

УДК 676.15

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ (ОБЗОР)

© *А.В. Ушаков**, Ю.Д. Алашкевич, В.А. Кожухов, В.И. Ковалев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037 (Россия), e-mail: al.ushakov2194@mail.ru

Представлен обзор научной литературы, характеризующий основные направления современных исследований процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации. Описаны теоретические подходы в изучении качественных показателей волокнистой массы при ее обработке в ножевых размалывающих машинах.

Исследователями отмечается повышение бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик готовой продукции. В данной статье представлен обзор экспериментальных исследований процесса размола волокнистой массы высокой концентрации. Рассматривается: влияние интенсивности размола массы высокой концентрации на качество готовой продукции, сравнивается характер разработки волокон при размоле массы высокой и низкой концентрации. Экспериментальные исследования показывают, что увеличение интенсивности воздействия при размоле массы высокой концентрации приводит к снижению индекса поглощения энергии растяжения, также с увеличением интенсивности размола наблюдается снижение деформации листа бумаги. С повышением концентрации волокнистой массы наблюдается изменение степени расслоения, внутренней и внешней фибрилляции стенки волокна. Процесс размола волокнистой массы высокой концентрации сопровождается более высокими удельными энергозатратами, по сравнению с размолем при низкой концентрации, но наблюдения на уровне стенки волокна показывают более развитую внешнюю удельную поверхность.

Данный обзор научной литературы будет служить базой для дальнейших исследований в области размола волокнистых материалов высокой концентрации.

Ключевые слова: размол, масса высокой концентрации, удельная энергия размола, удельная нагрузка на край режущей кромки, интенсивность размола, внутренняя фибрилляция, внешняя фибрилляция, физико-механические свойства.

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

Размол является важнейшим этапом производства целлюлозно-бумажной продукции. Вопросом по-

Ушаков Александр Васильевич – младший научный сотрудник лаборатории глубокой переработки растительного сырья, e-mail: al.ushakov2194@mail.ru

Алашкевич Юрий Давыдович – профессор кафедры МАПТ, e-mail: alashkevichud@mail.sibsau.ru

Кожухов Виктор Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, e-mail: vkozuhkhov@mail.ru

Ковалев Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, e-mail: al.ushakov2194@mail.ru

вышения качества волокнистых полуфабрикатов, получаемых в процессе размола, занимаются ученые всего мира. Одним из перспективных направлений является повышение концентрации волокнистой массы для проведения процесса размола. Важно не только знать, но и понимать, как создать эти условия с учетом технологических особенностей размалывающего оборудования и основных факторов процесса размола.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Теоретический подход к решению вопроса оценки качества размола

У исследователей в области размола волокнистых материалов растительного происхождения к настоящему времени не сложилось единой позиции по вопросу качественной и количественной оценки показателей процесса. Кроме этого, различаются подходы к размолу волокнистого полуфабриката низкой и высокой концентрации. Разработка таких подходов к рассмотрению поведения водно-волокнистой среды в широком диапазоне концентраций в различных машинах и аппаратах ЦБП дает возможность выполнить постановку вопроса о механизме взаимодействия размалываемого материала с рабочими органами размалывающих машин.

Основная трудность в описании процесса размола при высокой и низкой концентрации заключается в различной реологии волокнистых суспензий. Суспензии целлюлозы с низкой концентрацией (1–5%) являются непрерывными или жидкими, которые полностью заполняют рабочую полость размалывающих машин. Следовательно, воздействие ножей размалывающих машин происходит равномерно во всем объеме волокнистой массы. Интенсивность воздействия ножей на единичное волокно в этом случае определяется количеством пересечений ножей рабочих органов машин, а затем в работах, представленных ранее [1–3], к этому вопросу подошли с точки зрения интенсивности размола в единицах энергии массы на удар.

При высокой концентрации (15–40%) суспензия целлюлозы представляют собой гетерогенные сжимаемые трехфазные смеси. Движущая сила для выталкивания волокна через зону размола обеспечивается самой мельницей, в том числе центробежной силой, вызываемой вращением диска ротора. Для оценки интенсивности размола в этом случае используются силовые параметры для оценки времени пребывания целлюлозы в зоне размола, из которого выражается количество ударов на единичное волокно. Разделив удельную энергию на количество ударов, получаем интенсивность в единицах удельной энергии за удар, также существует второй параметр для интенсивности – удельная энергия размола. В работах [1, 4, 5] объясняется важность этого параметра скоростью, с которой энергия передается целлюлозе в зоне размола.

Удельная энергия размола может быть определена по формуле (1)

$$E_{уд.} = \frac{P_{об} - P_0}{f \cdot c} \quad (1)$$

где $P_{об}$ – общая энергия, расходуемая в процессе размола, кВт·ч/т; P_0 – энергия, расходуемая при холостых оборотах, кВт·ч/т; f – производительность, м³/ч; c – концентрация, кг/м³.

Теория удельной нагрузки на край режущей кромки Q широко использовалась в течение многих лет для характеристики интенсивности размола в рафинерах с низкой концентрацией (3–5%). Разработанная опытным путем в работах [6, 7] удельная нагрузка определяется по формуле (2)

$$Q = \frac{P_{об} - P_0}{n \cdot z_p \cdot z_c \cdot l_{р.к.}} \quad (2)$$

где n – число оборотов, об/мин; z_p – число ножей ротора; z_c – число ножей статора; $l_{р.к.}$ – длина рабочей кромки ножа, м.

