

УДК 676.2.038.23.024.5:676.266

ПЕРЕРАБОТКА ВЛАГОПРОЧНОЙ МАКУЛАТУРЫ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ. СООБЩЕНИЕ 2. СВОЙСТВА ВТОРИЧНОГО ВОЛОКНА

© **Ю.Д. Алашкевич, Р.З. Пен*, Н.В. Каретникова, Л.В. Чендылова, В.А. Кожухов, И.А. Воронин**

*Сибирский государственный университет науки и технологий им.
академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31,
Красноярск, 660037 (Россия), e-mail: robertpen@yandex.ru*

Изучено влияние условий термохимической обработки (варки) и массного размола на свойства вторичного волокна (макулатурной массы) из влагопрочной бумаги, покрытой полиуретановой дисперсией с поперечной шшивкой полиазиридином. Макулатуру измельчали до размера частиц 5–8 мм в мельнице сухого помола, обрабатывали раствором персульфата и гидроксида натрия при температуре 70 °С и гидромодуле 6. Продолжительность варки варьировали от 1 до 5 ч, расход персульфата натрия – от 2 до 12%, гидроксида натрия – от 0.5 до 3% от массы а. с. макулатуры. Вторичное волокно получали роспуском пульпы в гидроразбивателе (дизинтеграторе). Зависимость длины и фактора формы вторичных волокон от условий варки отсутствовала. Установлено небольшое увеличение ширины волокон с повышением рН варочного раствора: от 26.5 мкм при рН 3–4 до 29 мкм при рН 8..9. Предположительная причина – набухание клеточной стенки. Размол макулатурной массы выполняли гидродинамическим (безножевым) способом в установке «струя–преграда». Прочностные свойства бумажных отливок соответствуют характеристикам, присущим вторичным волокнистым полуфабрикатам.

Ключевые слова: влагопрочная бумага, макулатура, роспуск макулатуры, сухое измельчение макулатуры, варка макулатуры, свойства макулатуры.

Введение

Продолжая начатые ранее исследования [1], изучили свойства вторичного волокна, полученного роспуском влагопрочной бумаги, покрытой полиуретановой дисперсией с поперечной шшивкой полиазиридином.

Вторичное волокно изначально имеет более низкие размерные и бумагообразующие характеристики по сравнению с первичным целлюлозным волокном. В процессах производства бумаги размол первичного волокна уже приводит к уменьшению его физических размеров, а сушка на 20–40% снижает способность

Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук, профессор, академик РАО, заведующий кафедрой машин и аппаратов промышленных технологий (МАПТ), e-mail: mapt@sibgau.ru

Пен Роберт Зусьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры МАПТ, e-mail: robertpen@yandex.ru

Каретникова Наталья Викторовна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры МАПТ, e-mail: karetnikova-tata@yandex.ru

Чендылова Лариса Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МАПТ, e-mail: lorik-krsk@mail.ru

Кожухов Виктор Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МАПТ, e-mail: vkozuhkhov@mail.ru

Воронин Иван Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры МАПТ, e-mail: ivan_voronin@list.ru

целлюлозного волокна к набуханию из-за его необратимого орогования. Следовательно, в процессах подготовки макулатурного волокна необходимо не только эффективно удалять посторонние включения, но и создавать условия, способствующие восстановлению физических параметров и механических свойств вторичных целлюлозных волокон [2].

Восстановлению физических параметров макулатурного волокна способствуют механохимические методы обработки [3], обеспечивающие доступность воды к целлюлозному волокну и приводящие к его набуханию, а также оказывающие благоприятное влияние на его фибриллярную структуру. Частичное восстановление бумагообра-

* Автор, с которым следует вести переписку.

зующих свойств макулатурного волокна происходит в процессе размола за счет развития его внешней поверхности и фибрилляции. Однако было установлено, что при достижении одной и той же степени помола средневзвешенная длина вторичных целлюлозных волокон ниже, чем у первичных, за счет большей массовой доли мелкого волокна [4]. Поэтому процесс механической обработки желательно проводить с сохранением длины волокна путем более мягкого (безножевого) воздействия на него. Бумага, полученная из волокнистых материалов, предварительно обработанных безножевым способом, значительно прочнее, нежели бумага из волокон после ножевого размола [5, 6].

