

УДК 676.15

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ БУМАГИ ОТ БУМАГООБРАЗУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ

© Л.В. Юртаева*, Н.С. Решетова, Ю.Д. Алашкевич, Р.А. Марченко, Д.Ю. Васильева, Е.В. Каплев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. Мира, 82, Красноярск, 660049 (Россия), e-mail: donna_5@mail.ru

Большое практическое значение в качестве исходного материала для выделения целлюлозы имеет древесина. Древесина играет не только важную народно-хозяйственную роль в качестве строительного и отделочного материала, но и является одним из наиболее дешевых и широко используемых видов сырья для промышленного производства целлюлозы. В свою очередь, размалывающее оборудование служит для разделения целлюлозных материалов на волокна, измельчения волокон и сообщения им определенных свойств. Одним из важнейших свойств бумаги является механическая прочность. Стандарт предусматривает определенные требования к разным видам бумаги, в зависимости от потребительских условий использования готовой продукции. Прочность бумаги определяют различными показателями, характеризующими: сопротивление бумаги разрыву, продавливанию, раздиранию, надрыву, удлинению до разрыва. В данной работе рассмотрена роль размола волокнистых материалов в общем подготовительном цикле целлюлозно-бумажного производства, представлены преимущества безножевого размола, рассмотрены факторы, определяющие прочность бумаги, получены функциональные зависимости основных физико-механических характеристик готового продукта от комплексного параметра качества помола волокнистой массы и комплексного параметра машины. Определено численное значение комплексного параметра качества размола, в зависимости от продолжительности размола.

Ключевые слова: целлюлоза, размол, безножевая установка, дисковая мельница, волокнистая масса, длина волокна, фибриллирование, степень помола.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (номер темы FEFE-2020-0016).

Введение

Энергия является основой создания благосостояния общества. Важнейшими факторами, влияющими на объемы потребления энергоресурсов, являются темпы экономического роста, численность населения, динамика мировых цен на энергоресурсы, а также эффективность энергосберегающей политики [1–3]. Несмотря

Юртаева Лариса Владимировна – доцент, кандидат технических наук, e-mail: 2052727@mail.ru

Решетова Наталья Сергеевна – доцент, кандидат технических наук, e-mail: reshet@list.ru

Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, тел. (391) 227-36-54, e-mail: alashkevichud@sibsau.ru

Марченко Роман Александрович – и.о. заведующего кафедрой машин и аппаратов промышленных технологий, кандидат технических наук, тел. (391) 290-42-92, e-mail: marchenkora@sibsau.ru

Васильева Дарья Юрьевна – студент, e-mail: transforhaus9@gmail.com

Каплев Евгений Вячеславович – студент, e-mail: karlyov2017@mail.ru

на это необходимо учитывать, что:

– получение и использование энергии сопровождается загрязнением окружающей среды;

– энергию преимущественно получают с помощью углеводородов, которые в свою очередь являются исчерпаемыми и невозобновимыми ископаемыми.

Достаточно крупными потребителями электроэнергии являются предприятия целлюлозно-бумажной промышленности. На производство бумаги используется 24% потребляемой электроэнергии, картона – 9%, целлюлозы – 17%, древесной массы – 16%. Основная доля электроэнергии

* Автор, с которым следует вести переписку.

(около 85%) расходуется на электропривод технологических и вспомогательных механизмов. Это связано с тем, что основой любого производства в ЦБП служит глубокая термическая и химическая переработка древесного сырья с целью получения бумажно-картонной продукции. Индекс производства в ЦБП является наиболее высоким по сравнению с другими обрабатывающими отраслями, так как данная отрасль признана стратегически значимой для развития экономики, науки, образования и культуры нашей страны. Значительную экономию энергоресурсов следует ожидать от внедрения на предприятиях ЦБП энергосберегающей технологии, включающей в себя применение передовых технологических процессов, увеличивающих производительность установок, повышение качественных показателей готовой продукции, стабилизацию работы технологического оборудования [4–6].