При получении целлюлозы термомеханическим способом [8] проведение внешней фибрилляции имеет ключевое значение наряду с гибкостью волокон. Такая обработка представляет собой процесс истирания, который тесно связан с затратами энергии при движении ножей. Ограничением является укорачивание волокна, которое определяется силами, действующими в межножевом зазоре или нормальной силы действующей на волокно.

В работе [9] для размола массы с низкой концентрацией нормальная сила на волокне рассчитывается по формуле (3)

$$f_N = \frac{\sqrt{\pi} \cdot d_0 \cdot C_S \cdot l^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{k \cdot G}}{0,012 \cdot T} \cdot \left(\frac{Q}{\mu \cdot s \cdot g \cdot z} \right)^{0,7} \quad (3)$$

где d_0 – наружный диаметр дисковой гарнитуры, м; b – ширина ножа, покрытого несущим волокном, м; C_S – концентрация волокнистой массы, кг/м³; G – ширина канавки, м; k – доля ширины канавки, из которой уловлено волокно; l – длина волокна, м; s – расстояние перемещения ножа, на которое действует сила, м; T – межножевой зазор, м; z – доля длины ножа, покрытого волокном; μ_E – эффективный коэффициент трения; Q – удельная нагрузка на край режущей кромки, Н/м².

Теория удельной поверхностной нагрузки $Q_{нов}$, описанная в работе [10], основана на идее, что помимо длины ножа ширина ножа также влияет на результат размола. Энергия, расходуемая на размол, передается волокнам целлюлозы не только во время контакта режущей кромки ножа с волокном, но также и во время контакта с рабочей поверхностью ножа. Значение удельной поверхностной нагрузки $Q_{нов}$ определяется

$$Q_{нов} = \frac{Q}{K_c} \quad (4)$$

где Q – удельная нагрузка на край режущей кромки, Н/м², K_c – коэффициент ширины ножа.

$$K_c = \frac{w_p + w_c}{2} \cdot \frac{1}{\cos \alpha / 2} \quad (5)$$

w_p – ширина ножа ротора, м; w_c – ширина ножа статора, м; α – средний угол пересечения ножей ротора и статора.

Для расчета интенсивности размола целлюлозы высокой концентрации в работах [11, 12] используют формулу, которая связывает между собой радиальную скорость целлюлозы в данной точке размола с конструктивными и рабочими параметрами дискового рафинера. С учетом распределения энергии и частоты удара уравнение скорости целлюлозной массы приводит непосредственно к выражению интенсивности размола:

$$e = \frac{1}{2N} \frac{\mu_t}{\mu_r} \frac{r_0 \omega^2}{C_0} \quad (6)$$

где e – интенсивность размола, м²/с², кВт·ч/т а.с.в.; N – количество ножей на единицу длины дуги, шт.; r_0 – внешний радиус зоны размола, м; C_0 – концентрация на выходе, %; ω – число оборотов дискового рафинера, об./мин; μ_r/μ_t – отношение радиального и тангенциального коэффициентов трения между целлюлозой и *дисками рафинера*.

В работе [13] ставится задача определения параметра качества помола массы K' . Данный критерий с использованием теории подобия размерности можно привести к функциональной зависимости от бумагообразующих свойств (длина волокна, внешняя удельная поверхность, межволоконные силы связи), который связан с критериальным параметром во время размола волокна. Критериальный параметр K' включает в себя технологические и конструктивные параметры размольной машины:

$$K' = \sqrt{\frac{S_{yd} \sigma}{l} t} \quad (7)$$

где S_{yd} – внешняя удельная поверхность, м²/кг; σ – межволоконные силы связи, МПа; t – время обработки волокна, с.

С помощью функционального параметра размольной машины K_M и ее производительности в работе [13] определяются закономерности развития размольных машин, влияющие на бумагообразующие свойства.

В работе [14] разработан новый технологический параметр циклической элементарной длины $L_{\omega,эл}$, позволяющий оценить влияние конструктивных особенностей гарнитуры, таких как: ширина ножей и ячейки; угол установки ножей относительно радиуса гарнитуры; количество секторов и угол повторяемости рисунка, на качество помола:

В продолжение данных исследований в работе [15] выведены аналитические зависимости коэффициента использования длины режущих кромок ножей ротора и статора k , оказывающий влияние на основные технологические, физико-механические характеристики и на бумагообразующие свойства конечного продукта. При его максимальных значениях повышается качество обработки волокнистых материалов.

В работе [16] получены выражения для расчета средних величин давлений на волокна в рабочем зазоре дисковой мельницы при размоле массы высокой концентрации:

$$P_a = \frac{N_p}{f_k \cdot L_S \cdot a^2} = \frac{Q}{f_k \cdot a} \quad (8)$$

где N_p – полезная мощность размола, кВт; Q – удельная нагрузка на край режущей кромки, Н/м²; f_k – коэффициент трения; L_S – секундная режущая длина, м/с; a – ширина ножа покрытого волокнистым материалом, м.

Выражение (8) показывает, что при сохранении постоянной величины удельной нагрузки на край режущей кромки по мере размола давление на волокна в межножевом зазоре увеличивается, вследствие уменьшения значения a из-за постепенного сокращения средней длины волокна. Это может привести к усилению рубки волокон на последних стадиях размола и металлическому контакту ножей, что увеличит их износ. Поэтому при размоле массы высокой концентрации целесообразно снижать удельную нагрузку на край режущей кромки по мере увеличения степени помола и сокращения средней длины волокна.