Промышленность выпускает разнообразные аппараты с гидродинамическим воздействием на материал (например, двухшнековые аппараты АТ-303 и другие производства АО «Петрозаводскбуммаш» [2, 7]), которые могут применяться для роспуска труднороспускаемых видов макулатуры (ламинированной, влагопрочной и т.п.).

В статье приведены результаты исследования безножевого размола вторичного волокна из влагопрочной макулатуры с полиуретановым покрытием; конечная цель – оценка возможности возврата (рецикла) макулатурной массы в основной технологический поток без ухудшения качества готовой продукции.

Экспериментальная часть

Исследуемый материал представлял собой бумагу промышленной выработки из хлопковой целлюлозы. Физические свойства бумаги определяли стандартными методами: сопротивление разрыву и удлинение при разрыве по ГОСТ 1924.1 на динамометре РМБ-30-2М; прочность на излом по ГОСТ 13325.2 на аппарате DRK 111В; сопротивление продавливанию по ГОСТ 13325.2 на приборе F18530; сопротивление раздиранию по ГОСТ 13525 на приборе Р-1, влагопрочность при растяжении определяли по ГОСТ Р ИСО 3781-2016 после погружения в воду на 2 ч и характеризовали отношением разрывных усилий мокрого и сухого образцов бумаги соответственно (в процентах). Характеристика бумаги приведена в таблице 1.

Бумажные листы измельчили в дисковой мельнице сухого помола до размера частиц 5...8 мм. Измельченную воздушно-сухую бумагу смешивали в стеклянных стаканах с водным раствором, содержащим персульфат и гидроксид натрия, и помещали в термостат для проведения «варки». По окончании варки отбирали пробу щелока, в которой определяли концентрацию остаточного персульфата натрия йодометрическим методом [8] и величину рН. Содержимое каждого стакана переносили в дезинтегратор системы ЦНИИБ, разбавляли водой до гидромодуля 30 и проводили роспуск пульпы в течение 10 мин. Обработанную в дезинтеграторе пульпу промывали теплой водой в лабораторной сече.

В программу исследования влияния условий варки на размерные характеристики и белизну вторичного волокна включили следующие факторы: X_1 – продолжительность варки в диапазоне от 1 до 3 ч; X_2 – расход (количество, заданное на варку) персульфата натрия в диапазоне от 2 до 6% от массы а. с. бумаги; X_3 – расход гидроксида натрия в диапазоне от 0.5 до 1.5% от массы а.с. бумаги.

Эти независимые переменные варьировали в соответствии с трехуровневым планом второго порядка [9, 10]. Статистическую обработку выполнили средствами пакета прикладных программ Statgraphics Centurion XVI [11].

Жидкостный модуль 6, температура варки 70 °С и продолжительность роспуска сваренной пульпы в дезинтеграторе 10 мин оставались неизменными во всех опытах.

Результаты опытов представлены следующими выходными параметрами: Y_1 – величина рН щелока; Y_2 – белизна отливок, %; Y_3 – средневзвешенная длина волокон, мм; Y_4 – средневзвешенная ширина волокон, мкм; Y_5 – фактор формы волокон, %.

Размерные характеристики вторичных целлюлозных волокон измерены на приборе Fiber Tester [12]. Белизну вторичного волокна определяли в соответствии с ГОСТ 30113-94.

Зависимости выходных параметров от переменных факторов варки аппроксимировали уравнениями регрессии второго порядка. Полученные уравнения использовали для графического представления результатов.