К таким мероприятиям следует отнести прогнозирование качественных показателей готовой бумаги с учетом конструктивных и технологических параметров размольного оборудования. Размол волокнистых материалов является одним из компонентов общего процесса измельчения исходного сырья (балансов) в подготовительном цикле целлюлозно-бумажного производства до состояния отдельных разработанных волокон. Цель размола – сделать волокна гибкими, пластичными, увеличить их поверхность для эффективного связывания, что повысит прочность бумажного листа. В большинстве случаев самым эффективным оборудованием для размола являются дисковые мельницы, которые можно применять для размола практически всех волокнистых полуфабрикатов и при выработке почти всех видов бумаги. Однако в таких машинах волокна подвергаются сильным рубящим воздействиям и раздавливанию, что в конечном итоге приводит к снижению прочностных показателей готовой продукции и значительно затрудняет использование в производстве коротковолокнистых листовых пород древесины и оборотного брака [7–10].

Безножевой размол по сравнению с ножевым обеспечивает более мягкий, щадящий режим обработки, что особенно важно для волокнистой суспензии из оборотного брака, которая уже однажды претерпевала стадию размола.

Анализ литературных данных показал, что совершенствование процесса размола и оборудования обусловлено, прежде всего, необходимостью обеспечения требуемого качества готовой продукции; при снижении качества волокнистого сырья и полуфабрикатов, а также постоянным стремлением к снижению чрезмерно большого расхода энергии на размол [11–14].

Экспериментальная часть

Проблемой использования безожевого способа размола на предприятиях ЦБП являются высокие затраты электроэнергии.

На кафедре машин и аппаратов промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева ведутся исследования в области размола волокнистых полуфабрикатов с использованием как ножевого, так и безожевого способов размола. В данной работе рассмотрен вопрос интенсификации процесса безожевого размола волокнистых полуфабрикатов и разработан комплексный параметр эффективности размола.

Мы считаем, что процесс размола целлюлозы в размалывающих машинах зависит не только от конструктивных и технологических параметров, но и от морфологических свойств волокон. Так как получение готового продукта с нужными физико-механическими показателями в настоящее время в основном решается практическим путем, в работе поставлена задача – найти аналитическую зависимость между основными свойствами бумаги и качеством целлюлозы, полученной в процессе размола на безожевой размалывающей установке типа «струя-преграда».

Объектом исследования является белая сульфитная хвойная целлюлоза (БСХЦ).

Ниже приведена техническая характеристика экспериментальной установки безожевого размола типа «струя – преграда»:

Габаритные размеры установки (длина× ширина× высота), м	4.3×1.6×2.0
Гидроцилиндр приводной, тип – поршневой,	
внутренний диаметр, м	0.1
ход штока, м	1.2
Гидроцилиндр рабочий, тип – поршневой,	
внутренний диаметр, м	0.091
ход штока, м	1.2
Насосная станция гидронасос шестеренчатый НШ-2	2

производительность, м ³ /с	0.77×10 ⁻³
рабочее давление, МПа	0–13
рабочая среда	масло дизельное ДП-11
электродвигатель	АО-51-4-02 2 шт
частота вращения ротора, с ⁻¹	24.3
Узел комбинированного размола (диаметр × высота), м	0.45 × 0.65
Турбина типа – Пельтона	
диаметр, м	0.35
количество лопастей, шт	24

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки.

На качественные показатели размалываемой массы оказывают существенное влияние следующие основные конструктивные и технологические параметры работы экспериментальной установки «струя-преграда»: скорость истечения струи, диаметр насадки и угол конусности внутреннего сечения насадки, расстояние от насадки до преграды.

На основании работ [15–22] можно считать, что скорость истечения значительно влияет на силу удара струи о преграду и величину касательных напряжений сдвига, возникающих при растекании струи по преграде. Одновременно анализ этих работ показал, что эти силы невелики и не могут обеспечить разработку суспензии. Тем не менее скорость истечения струи оказывает существенное влияние на волновой характер движения струи, который в свою очередь определяет эффект ультразвуковой кавитации в месте контакта струи с преградой. Интенсивность размола возрастает с повышением скорости истечения струи.