Меньшее содержание воды в массе создает условия для преимущественного формирования структурной составляющей общего давления. Доля гидравлической составляющей снижается, что усиливает передачу воздействия гарнитуры через межволоконные контакты. При работе ножевого размалывающего оборудования может происходить забивание каналов между ножами плотным слоем массы практически заподлицо с рабочей поверхностью ножей. Поэтому в создании необходимого давления на обрабатываемую массу и в работе размола участвуют не только рабочие поверхности ножей, но и поверхности массы запрессованной в каналах между ножами [16].

Экспериментальные исследования процесса размола волокнистой массы высокой концентрации

Исследователями в данной области отмечается, что применение массы высокой концентрации требует решения принципиально новых вопросов, ранее не исследовавшихся – таких как транспортирование массы по межножевому зазору, рациональное профилирование гарнитур, выбор оптимальных параметров ножевых элементов, скорость ротора [16].

Изучение фракционного состава массы показывает, что при размоле массы высокой концентрации наблюдается меньшее укорочение, повышение гибкости и пластичности волокон при равных степенях помола, чем при низкой концентрации [17]. С повышением концентрации увеличивается такой важный показатель, как растяжимость.

Положительный эффект размола массы при высокой концентрации большинством авторов объясняется тем, что на волокна действуют существенно меньшие усилия и они обрабатываются преимущественно небольшими по величине касательными усилиями в результате межволоконного трения. В целом отмечается [18–20] наличие некоторой оптимальной концентрации массы (25–30%), при которой обеспечиваются максимальные физико-механические показатели бумаги. Это объясняют значительными изменениями условий физико-химического взаимодействия целлюлозы с водой при дефиците последней, которые не могут быть скомпенсированы оптимизацией механических факторов размола.

Н. Гурнагул [11] рассматривал оптимизацию условий размола волокнистой массы высокой концентрацией для повышения качества мешочной бумаги. Процесс размола массы высокой концентрации развивает свойства волокна целлюлозы, благодаря межволоконным воздействиям при высоких сдвиговых усилиях, что приводит к повышению гибкости волокна [21]. Размол массы высокой концентрации также вызывает скручивание и осевое сжатие волокон, что приводит к повышенной растяжимости листа. Было предложено, чтобы за размолем с высокой концентрацией следовали один или два этапа размола с низкой концентрацией, чтобы дополнительно улучшить поглощение энергии при растяжении, а также улучшить однородность листа. Однако размол с низкой концентрацией снижает пористость из-за улучшенного уплотнения листа и образования мелких частиц. Данные исследования проводились с целью определения влияния как интенсивности размола, так и энергии размола на поглощение энергии растяжения, что необходимо для хорошей эффективности конечного использования мешочной крафт-бумаги [22].

Исследователи [11] отмечают, что, несмотря на изменение интенсивности и энергии размола, средневзвешенная длина волокна уменьшается лишь незначительно за счет размола (максимальное сокращение 8%). Значительно снижаются дренажные свойства целлюлозы, о чем свидетельствует пониженная степень помола и повышенная водоудерживающая способность, наблюдается только при высоких энергиях размола. Нет никакой корреляции между степенью образования мелких частиц и интенсивностью размола. Эти данные подтверждают, что в отличие от процесса размола с низкой концентрацией целлюлоза, размолотая при высокой концентрации, развивает свойства с минимальными потерями в длине волокна и дренажной способности.

Исследования [11] проводились на двухдисковом рафинере при концентрациях от 25–40%. Были определены влияние интенсивности размола массы высокой концентрации на свойства бумажного полотна

(индекс поглощения энергии при растяжении, индекс растяжения, деформация). График зависимости индекса поглощения энергии при растяжении в зависимости от интенсивности размола при различных энергиях размола представлены на рисунке 1.

Было доказано, что индекс поглощения энергии растяжения пропорционален произведению индекса растяжения и деформации разрушения (рис. 2), что подтверждается работой [23]. Влияние интенсивности размола на индекс поглощения энергии растяжения показано на рисунке 3. Увеличение интенсивности размола приводит к снижению индекса поглощения энергии растяжения в пределах 8–16% по мере перехода от самой низкой к самой высокой интенсивности размола. При данной интенсивности размола индекс поглощения энергии растяжения увеличивается с энергией размола. На рисунке 3 видно, что на индекс растяжения не влияет на увеличение интенсивности размола. Однако наблюдается чистое снижение деформации листа с увеличением интенсивности размола порядка 10–13% (рис. 4).

Исследователи Д. Фернандо, Д. Горский, М. Сабоурин [24] изучали характер развития волокон при размоле массы высокой и низкой концентрации. Качество конечного бумажного продукта сильно коррелирует с развитием свойств волокон, таких как количество расщепленных волокон, уменьшение размеров поперечного сечения, гибкость волокна, разрушаемость волокон, развитие фракции длинных волокон, а также от внутренней и внешней фибрилляции. Внешняя и внутренняя фибрилляция тесно связана с основными факторами процесса размола.

Основное внимание в этих исследованиях было уделено изучению механизма развития волокон при размоле массы высокой концентрации на второй ступени и массы низкой концентрации термомеханической целлюлозы после первой ступени размола. Была получена характеристика разработки волокна с целью изучения взаимосвязи между размолом массы высокой и низкой концентрации, между оптическими и прочностными свойствами листов бумаги. Рассматривались фундаментальные механизмы, регулирующие свойства волокон в размолотой целлюлозе с низкой и высокой концентрацией на микроструктурном и ультраструктурном уровнях клеточных стенок. Прежде всего, перед исследователями ставилась задача понять влияние процессов размола на структурные изменения стенок волокна и влияние этого изменения на конечное качество бумажных листов [24–26].