Изучение особенностей массного размола вторичного волокна выполнили на лабораторной установке гидродинамического (безножевого) размола типа «струя–преграда» [6, 7] (рис. 1). Работа аппарата циклическая. Волокнистая суспензия из расходной емкости 6 всасывается в рабочий цилиндр 9 и выталкивается в виде струи через отверстие насадки (сопла) 4 на преграду в размольной камере 1. Условия размола: концентрация волокнистой суспензии – 1%; диаметр отверстия насадки – 2 мм; расстояние от насадки до преграды – 10 мм; давление в рабочем цилиндре – 12 МПа.

Таблица 1. Характеристика бумаги, использованной в экспериментах

Наименование свойств	Величины свойств в направлениях	
	продольном	поперечном
Разрывная длина, км	9.94	5.61
Удлинение при разрыве, %	6.10	10.2
Сопротивление: излому, число двойных перегибов	596	450
Влагопрочность, %	51.0	49.2
Масса 1 м ² , г	93.5	
Плотность, г/см ³	0.813	

Пробы волокнистой массы для последующих анализов отбирали в ходе процесса размола через равные промежутки времени 140 с (20 циклов), 280 с (40 циклов) и 420 с (60 циклов). Отливки с массой 1 м² 60 г для определения прочностных свойств вторичного волокна изготавливали на листоотливном аппарате ЛА-3 в соответствии с ГОСТ 14383.4.

В дополнение к общепринятым показателям определяли характеристику неоднородности («облачность просвета») бумажных отливок по их фотографиям в проходящем свете [13]. Неоднородная бумага имеет повышенную склонность к короблению, худшие прочностные и печатные свойства [14]. Для фотографирования отливок в проходящем свете изготовили устройство, состоящее из плоского светодиодного светильника Led Panel, Shining T020-A-366060-B (мощность – 40 W, световой поток – 4350 люменов, цветовая температура – 4000 K) и экрана с круглым отверстием по размеру отливки. Облачность просвета бумаги анализировали с помощью компьютерной программы Sorbfil (ЗАО «Сорбполимер»), используемой для денситометрии пятен в тонкослойной хроматографии. Программа производит расчет видеобразия выделенного участка просвета бумаги в виде узкой полосы – трека, с построением аналоговой кривой отклонения оптической плотности пятен в треке от яркости фона и нахождением «пику» на этой кривой. При количественном расчете трека исходят из предположения, что размер пятна (площадь пика S) и его оптическая плотность (высота пика) пропорциональны количеству вещества в пятне.

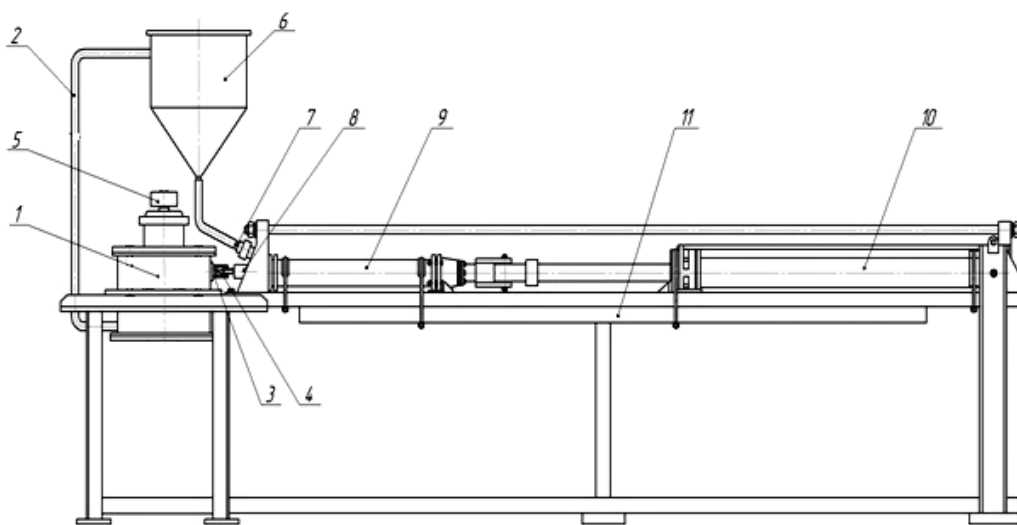


Рис. 1. Схема экспериментальной размольной установки типа «струя-преграда»: 1 – размольная камера; 2 – трубопровод возврата; 3 – раструб; 4 – насадка; 5 – тормозное устройство; 6 – емкость; 7 – всасывающий клапан; 8 – выпускной клапан; 9 – рабочий цилиндр; 10 – приводной цилиндр; 11 – рама