Как указывает автор [23, 24], характер воздействия струи на быстро сменяющиеся преграды, как и на неподвижную стенку одинаков. На эффект взаимодействия струи с преградой, движущейся перпендикулярно направлению оси струи, может оказать влияние только слой жидкости, остающийся на ее поверхности в промежутках между ударами струи. В экспериментальных исследованиях скорость струи определялась по формуле (1)

$$v = \frac{V}{F \cdot T}, \text{ м/с} \quad (1)$$

где V – объем суспензии, м³, F – площадь поперечного сечения насадки, м², T – время истечения суспензии из цилиндра, с.

По проведенным замерам времени истечения суспензии из рабочего цилиндра при давлении 10 МПа и концентрациях 1, 2 и 3 кг/м³ для суспензии были определены скорости истечения струи.

Так, при диаметре насадки 0.002 м, давлении в рабочем цилиндре 10 МПа, концентрации 2 кг/м³ и 60° ШР время истечения суспензии – 13,8 сек.

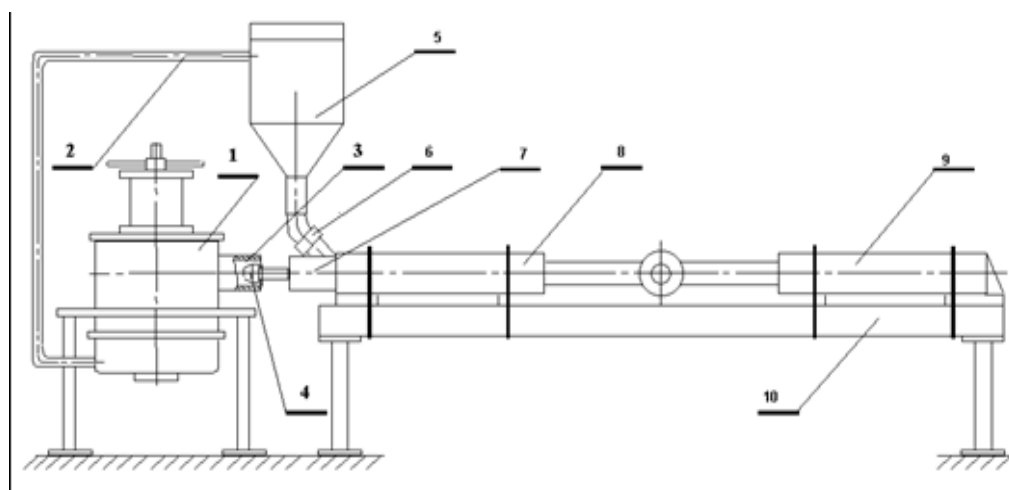


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «струя – преграда»: 1 – камера гидродинамического размола; 2 – трубопровод возврата; 3 – раструб; 4 – насадка; 5 – емкость; 6 – всасывающий клапан; 7 – выпускной клапан; 8 – рабочий цилиндр; 9 – приводной цилиндр; 10 – рама

Площадь поперечного сечения насадки:

$$F = \frac{\pi \cdot 0.002^2}{4} = 3.14 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2$$

Скорость истечения струи имеет значение

$$v = \frac{0.005}{3.14 \cdot 10^{-6} \cdot 13.8} = 115.4 \text{ м/с.}$$

Для того чтобы определить функциональную связь между конструктивными, технологическими параметрами и морфологическими свойствами волокон (т.е. комплексным параметром качества помола массы «К» и комплексным параметром машины «К_м»), выбраны следующие параметры целлюлозы: средняя длина волокна, внешняя удельная поверхность, межволоконные силы связи и продолжительность обработки [25, 26].

$$K = f(l, S, \sigma, t) = f(^{\circ}\text{ШР}), \quad (2)$$

где К – критерий качества; f – функция; l – длина волокна, м; S – внешняя удельная поверхность м²/кг; σ – межволоконные силы связи, Па; t – время размола; $^{\circ}\text{ШР}$ – градус помола по Шопперу-Риглеру.