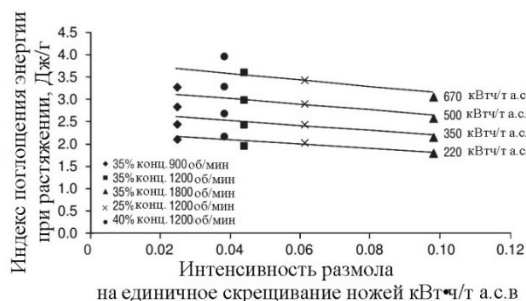


Рис. 1. График зависимости поглощения энергии растяжения от интенсивности размола при различных энергиях размола

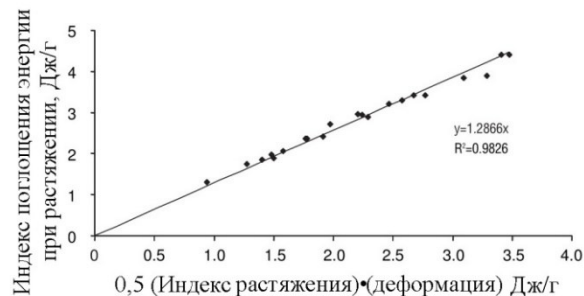


Рис. 2. Зависимость между индексом поглощения энергии растяжения и половиной произведения индекса растяжения и деформации

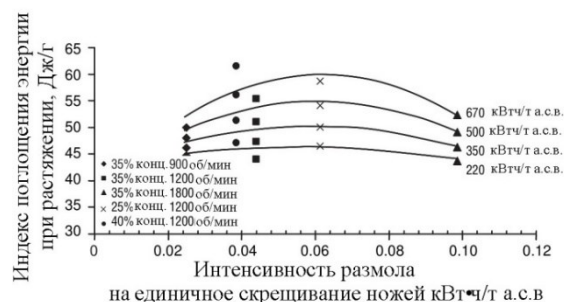


Рис. 3. График зависимости индекса поглощения энергии от интенсивности размола при различных энергиях размола

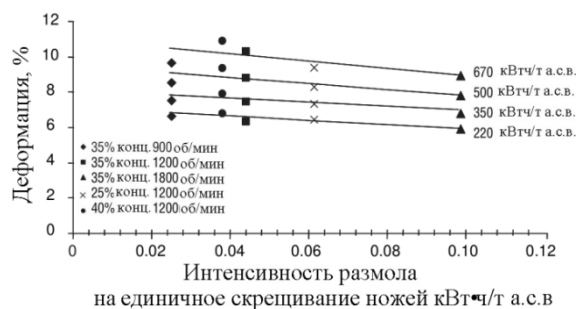


Рис. 4. Деформация от интенсивности размола при различных энергиях размола

Значительная степень расслоения и внутренней фибрилляции стенки волокна наблюдалась как во время размола с низкой концентрацией, так и с высокой концентрацией. Расход энергии и изменение концентрации волокнистой массы в процессе размола оказали значительное влияние на повышение степени расслоения стенки волокна и внутренней фибрилляции. Оценка развития внутренних волокон показала, что пробы волокон в массе с низкой концентрацией и высокой концентрацией во время и после размола имели аналогичную степень расслоения и внутренней фибрилляции волокнистой стенки, несмотря на то, что имели большую разницу в расходе энергии. Расслоение и внутренняя фибрилляция стимулируется энергетически более эффективно, во время размола массы низкой концентрации, чем при высокой концентрации. Размол массы низкой концентрации способствует образованию поверхностей волокон с помощью лент из тонких волосообразных нитей, возникающих из внутреннего вторичного слоя S2 (рис. 5), который иногда развивается по всей длине волокна. Широкая листовая и ламеллетипная внешняя фибрилляция из слоя S2 была типичной для размола массы с высокой концентрацией, данные характеристики редко наблюдались при размолу массы с низкой концентрацией [24].

Размолу подвергалась смесь, состоящая из 80% сосны, 20% ели и пихты. Процесс термомеханической враки целлюлозы с последующим ее размолу при высокой концентрации проводился на экспериментальном заводе Andritz. Щепу предварительно нагревали и дефибрировали с подводом энергии 530 кВт·ч/т а.с.в. [27–29]. Часть целлюлозы размолотой на первой стадии была дополнительно размолота в двухдисковом рафинере с четырьмя различными расходами электроэнергии (600–1000 кВт·ч/т). Размол с низкой концентрацией проводился в два оптимизированных этапа на экспериментальной установке. Целлюлозу дезинтегрировали в воде при 60 °С в течение 4 ч, а затем размалывали при низкой концентрации (3–3.4%) на рафинере с гарнитурой *FineBar* (*Aikawa Fibre Technologies*) (ширина ножа 1 мм, глубина канавки 4.8 мм, ширина канавки 2.4 мм, угол наклона ножей 15°).