Обсуждение результатов

Условия варок и результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Влияние состава варочного раствора и продолжительности варки на величину рН щелока обсуждалось в первом сообщении [1]. Изменение продолжительности варки слабо повлияло на величину и характер изменения рН. В значительно большей степени на этот показатель влияет расход реагентов варочного раствора, это влияние отражено на рисунке 2. Все варки завершились в диапазоне кислотности реакционной

среды от почти нейтральной (рН 8–9 при минимальной начальной концентрации персульфата натрия и максимальной – гидроксида натрия) до кислой (рН 2,5–3 при максимальной начальной концентрации персульфата натрия и минимальной – гидроксида натрия).

Зависимость белизны отливок от расхода реагентов варочного раствора (рис. 3) согласуется с известными закономерностями в области теории и технологии отбеливания целлюлозы. Увеличение расхода персульфата натрия, являющегося отбеливающим реагентом, при прочих равных условиях сопровождается повышением белизны волокнистой массы. Увеличение концентрации гидроксида натрия, напротив, при прочих неизменных условиях приводит к снижению белизны. Диапазон изменения белизны, в пределах изученной области факторного пространства, весьма внушительный – от 84 до 92%. Сравнение рисунков 2 и 3 подтверждает связь между рН раствора и белизной целлюлозы; коэффициент линейной корреляции между этими показателями равен 0.92.

На рисунке 4 изображены распределения по длине и по ширине целлюлозных волокон, полученных варкой по режиму №1. Такой же вид имеют распределения у образцов, полученных по остальным 14 режимам. Общий вид распределений типичен для размолотых растительных волокон разного происхождения: из древесины и соломы; после сульфатной и пероксидной варок [15, 16]. Для длины характерно лог-нормальное распределение, а для ширины – близкое к нормальному распределению Гаусса.

Дисперсионным анализом установлено, что продолжительность варки (переменный фактор X_1) в принятом диапазоне ее варьирования не оказала статистически значимого влияния (при пороговом уровне значимости 5%) ни на одну из размерных характеристик волокон Y_3 , Y_4 , Y_5 , а расходы персульфата и гидроксида натрия (факторы X_2 и X_3) повлияли на параметр Y_4 – среднечисленную ширину волокон.

Таблица 2. Условия варок, рН щелока и свойства вторичного волокна

№	X_1 , ч	X_2 , %	X_3 , %	Y_1 , рН	Y_2 , %	Y_3 , мм	Y_4 , мкм	Y_5 , %
1	1	2	0.5	5	91.7	0.910	28.4	84.6
2	3	2	0.5	5	91.9	0.927	28.5	84.5
3	1	6	0.5	3	91.7	0.869	28.0	84.9
4	3	6	0.5	2.5	91/9	0.920	27.8	84.8
5	1	2	1.5	9	83.5	0.948	28.3	84.4
6	3	2	1.5	8.5	84.5	0.946	28.8	84.1
7	1	6	1.5	4	89.1	0.902	26.7	85.2
8	3	6	1.5	3	89.0	0.911	27.1	84.9
9	1	4	1	4	88.9	0.924	27.2	84.9
10	3	4	1	4	88.8	0.890	27.2	85.2
11	2	2	1	7	87.5	0.913	28.7	84.8
12	2	6	1	3	90.5	0.889	26.8	85.4
13	2	4	0.5	3	91.6	0.908	27.8	84.7
14	2	4	1.5	5	86.0	0.940	28.4	84.6
15	2	4	1	4	88.7	0.891	27.4	84.9