Для получения аналитической зависимости прочности бумаги от свойств целлюлозы с учетом теории подобия и размерностей получен безразмерный параметр, который характеризует в совокупности выбранные параметры, т.е. комплексный параметр качества [9].

$$K = \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l} \cdot t} \quad (3)$$

Данный показатель в совокупности характеризует свойства целлюлозы, изменяющейся в процессе размола. По экспериментальным данным определено численное значение комплексного параметра качества размола, в зависимости от продолжительности размола, при разных скоростях истечения струи из насадки на преграду.

$$\begin{array}{ll} v = 115.4 \text{ м/с} & v = 97.1 \text{ м/с} \\ K = 4.85^{\circ} \text{ ШР} - 74 & K = 5.15^{\circ} \text{ ШР} - 69 \end{array} \quad (4)$$

Так как главной задачей процесса размола в большинстве случаев является получение массы, пригодной для приготовления бумаги с определенными механическими свойствами, в работе получена зависимость между свойствами бумаги и физико-механическими характеристиками или механической прочностью. Механическая прочность является одним из основных и важных свойств большинства видов бумаги, которая зависит от большого количества переменных факторов, таких как:

1. Прочность и длина исходных волокон, степень и характер переплетения волокон между собой, степень фибриллирования или изменения внешней удельной поверхности волокон, степень уплотнения листа, равномерность его отлива, наличие в бумаге веществ неволоконного характера, которые способствуют либо увеличению, либо уменьшению прочности бумажного листа.

2. Гибкость и эластичность волокон, наличие или отсутствие в бумажной массе слизи, а также показатель, выражающий отношение длины волокна к диаметру.

3. Гидрофильные добавки, вводимые в бумажную массу при размоле.

При рассмотрении факторов, определяющих прочность бумаги, большое внимание мы уделили переменным факторам, оказывающим влияние на характер распределения связей и напряжений в бумажном полотне. Эти факторы связаны как со свойствами самих волокон, так и с процессами изготовления бумаги на бумагоделательной машине. Для большинства вида бумаг понятие «механическая прочность бумаги» ассоциируется с такими свойствами, как сопротивление продавливанию, разрыву, раздиранию, излому. Все перечисленные переменные факторы могут быть разбиты на две группы:

- факторы, определяемые исходным волокнистым материалом;
- факторы, определяемые технологическим процессом изготовления бумаги.

Все другие факторы, оказывающие влияние на прочность готовой бумаги, в конечном счете, проявляют свое действие через указанные основные факторы.

Учитывая вышеизложенное, что прочностные характеристики бумаги являются функциями следующих параметров: l , S , σ , t , можно записать:

$$\begin{aligned} L &= f_1(l, S, \sigma, t) = \varphi_1(K), & P_a &= f_2(l, S, \sigma, t) = \varphi_2(K), \\ U &= f_3(l, S, \sigma, t) = \varphi_3(K), & E &= f_4(l, S, \sigma, t) = \varphi_4(K), \end{aligned}$$

где f_i – функция; L – разрывная длина, м; P_a – сопротивление продавливанию, Па; U – число двойных перегибов; E – раздирание, Па; $\varphi_1(K)$, $\varphi_2(K)$, $\varphi_3(K)$, $\varphi_4(K)$ – некоторая функция, зависящая от безразмерного параметра K .

В результате регрессионного анализа получены уравнения связи между механической прочностью бумаги и комплексным параметром качества помола волокнистой массы:

$$\text{при } v = 115.4 \text{ м/с} \quad L = 1321.90 - 10^{-15} \cdot \frac{\delta \cdot S}{l} t^2 + 6 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l}} \cdot t, \quad (5)$$

$$\text{при } v = 97.1 \text{ м/с} \quad L = 2457.40 - 7 \cdot 10^{-16} \cdot \frac{\delta \cdot S}{l} t^2 + 4 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l}} \cdot t, \quad (6)$$

$$\text{при } v = 115.4 \text{ м/с} \quad P_a = 16.79 \ln \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l}} \cdot t - 175.48, \quad (7)$$

$$\text{при } v = 97.1 \text{ м/с} \quad P_a = 27.66 \ln \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l}} \cdot t - 405.15, \quad (8)$$

$$\text{при } v = 115.4 \text{ м/с} \quad U = 60.65 + 6.0 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l}} \cdot t - 6 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{S \cdot \sigma}{l} t^2, \quad (9)$$

$$\text{при } v = 97.1 \text{ м/с} \quad U = 50.44 + 5.1 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{S \cdot \sigma}{l}} \cdot t - 4 \cdot 10^{-17} \cdot \frac{S \cdot \sigma}{l} t^2, \quad (10)$$

$$\text{при } v = 115.4 \text{ м/с} \quad E = 1332.7 \cdot e^{(-3 \cdot 10^{-10} (\sigma \cdot S)^{0.5} l^{-0.5} t)}, \quad (11)$$

$$\text{при } v = 97.1 \text{ м/с} \quad E = 2106.2 \cdot e^{(-4 \cdot 10^{-10} (\sigma \cdot S)^{0.5} l^{-0.5} t)}, \quad (12)$$