Для размолу массы высокой концентрации расход удельного электропотребления составил 1450 кВт·ч/т а.с.в., тогда как на 300 кВт·ч/т а.с.в. удельного электропотребления расходовалась меньше при размолу массы с низкой концентрацией (рис. 6). Плотность листов, полученных при размолу массы высокой концентрации и низкой концентрации, развивалась аналогично, тогда как индекс разрыва, средневзвешенная длина волокна, растяжение и поглощение энергии растяжения были ниже для листов, полученных при размолу массы с низкой концентрацией [26, 30].

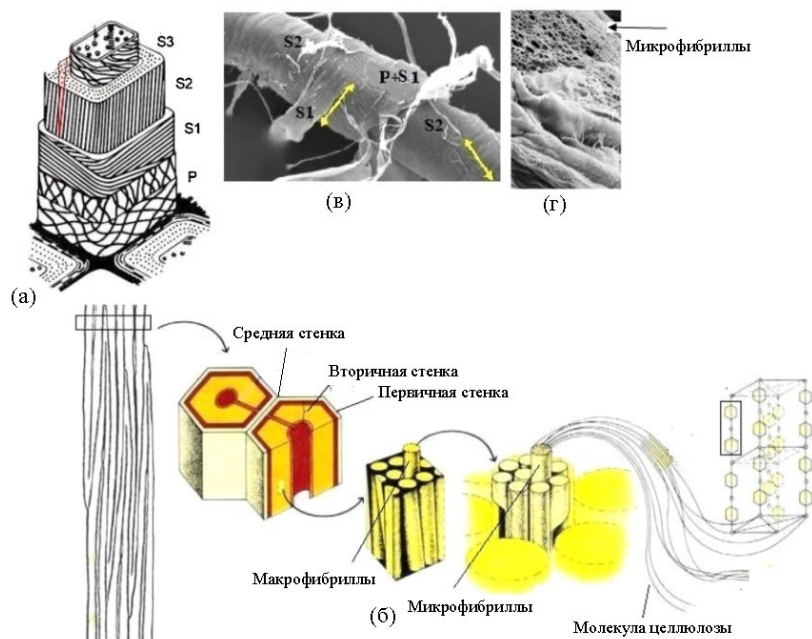
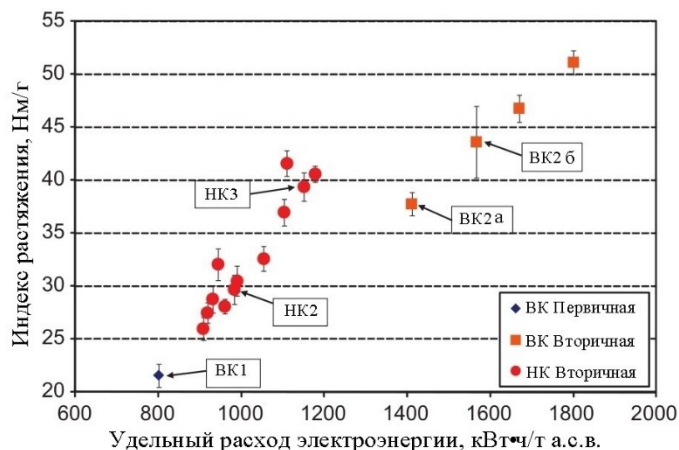


Рис. 5. Структура целлюлозного волокна: а – схема слоев клеточной стенки (средняя пластинка (ML), первичная стенка (P), вторичный слой (S1, S2, S3) и просвет (W)); б – фибриллярная структура клеточная стенка; в – сканирующее микроскопическое изображение слоев клеточной стенки; г – сканирующее микроскопическое изображение микрофибрилл

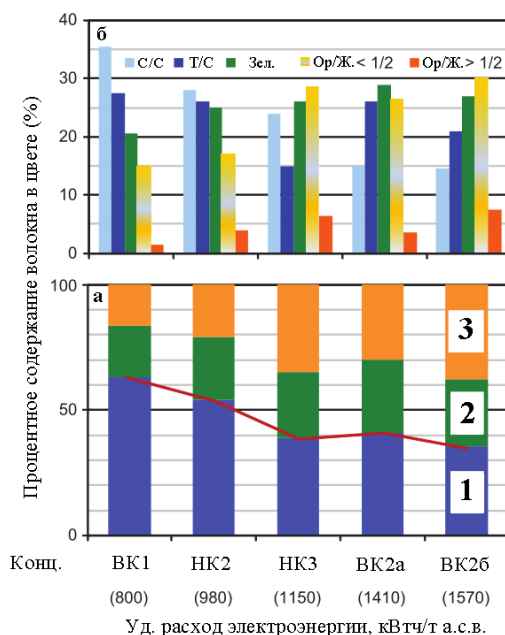
Рис. 6. Зависимость индекса прочности растяжения листов от удельного расхода электроэнергии: ВК первичная – масса высокой концентрации, размолотая на первой стадии; ВК вторичная – масса высокой концентрации, размолотая на второй стадии; НК вторичная – масса низкой концентрации размолотая, на второй стадии



Развитие расслоения стенки волокна (внутренней фибрилляции) оценивали в соответствии с методом окрашивания Саймонса [31]. Обзор результатов исследований показан на рисунке 7. Пять проб волокон, размолотых при различных концентрациях, были разделены на три основные группы «неразделенные с внутренней фибрилляцией», «с низким расслоением внутренней фибрилляции» и «с высоким расслоением внутренней фибрилляции» (рис. 7а). Увеличение удельного электропотребления значительно снижало процент необработанных волокон, приводя к улучшенному развитию волокон (рис. 7а, красная линия). Разница особенно заметна, когда исходную целлюлозу размолотую на первой стадии с высокой концентрацией сравнивали с целлюлозой размолотой на второй стадии при более низких концентрациях (например, целлюлозы высокой концентрации 1 – ВК1 и низкой концентрацией – ВК2). Целлюлоза, размолотая на первой стадии с наименьшим расходом удельной электроэнергии (ВК 1 – 800 кВт·ч/т а.с.в.), состояла из 63% необработанных жестких волокон и только 16% – с высокой внутренней фибрилляцией [24, 32].