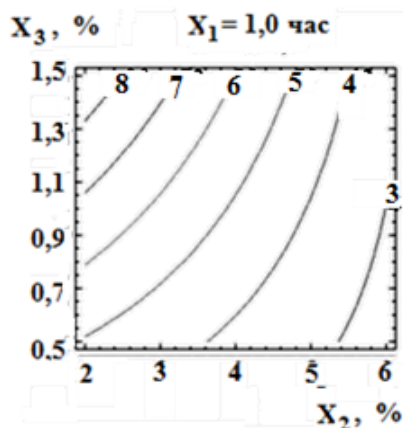


Рис. 2. Зависимость величины рН щелока Y_1 от состава варочного раствора (продолжительность варки 1 ч)

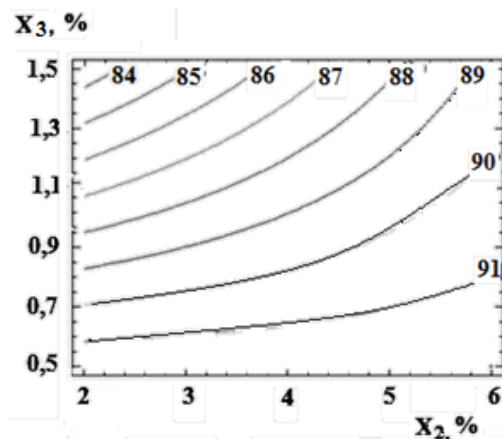


Рис. 3. Зависимость белизны отливок из вторичного волокна Y_2 , % от расхода реагентов на варку

Рисунок 5 иллюстрирует влияние расхода реагентов при варке на ширину волокон. Небольшое, но статистически значимое изменение ширины (в пределах около 7.5%) связано, вероятно, с набуханием клеточных стенок. В пользу такой интерпретации свидетельствует сравнение рисунков 2 и 5: положение области наибольших величин ширины волокон на рисунке 5 совпадает с расположением областей наибольших величин рН на рисунке 2.

Результаты экспериментов по размолу вторичного волокна в установке типа «струя-преграда» приведены на рисунке 6. Изменение свойств отливок в ходе размола в целом соответствуют существующим представлениям об этом производственном процессе. Все прочностные свойства увеличиваются по мере роста степени помола.

Интерполяцией по приведенным кривым (звездочки на рис. 6) определены характеристики вторичного волокна при степени помола 60 °ШР: разрывная длина – 3.0 км; сопротивление излому 12 двойных перегибов, продавливанию – 95 кПа, раздиранию – 600 мН. Прочностные свойства бумажных отливок соответствуют характеристикам, присущим вторичным волокнистым полуфабрикатам (макулатурной массе) [2, 17–19].

Облачность просвета отливок, изготовленных из вторичного волокна, полученного роспуском невлагоустойчивой макулатуры, составляла 190–250 единиц. Одной из причин повышенной облачности отливок в обсуждаемом исследовании является, вероятно, присутствие в волокнистой суспензии, наряду с обычными флоккулами, также пучков волокон, не полностью диспергированных в процессе роспуска макулатуры. Косвенным подтверждением этого служит уменьшение показателя облачности по мере увеличения степени помола (рис. 6).

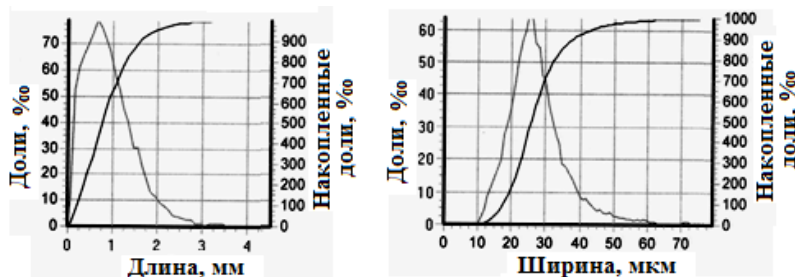


Рис. 4. Интегральные и дифференциальные кривые распределения волокон по длине Y_3 и ширине Y_4