Полученные уравнения (5–12) показывают зависимость основных прочностных характеристик от бумагообразующих показателей волокнистой массы.

Процесс размола волокнистой массы в безножевых размалывающих машинах типа «струя – преграда» определяется системой параметров δ' , ρ , t , E , d , α , C , °ШР и может быть описан функциональной зависимостью

$$f = (\delta', \rho, t, E, d, \alpha, C, \text{°ШР}) = 0, \quad (13)$$

где f – функция; δ' – расстояние от насадки до преграды, м; ρ – импульс движения, кг·м/с; t – время размола, с; E – удельный расход электроэнергии, Дж/кг; d – диаметр насадки, м; α – угол конусности насадки, градус; C – концентрация обрабатываемой массы, кг/м³; °ШР – градус помола по Шопперу – Риглеру, градус.

В системе единиц, где основными являются длина, масса, время (L , M , T), эти параметры имеют следующие размерности:

$$[\delta'] = L, \quad [\rho] = MLT^{-1}, \quad [t] = T, \quad [E] = L^2T^{-2}, \quad [d] = L, \quad [\alpha] = 1, \quad C = ML^{-3}, \quad [^\circ\text{ШП}] = 1.$$

Из восьми размерных величин согласно π -теореме были составлены безразмерные комбинации. Выражая один из безразмерных параметров через остальные, выявили, что время размола волокнистой массы определенного качества в данной установке зависит от скорости истечения струи, т.е. с увеличением скорости время обработки массы уменьшается:

$$t = \frac{C \cdot \delta'^4 \varphi\left(\frac{\delta'}{d}; \frac{d}{\delta'}; \alpha; ^\circ\text{ШП}\right)}{\rho} \quad (14)$$

Определение комплексного параметра размалывающей машины K_m путем решения дифференциального уравнения движения размалываемой волокнистой массы сопряжено с очень большими математическими трудностями. Поэтому K_m найден из экспериментальных данных:

$$K_m = \frac{\rho \cdot t}{C \cdot \delta'^3 \cdot d} \quad (15)$$

В результате регрессионного анализа получены уравнения связи между прочностными характеристиками готовых отливок и комплексным параметром машины, функциональные зависимости представлены уравнениями (16–19).

$$L = 4414.2 \cdot \ln\left(\frac{\rho \cdot t}{C \cdot \delta'^3 \cdot d}\right) - 93624, \quad (16)$$

$$P_a = 26.71 \cdot \ln\left(\frac{\rho \cdot t}{C \cdot \delta'^3 \cdot d}\right) - 431.73, \quad (17)$$

$$U = 3 \cdot 10^{-9} \left(\frac{\rho \cdot t}{C \cdot \delta'^3 \cdot d}\right)^{1.15}, \quad (18)$$

$$E = 9659.7 - 385.01 \cdot \ln\left(\frac{\rho \cdot t}{C \cdot \delta'^3 \cdot d}\right), \quad (19)$$

Полученные уравнения показывают зависимость основных прочностных характеристик от конструктивных и технологических параметров работы безножевой размольной установки. Функциональная связь между комплексным параметром качества помола массы «К» и комплексным параметром машины « K_m » при разной степени помола представлена в таблице.

