, pp. 30–31 (in Russ.).
4. Bondarenko A. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2014, no. 2, pp. 38–39 (in Russ.).
5. Sushko O.P., Plastinin A.V., Shilovskaya N.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 135–151 (in Russ.).
6. Alpeyev Yu.V. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2016, no. 4, pp. 24–29 (in Russ.).
7. Kurov V.S., Kokushin N.N. *Mashiny dlya proizvodstva bumagi i kartona*. [Paper and Cardboard Machines]. St. Petersburg, 2017, 646 p. (in Russ.).
8. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Proizvodstvo bumagi i kartona. Ch. 1. Tekhnologiya proizvodstva i obrabotki bumagi i kartona*. [Technology of pulp and paper production. Paper and paperboard manufacturing. Part 1. Technology for the production and processing of paper and cardboard]. St. Petersburg, 2005, vol. 2, 423 p. (in Russ.).
9. Midukov N.P., Kurov V.S., Smolin A.S. *Proizvodstvo mnogosloynnogo kartona test-laynera s belym sloyem*. [Production of multilayer cardboard test-liner with a white layer]. St. Petersburg, 2018, 208 p. (in Russ.).
10. Midukov N.P., Kurov V.S., Smolin A.S., Vlasov A.V., Dubravina T.V. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2019, no. 10, pp. 29–34 (in Russ.).
11. Morozov N.A., Kuznetsov A.G., Makhotina L.G. *Perspektivy razvitiya tekhniki i tekhnologiy v tsellyulozno-bumazhnogo promyshlennosti. Materialy II Vserossiyskoy otraslevoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Prospects for the development of engineering and technology in the pulp and paper industry. Materials of the II All-Russian Industrial Scientific and Practical Conference]. Perm, 2014, pp. 305–311 (in Russ.).
12. Midukov N.P., Schrinner T., Grossmann H., Smolin A.S., Kurov V.S. *BioRes.*, 2015, vol. 10(1), pp. 1747–1756.
13. Schrinner T., Grossmann H., Midukov N.P., Smolin A.S., Kurov V.S. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2013, no. 7, pp. 34–37 (in Russ.).
14. *Materialy kontserna «BASF SE» – Tekhnicheskaya informatsiya o khimicheskom reagente Plurafac®*. [BASF SE Group Materials – Technical Information on the Plurafac® Chemical Reagent]. 20146 6 3. (in Russ.).
15. Patent 2687982 (RU). 17.05.2019 (in Russ.).
16. *Analizator volokna Morfi Compact* [Morfi Compact Fiber Analyzer] [Electronic resource]. URL: <http://pta-spb.ru/morfi-compact/>. (in Russ.).
17. *GOST 10700-97. Makulatura bumazhnaya i kartonnaya. Tekhnicheskiye usloviya. Vzamen GOST 10700-89*. [GOST 10700-97. Waste paper and cardboard. Technical conditions Instead of GOST 10700-89]. Moscow, 2003, 12 p. (in Russ.).
18. *GOST 7629-93. Bumaga i karton. Metod opredeleniya zoly*. [GOST 7629-93. Paper and cardboard. Ash determination method]. Moscow, 2018, 10 p. (in Russ.).
19. *ISO 638. Paper, board and pulps – Determination of dry matter content – Oven-drying method*, 2008, 6 p.
20. *ISO 287. Paper and board – Determination of moisture content of a lot – Oven-drying method*, 2017, 10 p.
21. *ISO 4119. Pulps – Determination of stock concentration*, 1995, 3 p.
22. *ISO 5263-1. Pulps – Laboratory wet disintegration – Part 1: Disintegration of chemical pulps*, 2004, 6 p.
23. *ISO 5264-2. Pulps – Laboratory beating – Part 2: PFI mill method*, 2011, 11 p.
24. *ISO 16065-1. Pulps – Determination of fibre length by automated optical analysis – Part 1: Polarized light method* *Pâtes*, 2014, 10 p.

* Corresponding author.

25. ISO 5267-1:1999. *Pulps – Determination of drainability – Part 1: Schopper-Riegler method*, 1999, 8 p.
26. ISO 5269-2. *Pulps – Preparation of laboratory sheets for physical testing – Part 2: Rapid-Köthen method*, 2004, 8 p.
27. GOST 30113-94. *Bumaga i karton. Metod opredeleniya belizny. Vzamen GOST 7690-76*. [GOST 30113-94. Paper and cardboard. Method for determining whiteness. Instead of GOST 7690-76]. Moscow, 1996, 11 p. (in Russ.).
28. ISO 8791-2:1990. *Bumaga i karton. Opredeleniye sherokhovatosti / gladkosti (metody vozduшной utechki). Chast' 2. Metod Bendstena*. [ISO 8791-2: 1990. Paper and cardboard. Determination of roughness / smoothness (air leak methods). Part 2. The Bendsten Method]. 1990, 11 p.
29. GOST 14363.4-89. *Tsellyuloza. Metod podgotovki prob k fiziko-mekhanicheskim ispytaniyam. Vzamen GOST 14363.4-79*. [GOST 14363.4-89. Cellulose. Method for preparing samples for physical and mechanical tests. Instead of GOST 14363.4-79]. Moscow, 1989, 14 p. (in Russ.).
30. Midukov N.P., Kurov V.S., Smolin A.S., Vlasov A.V., Dubravina T.V. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2019, no. 1, pp. 29–34 (in Russ.).
31. Midukov N.P., Yefremov D.S., Sannikov A.V., Zimin R.A., Kurov V.S., Smolin A.S. *Gofroindustriya na sovremennom etape razvitiya. XVII mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. [Corrugated industry at the present stage of development. XVII International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, 2018, pp. 59–63. (in Russ.).
32. Midukov N.P., Kurov V.S., Smolin A.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti*, 2018, no. 1, pp. 63–67 (in Russ.).
33. Hirn U., Schennach R. *Fiber-fiber bond formation and failure: mechanisms and analytical techniques*. Oxford, 2017, pp. 839–863.
34. Klark D. *Tekhnologiya tsellyulozy*. [Pulp Technology]. Moscow, 1983, 456 p. (in Russ.).
35. Boykova V.S., Osovskaya I.I. *Izvestiya VUZ. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2015, no. 6, pp. 74–78 (in Russ.).
36. Gauze A.A., Goncharov V.N., Kugushev I.D. *Oborudovaniye dlya podgotovki bumazhnoy massy*. [Pulp Preparation Equipment]. Moscow, 1992, 352 p. (in Russ.).
37. Hubbe M.A., Venditti R.A., Rojas O.J. *BioResources*, 2007, vol. 2(4), pp. 739–788.

Received December 17, 2018

Revised October 24, 2019

Accepted October 24, 2019

For citing: Midukov N.P., Lyalina Y.A., Kurov V.S., Smolin A.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 365–372. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020014821.