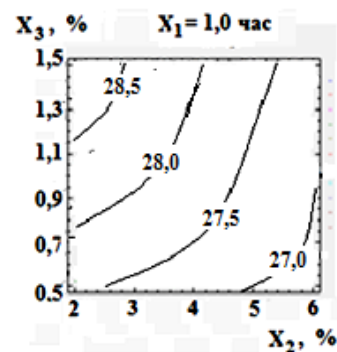
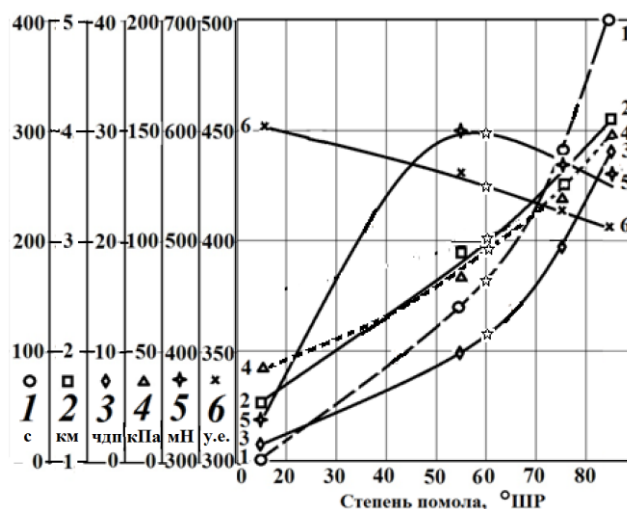


Рис. 5. Зависимость ширины волокон Y_3 , мкм, от расхода реагентов на варку (продолжительность варки 1 ч)

Рис. 6. Изменение свойств отливок в процессе размола вторичного волокна: 1 – продолжительность размола, с; 2 – разрывная длина, км; 3 – сопротивление излому, число двойных перегибов; 4 – сопротивление продавливанию, кПа; 5 – сопротивление раздиранию, мН; 6 – облачность просвета отливок, S/1000, условные единицы



Заключение

Макулатура из бумаги, покрытой полиуретановой дисперсией с поперечной сшивкой полиазиридином, может быть переработана во вторичное волокно с приемлемыми бумагообразующими свойствами, характерными для макулатурной массы из других видов влагопрочной бумаги.

Поскольку на реальном предприятии доля вторичного волокна, возвращаемого в производственный поток, невелика (обычно не превышает 0.5% от массы вырабатываемой бумаги), этот рецикл не окажет отрицательного влияния на качество производимой продукции, а дополнительные затраты на его реализацию окупятся экономией дорогостоящего хлопкового сырья.