Значения комплексного параметра качества помола массы

Расчетные формулы по определению К	Градус помола по $^\circ\text{ШП}$					
	20	30	40	50	60	70
$K = \left(\sqrt{\frac{\sigma \cdot S}{l}} \cdot t\right) \cdot 10^{-7}$	23	53	111	164	217	249
$K = 4,85 \cdot ^\circ\text{ШП} - 74$	23	70	118	166	217	260
$K = 2,2 \cdot 10^{-8} \cdot K_m - 41$	22	55	127	169	211	242

Выводы

1. Показаны функциональные зависимости основных физико-механических характеристик готового продукта от комплексного параметра качества помола волокнистой массы и комплексного параметра машины.
2. Установлена функциональная связь между комплексным параметром качества помола массы «К» и комплексным параметром машины « K_m ».
3. Проведенные экспериментальные исследования хорошо согласуются с теоретическими предпосылками по определению комплексных параметров.
4. Для практического использования комплексного параметра процесса обработки волокнистой суспензии безножевым способом получены конкретные результаты при подборе основных технологических характеристик размольной машины в зависимости от качественных показателей бумаги.

Список литературы

1. Байков Н.М., Гринкевич Р.Н. Прогноз развития отраслей ТЭК в мире и по основным регионам до 2030 г. М., 2009. С. 5.
2. González I., Alcalá M., Chinga-Carrasco G. et al. From paper to nanopaper: evolution of mechanical and physical properties // *Cellulose*. 2014. Vol. 21. Pp. 2599–2609. DOI: 10.1007/s10570-014-0341-0.
3. Иванов С.Н. Технология бумаги. М., 2006. 696 с.
4. Gu F., Wang W., Cai Z. et al. Water retention value for characterizing fibrillation degree of cellulosic fibers at micro and nanometer scales // *Cellulose*. 2018. Vol. 25. Pp. 2861–2871. DOI: 10.1007/s10570-018-1765-8.
5. Krässig H.A. Cellulose: structure, accessibility and reactivity. Gordon and Breach, Yverdon. 1993. 376 p.
6. Hon D.N.A. Chemical modification of lignocellulosic materials. Marcel Dekker Inc. 1996. 384 p.
7. Pettersen R.C. The Chemical Composition of Wood // *The Chemistry of Solid Wood*. 1984. Vol. 207. Pp. 57–126. DOI: 10.1021/ba-1984-0207.ch002.
8. Qu T., Guo W., Shen L., Xiao J., Zhao K. Experimental Study of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose, and Lignin // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50, N18. Pp. 10424–10433. DOI: 10.1021/ie1025453.
9. Kamitakahara H., Koschella A., Mikawa Y., Nakatsubo F., Heinze T., Klemm D. Syntheses and Comparison of 2,6-Di-O-methyl Celluloses from Natural and Synthetic Celluloses // *Macromolecular bioscience*. 2008. Vol. 8, Pp. 690-700. DOI: 10.1002/mabi.200700291.
10. Heinze T., Liebert T., Koschella A. Esterification of Polysaccharides. Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 240 p.
11. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... докт. техн. наук. Л., 1980. 334 с.
12. Shurkina V.I., Marchenko R.A., Alashkevich Y.D. Research of the paper-forming properties of a fibrous material with the use of a tacking with curvilinear knives // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 467, P. 012002. DOI: 10.1088/1757-899x/467/1/012002.
13. Канавеллис Р. Струйный удар и кавитационное разрушение // *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1968. Т. 90, №3. С. 39–48.
14. Гончаров В.Н., Гаузе А.А., Аликин В.П. Машины для роспуска и безножевого размола бумажной массы. Л., 1979. 106 с.
15. Konturri E.J. Surface chemistry of cellulose: from natural fibres to model surfaces: Academic Dissertation Technische Universiteit Eindhoven, Nederland. 2005. 145 p.
16. Sczostak A. Cotton Linters: An Alternative Cellulosic Raw Material // *Macromolecular Symposia*. 2009. Vol. 280, N1. Pp. 45-53. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.200950606>.
17. Klemm D., Schumann D., Kramer F., Heßler N., Koth D., Sultanova B. Nanocellulose Materials – Different Cellulose, Different Functionality // *Macromolecular Symposia*. 2009. Vol. 280, N1. Pp. 60-71. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.200950608>.
18. Ерофеева А.А., Алашкевич Ю.Д., Барановский В.П. Анализ распределения скорости струи суспензии при течении ее в рабочих органах размольной установки «струя – преграда» // *Лесной вестник*. 2010. №4. С. 157–160.
19. Тавырин Н.П. Исследование гидромониторных струй // *Известия АН СССР. Отделение технических наук*. 1939. №7. С. 25–44.
20. Куклин И.С., Куликов Г.С., Падучева А.В. О давлении гидромониторной струи на плоскую преграду // *Труды Института горного дела АН СССР. Уральский филиал*. 1962. Вып. 3. С. 87–90.
21. Асатур К.Г. Гидравлический расчет гидроотбойки горных пород // *Изв. вузов. Горный журнал*. 1963. №7. С. 23–28.
22. Нурок Г.А. Гидромеханизация открытых горных разработок. М., 1970. 584 с.
23. Васютин В.Г. Интенсификация процесса комбинированного размола целлюлозных суспензий: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1987. 166 с.
24. Верещагин Л.Ф., Семерчан А.А., Филер Ф.М. Некоторые исследования струи воды, вытекающей из сопла под давлением до 2000 атмосфер // *Известия АН СССР. Отделение технических наук*. 1957. №1. С. 57–60.
25. Фляте Д.М. Свойства бумаги. СПб., 2012. 384 с.
26. Васильева Д.Ю., Юртаева Л.В., Алашкевич Ю. Д. Отдельные бумагообразующие свойства волокна при безножевом способе размола // *Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы 5 международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В.И. Комарова*. Архангельск, 2019. С. 81–87.