С другой стороны, целлюлоза, размолотая при высокой концентрации ВК 2 б (рис. 7), с наибольшим расходом удельной электроэнергии (1570 кВт·ч/т а.с.в.) была наиболее развитой на уровне стенки волокна. В ней большинство волокон было обработано, причем большинство волокон с высоким расслоением, т.е. внутренней фибрилляцией (около 38%), которые представляют собой гибкую фракцию волокон. Предварительный анализ также показал, что целлюлоза с низкой концентрацией НК 3 и высокой концентрацией ВК 2б имеют более сходные волокна относительно внутренней фибрилляции. Этот вывод подтверждает, что размол с низкой концентрацией вызывает расслоение стенки волокна более эффективно с точки зрения затрат энергии [24, 33–37].

Рис. 7. Пробы волокон, размолотых при различных концентрациях и окрашенных по методу Саймонса: ВК1 – высокая концентрация первой стадии размола; ВК2а – высокая концентрация второй стадии размола; ВК2б – высокая концентрация третьей стадии размола; НК2 – низкая концентрация второй стадии размола; 1 – неразделенные волокна с внутренней фибрилляцией; 2 – с волокна с низким расслоением внутренней фибрилляции; 3 – волокна с высоким расслоением внутренней фибрилляции



Процент необработанных волокон (пять проб волокон разной концентрации светло-синего цвета), был ниже в волокнистой массе, размолотой на второй стадии при высокой и низкой концентрации (рис. 7б). Волокна низкой концентрации второй стадии размола также содержали больше необработанных волокон. Если предположить, что волокно всегда развивает некоторую степень расслоения / внутренней фибрилляции при механическом воздействии внутри дискового рафинера, то из этого можно сделать вывод о том, что меньшее количество волокон оказывает какое-либо воздействие при размоле массы низкой концентрации по сравнению с размолем массы высокой концентрации (низкая концентрация НК 3 и высокая концентрация ВК 2 а, рис 7а) для достижения аналогичного уровня развития внутреннего волокна. Соответственно, каждое воздействие на волокна в дисковом рафинере при размоле массы низкой концентрацией способствует внутренней фибрилляции клеточной стенки более эффективно, чем при размоле массы с высокой концентрацией [26, 30, 38–41].

Размол массы высокой и низкой концентрации наряду с увеличивающимся удельным потреблением электроэнергии значительно повысил степень внутренней фибрилляции. Внутреннее развитие волокон во время второй стадии размола с высокой концентрации и низкой концентрации было сходным при аналогичном уровне индекса прочности листа. Однако расход удельной электроэнергии при размоле с низкой концентрацией был на 420 кВт·ч/т а.с.в. меньше. Низкая концентрация способствовала внутренней фибрилляции более энергоэффективно, чем размол с высокой концентрацией. Развитие внешнего волокна во время размола с высокой и низкой концентрацией было очень различным, что было обнаружено ультраструктурной характеристикой поверхностей волокон из целлюлозы. Предполагается, что размол с низкой концентрацией вызывает особое действие, которое способствует образованию поверхностей волокон, богатых тонкими волосковидными нитями лент S2, иногда по всей длине волокна в дополнение к развитию внутренней фибрилляции. В процессе размола с высокой концентрацией возникают широкие листовые и пластинчатые типы внешней фибрилляции слоя S2, что приводит к высокому потенциалу связывания волокон. Эти характеристики редко наблюдались при размоле массы низкой концентрации [24, 42–45].

Известно, что внутренняя фибрилляция и внешняя фибрилляция определяют в значительной степени, прочностные характеристики бумажной продукции [46–51]. Одновременное возникновение этих эффектов в обычных промышленных и лабораторных размалывающих установках затрудняют оценку влияния этих эффектов на прочность бумаги. В работах Т. Канга и Х. Паулапуру были разделены влияние внутренней и внешней фибрилляции волокон и образования мелких частиц при размоле массы высокой концентрации. Согласно этим исследованиям, разрывная длина листа зависит от внутренней фибрилляции волокон и от количества мелкой фракции частиц волокна, добавленной в композицию, но не зависит от внешней фибрилляции, хотя плотность листа увеличивается. Внешняя фибрилляция тесно связана с образованием мелких частиц, и можно ожидать, что внешние фибриллы, присоединенные к волокну, будут играть аналогичную роль, как мелкие частицы в волокнистой сети, улучшая определенные прочностные свойства бумаги [52, 53].

Оценка влияния внешней фибрилляции на прочность бумажного листа проводилась на дисковой мельнице, с помощью которой можно было стимулировать в основном внешнюю фибрилляцию при сохранении внутренней фибрилляции постоянной, что позволило изучить эффект внешней фибрилляции на прочность бумаги. Хотя плотность листа сильно зависела от внутренней фибрилляции, она также могла быть увеличена за счет содействия в основном внешней фибрилляции, что приводило к дальнейшему улучшению прочности на разрыв [46, 52, 53, 55].