Список литературы

1. Алашкевич Ю.Д., Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В. Переработка влагопрочной макулатуры с полимерным покрытием. 1. Роспуск макулатуры // *Химия растительного сырья*. 2019. №4. С. 399–405.
2. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. СПб., 2004. 316 с.
3. Пузырев С.С., Тюрин Е.Т., Волков В.А., Ковалева О.П. Переработка вторичного волокнистого сырья. СПб., 2007. 467 с.
4. Черная И.И., Брянцева З.У. Влияние размола на изменение структуры макулатурных волокон // *Целлюлоза. Бумага. Картон*. 1993. № 8–9. С. 28–29.
5. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 1990. 361 с.
6. Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Решетова Н.С. Процесс безножевой обработки волокнистой суспензии в установке «струя-преграда» // *Химия растительного сырья*. 2009. №2. С. 157–163.
7. Kryazhev A., Shpacov P., Vasilieva E. et al. The possibilities for processing of laminated and moisture-proof wastepaper // *East European Paper Recycling Symposium*. Warsaw, 1997. Pp. EX1–EX8.
8. Крешков А.П. Основы аналитической химии: в 2 т. М., 1970. Т. 2. 412 с.
9. Пен Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства. Красноярск, 1982. 192 с.
10. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976. 284 с.
11. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion. Красноярск, 2014. 293 с.
12. Karlsson H. Fiber Guide. Fiber analysis and process. Applications in the pulp and paper industry. AB Lorentzen&Werthe, 2006. 120 p.
13. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В. Измерение облачности просвета бумаги // *Перспективы развития техники и технологии в целлюлозно-бумажной и лесоперерабатывающей промышленности: материалы конференции*. Екатеринбург, 2019. С. 70–72.
14. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Изд. 5. М., 2012. 381 с.
15. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Шапиро И.Л. Пероксидная целлюлоза. Saarbrücken, 2013. 241 с.
16. Вшивкова И.А., Пен Р.З., Каретникова Н.В. Свойства пероксидной целлюлозы из однолетних растений. 3. Размерные характеристики волокон из пшеничной соломы // *Химия растительного сырья*. 2013. №2. С. 37–41.
17. Ванчаков М.В., Кулешов А.В., Дубовой Е.В., Казаков Я.В., Дубовый В.К. Технология и оборудование переработки макулатуры. 3-е изд., испр. и доп. СПб., 2017. 322 с.
18. Тимошук Т.С., Васильева Е.И. Опыт переработки влагопрочной макулатуры на Красногородской экспериментальной бумажной фабрике // *Целлюлоза. Бумага. Картон*. 1998. №1–2. С. 24–25.
19. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И., Блинова Л.А. Свойства целлюлозных волокон и их влияние на физико-механические характеристики бумаги и картона. Архангельск, 2011. 176 с.

Поступила в редакцию 17 сентября 2019 г.

После переработки 7 ноября 2019 г.

Принята к публикации 2 декабря 2019 г.

Для цитирования: Алашкевич Ю.Д., Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В., Кожухов В.А., Воронин И.А. Переработка влагопрочной макулатуры с полимерным покрытием. Сообщение 2. Свойства вторичного волокна // *Химия растительного сырья*. 2020. №2. С. 365–371. DOI: 10.14258/jcrpm.2020025638.

Alashkevich Yu.D., Pen R.Z. , Karetnikova N.V., Chendylova L.V., Kozhukhov V.A., Voronin I.A.* THE CONVERSION OF THE MOISTURE-STABILITY WASTE-PAPERS WITH POLYMERIC COVERING. 2. CHARACTERISTIC OF THE WASTE PAPER

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Krasnoyarskiy Rabochiy, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: robertpen@yandex.ru

Influence of the thermochemical processing (the cook) conditions and of the milling on characteristic of the waste paper with polyurethan and polyaziridin was studied. The waste paper was reduced to the degree size of the particles 5...8 mm in mill of the dry grind and chemical processing under higher temperature (to 70 °C) by solution, contain sodium persulfate and hydroxide; duty of water 6. Duration of cook varied from 1 to 5 hours, expense of persulfate sodium varied from 2 to 12%, hydroxide sodium – from 0.5 to 3% from mass of the waste-papers. The secondary fiber was obtaining by breaking-up of the pulp in the hydropulper. The dependency of the length and factor of the form of the secondary fiber from conditions cook was absent. The slight width increasing of the fibers with the higher pH of cooking liquor was determined: from 26.5 мкм under pH 3–4 to 29 мкм under pH 8–9. The conjectural reason is swelling of the cell wall. The waste paper milling was executed in the «stream-barrier» machine. The strength properties of the paper correspond with the feature, inherent of the secondary pulp.

Keywords: Waste-paper, moist-stabile waste-paper, breaking-up of waste-paper, dry crush of waste-paper, cooking of waste-paper.