Поступила в редакцию 21 августа 2020 г.

После переработки 26 октября 2020 г.

Принята к публикации 13 ноября 2020 г.

Для цитирования: Юртаева Л.В., Решетова Н.С., Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Васильева Д.Ю., Каплев Е.В. Получение аналитической зависимости прочностных свойств бумаги от бумагообразующих показателей волокнистой массы // *Химия растительного сырья*. 2020. №4. С. 501–509. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048583.

Yurtaeva L.V.*, Reshetova N.S., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Vasilyeva D.Yu., Kaplev E.V. OBTAINING AN ANALYTICAL DEPENDENCE OF THE STRENGTH PROPERTIES OF PAPER ON THE PAPER-FORMING PARAMETERS OF THE FIBROUS MASS

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Krasnoyarskiy Rabochiy, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: donna_5@mail.ru

Wood is of great practical importance as a starting material for the recovery of cellulose. Wood plays not only an important economic role as a building and finishing material, but is also one of the cheapest and most widely used raw materials for the industrial production of cellulose vines. In turn, the grinding equipment serves to divide the cellulosic materials into fibers, from the grinding of the fibers and imparting certain properties to them. One of the most important properties of paper is mechanical strength. The standard provides for certain requirements for different types of paper, depending on the consumer conditions for the use of finished products. Durability of paper is determined by various indicators characterizing: paper resistance to a gap, break-down, tear, an anguish, lengthening to a gap. In this work, the role of milling of fibrous materials in the general preparatory cycle of pulp and paper production is considered, the advantages of knife-free milling are presented, the factors determining the strength of paper are considered, functional dependencies of the main physical and mechanical characteristics of the finished product on the complex parameter of the quality of pulp milling and the complex parameter of the machine are obtained. Numerical value of complex parameter of grinding quality is determined depending on duration of grinding.

Keywords: cellulose, grinding, bender, disk mill, pulp, fiber length, fibrillation, degree of grinding.