Для эксперимента использовалась белая сульфатная хвойная целлюлоза, состоящая из смеси сосны шотландской (56%) и ели норвежской (44%). Целлюлозу дезинтегрировали в течение 10 мин, а затем размалывали в течение 10 и 30 мин в ролле *Valley* [53, 56]. Было установлено, что зазор между статором и ротором является очень важным фактором, который влияет на внешнюю и внутреннюю фибрилляцию, водоудерживающая способность волокна достигает выравнивания при зазоре равном 0.23 мм. Считается, что выравнивание водоудерживающей способности волокна является областью, где развивается главным образом внешняя фибрилляция, без влияния на внутреннюю фибрилляцию волокон [46, 52, 57].

На рисунке 8 показано развитие фибрилляции длинных волокон. Водоудерживающая способность волокна вначале увеличивается, а затем остается постоянной, несмотря на дополнительную обработку в дисковой мельнице, как показано на рисунке 8а. Область, где внутренняя фибрилляция является доминирующей, показана как сплошная линия, а область, где внешняя фибрилляция является доминирующей, – в виде пунктирной

линии. Внешняя фибрилляция может развиваться в основном на плато кривой водоудерживающей способности волокна, при зазорах 0,23 мм и 0,25 мм в дисковой мельнице, фибрилляция волокон происходит после 6–7 проходов целлюлозы. На рисунке 8б показана кривая водоудерживающей способности волокон, размолотых в ролле *Valley*, которая непрерывно поднимается по мере увеличения размола [46, 58, 59].

На рисунке 9 показано соотношение между внутренней и внешней фибрилляцией и прочностью на разрыв. Очевидно, что повышенная степень внутренней фибрилляции сильно способствует прочности на разрыв. Однако прочность целлюлозы, обработанной как на 0,23 мм, так и на 0,25 мм в мельнице, дополнительно повышается за счет внешней фибрилляции, индекс прочности на разрыв увеличивается примерно на 20%. Увеличение внутренней и внешней фибрилляции происходит одновременно в течение всего периода размола в ролле *Valley*.

Проведение в основном внешней фибрилляции при сохранении внутренней фибрилляции постоянной, позволило изучить роль внешней фибрилляции для развития прочности волокнистой сети. Внешние фибриллы, которые все еще прикреплены к волокнам, повышают прочность листа [22, 52, 53, 60, 61].

Хотя на такие свойства бумаги, как прочность на разрыв, сильно влияет внутренняя фибрилляция, они также могут быть дополнительно увеличены за счет повышения внешней фибрилляции. Индекс растяжения был увеличен на 20%, за счет повышения в основном внешней фибрилляции [46, 62–64].

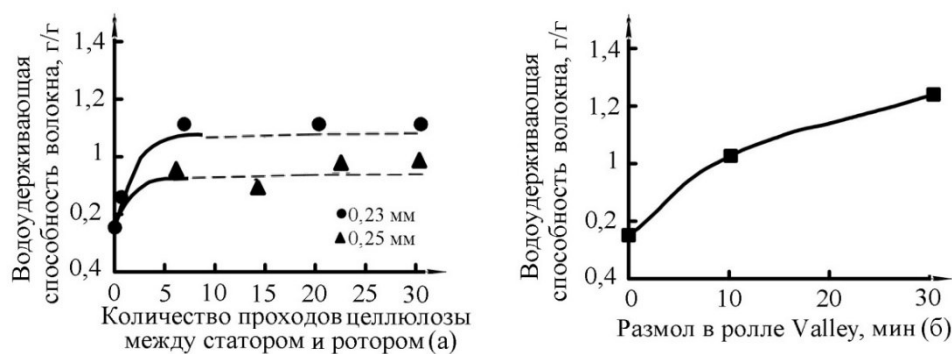


Рис. 8. Развитие внутренней фибрилляции волокна (на рисунке 8а сплошная линия представляет область, где доминирует внутренняя фибрилляция, пунктирная – область, где доминирует внешняя фибрилляция)

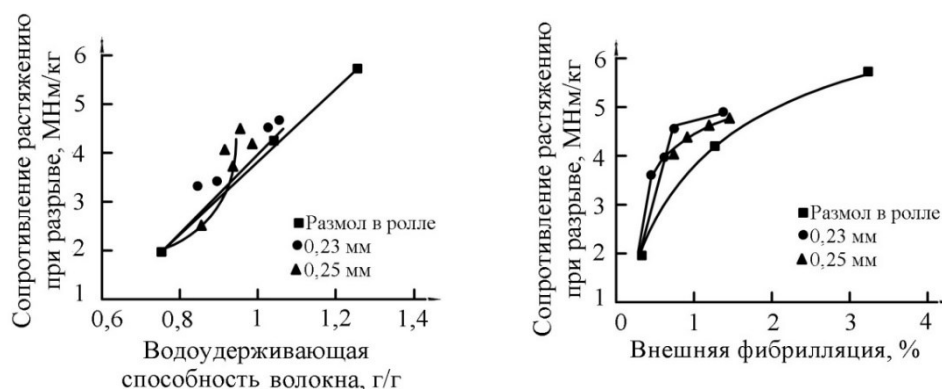


Рис. 9. Влияние фибрилляции на прочность при разрыве бумаги, (волокнистая масса, размолотая в ролле «*Valley*» и Фрикционном измельчителе)

Заключение

В работе проведен анализ литературных источников по размолу волокнистых суспензий высокой концентрации. Рассмотрены подходы различных авторов к методам оценки качественных и количественных

параметров процесса размола. Установлено, что при прогнозировании качества помола волокнистого материала высокой концентрации внимание уделяют как силовым параметрам процесса, из которых выражают нагрузки приходящие на единичные волокна, так и исходя из технологических и конструктивных параметров размольных машин.