References

1. Alashkevich Yu.D., Pen R.Z., Karetnikova N.V., Chendylova L.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 4, pp. 399–405. (in Russ.).
2. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. T. I. Syr'ye i proizvodstvo polufabrikatov. Ch. 3. Proizvodstvo polufabrikatov.* [Pulp and paper technology. Vol. I. Raw materials and production of semi-finished products. Part 3. Production of semi-finished products]. St. Petersburg, 2004, 316 p. (in Russ.).
3. Puzyrev S.S., Tyurin Ye.T., Volkov V.A., Kovaleva O.P. *Pererabotka vtorichnogo voloknistogo syr'ya.* [Recycling of recycled fiber]. St. Petersburg, 2007, 467 c. (in Russ.).
4. Chernaya I.I., Bryantseva Z.U. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 1993, no. 8–9, pp. 28–29. (in Russ.).
5. Alashkevich Yu.D. *Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nykh mashinakh: dis. ... dokt. tekhn. nauk.* [Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines: dis. ... doc. tech. of sciences]. Krasnoyarsk, 1990, 361 p. (in Russ.).
6. Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Reshetova N.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2009, no. 2, pp. 157–163. (in Russ.).
7. Kryazhev A., Shpacov P., Vasilieva E. at al. *East European Paper Recycling Symposium.* Warsaw, 1997, pp. EX1–EX8.
8. Kreshkov A.P. *Osnovy analiticheskoy khimii.* [Fundamentals of Analytical Chemistry]. Moscow, 1970, vol. 2, 412 p. (in Russ.).
9. Pen R.Z. *Statisticheskiye metody modelirovaniya i optimizatsii protsessov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva.* [Statistical methods of modeling and optimization of pulp and paper production processes]. Krasnoyarsk, 1982, 192 p. (in Russ.).
10. Adler Yu.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy.* [Planning an experiment to find optimal conditions]. Moscow, 1976, 284 p. (in Russ.).
11. Pen R.Z. *Planirovaniye eksperimenta v Statgraphics Centurion.* [Planning an Experiment at Statgraphics Centurion]. Krasnoyarsk, 2014, 293 p. (in Russ.).
12. Karlsson H. *Fiber Guide. Fiber analysis and process. Applications in the pulp and paper industry.* AB Lorentzen&Wertrte, 2006, 120 p.
13. Pen R.Z., Karetnikova N.V., Chendylova L.V. «*Perspektivy razvitiya tekhniki i tekhnologii v tsellyulozno-bumazhnoy i lesopererabatyvayushchey promyshlennosti.*» *Materialy konferentsii.* ["Prospects for the development of machinery and technology in the pulp and paper and wood processing industries." Conference proceedings]. Yekaterinburg, 2019, pp. 70–72. (in Russ.).
14. Flyate D.M. *Svoystva bumagi.* [Paper properties]. Moscow, 2012, 381 p. (in Russ.).
15. Pen R.Z., Karetnikova N.V., Shapiro I.L. *Peroksidnaya tsellyuloza.* [Peroxide cellulose]. Saarbrucken, 2013, 241 p. (in Russ.).
16. Vshivkova I.A., Pen R.Z., Karetnikova N.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2013, no. 2, pp. 37–41. (in Russ.).
17. Vanchakov M.V., Kuleshov A.V., Dubovoy Ye.V., Kazakov Ya.V., Dubovyy V.K. *Tekhnologiya i oborudovaniye pere-rabotki makulatury.* [Technology and equipment for waste paper recycling]. St. Petersburg, 2017, 322 p. (in Russ.).
18. Timoshchuk T.S., Vasil'yeva Ye.I. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 1998, no. 1–2, pp. 24–25. (in Russ.).
19. Dul'kin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I., Blinova L.A. *Svoystva tsellyuloznykh volokon i ikh vliyaniye na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki bumagi i kartona.* [Properties of cellulose fibers and their effect on the physico-mechanical characteristics of paper and paperboard]. Arkhangelsk, 2011, 176 p. (in Russ.).

Received September 17, 2019

Revised November 7, 2019

Accepted December 2, 2019

For citing: Alashkevich Yu.D., Pen R.Z., Karetnikova N.V., Chendylova L.V., Kozhukhov V.A., Voronin I.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 2, pp. 365–371. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020025638.

* Corresponding author.