References

1. Baykov N.M., Grinkevich R.N. *Prognoz razvitiya otrasley TEK v mire i po osnovnym regionam do 2030 g.* [Forecast of the development of the fuel and energy complex industries in the world and by major regions until 2030]. Moscow, 2009, pp. 5. (in Russ.).
2. González I., Alcalá M., Chinga-Carrasco G. et al. *Cellulose*, 2014, vol. 21, pp. 2599–2609. DOI: 10.1007/s10570-014-0341-0.
3. Ivanov S.N. *Tekhnologiya bumagi.* [Paper technology]. Moscow, 2006, 696 p. (in Russ.).
4. Gu F., Wang W., Cai Z. et al. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 2861–2871. DOI: 10.1007/s10570-018-1765-8.
5. Krässig H.A. *Cellulose: structure, accessibility and reactivity.* Gordon and Breach, Yverdon. 1993. 376 p.
6. Hon D.N.A. *Chemical modification of lignocellulosic materials.* Marcel Dekker Inc. 1996. 384 p.
7. Pettersen R.C. *The Chemistry of Solid Wood*, 1984, vol. 207, pp. 57–126. DOI: 10.1021/ba-1984-0207.ch002.
8. Qu T., Guo W., Shen L., Xiao J., Zhao K. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, vol. 50, no. 18, pp. 10424–10433. DOI: 10.1021/ie1025453.
9. Kamitakahara H., Koschella A., Mikawa Y., Nakatsubo F., Heinze T., Klemm D. *Macromolecular bioscience*, 2008, vol. 8, pp. 690–700. DOI: 10.1002/mabi.200700291.
10. Heinze T., Liebert T., Koschella A. *Esterification of Polysaccharides.* Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 240 p.
11. Alashkevich YU.D. *Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nykh mashinakh: dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk.* [Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in grinding machines: dissertation of Doctor of Technical Sciences]. Leningrad, 1980, 334 p. (in Russ.).
12. Shurkina V.I., Marchenko R.A., Alashkevich Y.D. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 467, id. 012002. DOI: 10.1088/1757-899x/467/1/012002.
13. Kanavellis R. *Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov*, 1968, vol. 90, no. 3, pp. 39–48. (in Russ.).
14. Goncharov V.N., Gauze A.A., Alikin V.P. *Mashiny dlya rospuska i beznozhevogo razmola bumazhnoy massy.* [Machines for breaking up and knifeless grinding of paper pulp]. Leningrad, 1979, 106 p. (in Russ.).
15. Konturri E.J. *Surface chemistry of cellulose: from natural fibres to model surfaces: Academic Dissertation Technische Universiteit Eindhoven, Nederland.* 2005. 145 p.
16. Sczostak A. *Macromolecular Symposia*, 2009, vol. 280, no. 1, pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.200950606>.
17. Klemm D., Schumann D., Kramer F., Heßler N., Koth D., Sultanova B. *Macromolecular Symposia*, 2009, vol. 280, no. 1, pp. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.200950608>.
18. Yerofeyeva A.A., Alashkevich YU.D., Baranovskiy V.P. *Lesnoy vestnik*, 2010, no. 4, pp. 157–160. (in Russ.).
19. Tavyrin N.P. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk*, 1939, no. 7, pp. 25–44. (in Russ.).
20. Kuklin I.S., Kulikov G.S., Paducheva A.V. *Trudy Instituta gornogo dela AN SSSR. Ural'skiy filial*, 1962, issue 3, pp. 87–90. (in Russ.).
21. Asatur K.G. *Gidravlicheskiy raschet gidrootboyki gornykh porod // Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1963, no. 7, pp. 23–28. (in Russ.).
22. Nurok G.A. *Gidromekhanizatsiya otkrytykh gornykh razrabotok.* [Hydromechanization of open pit mining]. Moscow, 1970, 584 p. (in Russ.).
23. Vasyutin V.G. *Intensifikatsiya protsessa kombinirovannogo razmola tsellyuloznykh suspenziy: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk.* [Intensification of the process of combined grinding of cellulose suspensions: dissertation of the candidate of technical sciences]. Krasnoyarsk, 1987, 166 p. (in Russ.).
24. Vereshchagin L.F., Semerchan A.A., Filer F.M. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk*, 1957, no. 1, pp. 57–60. (in Russ.).
25. Flyate D.M. *Svoystva bumagi.* [Properties of paper]. St. Petersburg, 2012, 384 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

26. Vasil'yeva D.YU., Yurtayeva L.V., Alashkevich YU. D. *Otdel'nyye bumagoobrazuyushchiye svoystva volokna pri beznozhevom sposobe razmola // Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy 5 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora V.I. Komarova*. [Separate paper-forming properties of fiber in the knifeless grinding method in "Problems of the mechanics of pulp and paper materials: materials of the 5th international scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarov"], Arkhangelsk, 2019, pp. 81–87. (in Russ.).

Received August 21, 2020

Revised October 26, 2020

Accepted November 13, 2020

For citing: Yurtaeva L.V., Reshetova N.S., Alashkevich Yu.D., Marchenko R.A., Vasilyeva D.Yu., Kaplev E.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 501–509. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048583.