Обзор экспериментальных исследований показал, что механизм размола массы высокой концентрации (более 15–20%) существенно отличается от размола при низкой. Это различие обуславливается рядом факторов:

1. Меньшее содержание воды в массе создает условия для преимущественного формирования структурной составляющей общего давления. Доля гидравлической составляющей снижается, что усиливает передачу воздействия гарнитуры через межволоконные контакты.

2. В силу того, что межножевой зазор при размоле массы высокой концентрации (0.5–1 мм) существенно больше, чем при низкой, эффективное давление, действующее на волокна, снижается. Это приводит к уменьшению вероятности измельчения волокна, усиливает фибриллирующее действие, обусловленное работой межволоконного трения. Количество циклов воздействия на волокна резко возрастает по сравнению с размолом массы низкой концентрации.

3. Размол волокнистой массы при низкой концентрации приводит преимущественно к внутренней фибрилляции волокон, тогда как размол при высокой концентрации развивает внешнюю фибрилляцию. При этом размол массы низкой концентрации является более энергоэффективным.

Список литературы

1. Kerekes R.J. Force-based characterization of refining intensity // Nordic Pulp and Paper Research journal. 2011. Pp. 14–20.
2. Leider P.J., Nissan A.H. Understanding the Disc Refiner: Measurement of Treatment of Fibres // TAPPI. 1977. Pp. 85–101.
3. Алашкевич Ю.Д. Гидродинамические явления при размоле волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах: монография. Красноярск, 2000. 248 с.
4. Miles K.B., May W.D. The Flow of Pulp in Chip Refiners // Pulp Paper Scientific Journal. 1990. Pp. 63–72.
5. Miles K.B. A Simplified Method for Calculating the Residence Time and Refining Intensity in a Chip Refiner // Paperi ja Puu. 1991. Pp. 852–857.
6. Wulfsch F., Flucher W. Der Escher – Wyss Kleinrefiner als Standard-Prüfgerät für modern Stoffaufbereitungsanlagen // Papier. 1958. Pp. 334–342.
7. Brecht W. Zur theoretisch-technischen Beurteilung des Mahlprozesses moderner Mahlmaschinen // Papier. 1966. Pp. 4–14.
8. Kerekes R.J. Energy and Forces in Refining // Pulp Paper Scientific Journal. 2010. Pp. 1–6.
9. Kerekes R.J., Senger J.J. Characterizing Refining Action in Low Consistency Refiners by Forces on Fibres // Pulp Paper Scientific Journal. 2006. Pp. 1–8.
10. Lumiainen J. A new approach to the critical factors effecting refining intensity and refining result in low-consistency refining // Tappi Papermakers Conference. 1990. Pp. 269–278.
11. Gurnagul N., Shuohui J., Shallhorn P. Optimizing High consistency Refining Conditions for Good Sack Paper Quality // Article in Appita Annual Conference. Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment, 2005. Pp. 379–386.
12. Milles K.B. The Essence of High Consistency Refining // Proc. The Marcus Wallenberg Foundation Symposia. 1998. Pp. 20–30.
13. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... доктора технических наук. Красноярск, 1986. 361 с.
14. Набиева А.А. Оценка влияния и совершенствование основных технологических параметров ножевых размалывающих машин: дис. ... кандидата технических наук. Красноярск, 2004. 177 с.
15. Ковалев В.И. Размол волокнистых полуфабрикатов при различном характере построения рисунка ножевой гарнитуры: дис. ... кандидата технических наук. Красноярск, 2007. 176 с.
16. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: дис. ... доктора технических наук. Л., 1990. 474 с.
17. Легоцкий С.С., Лаптев Л.Н. Размол бумажной массы. М., 1981. 83 с.
18. Лаптев Л.Н. Исследование размола отходов древесно-массного производства на дисковой мельнице: дис. ... канд. тех. наук. Ленинград, 1969. 168 с.
19. Халандовский И.Н., Лаптев Л.Н., Генслер Т.А. Влияние концентрации массы на размол сульфатной целлюлозы из сосны // Труды ВНИИБа. 1973. С. 109–116.
20. Rosenfeld K., Hoffman I. Ein neues verfahren zur mahlung bei hohen Stoffdichten oberhall // Das papier. 1965. Pp. 58–66.
21. Kurdin J.A. High Consistency Refining of Chemical (Pulp) Fibres // Doshi Assoc. Sem. Refining Chem. Pulps. Appleton. 1986. P. 15.

22. Herbert W., Marsh P.G., Harbron D.L. New Kinks in Refining with the Chemifiner // Paper Trade Journal. 1967. Vol. 1551. Pp. 42–48.
23. El Hosseiny F. The effect of sheet Densification on the Shape of its Stress Strain Curve // Pulp and Paper Sci. 1994. Vol. 20(12). Pp. 366–370.
24. Dinesh F., Gorski D., Sabourin M., Geoffrey D. Characterization of fiber development in high and low – consistency of primary mechanical pulp // *Holzforschung*. 2013. Pp. 735–745.
25. Kure K.A. On the relationship between process input variables and fibre characteristics in thermomechanical pulping: Doctoral thesis. Trondheim, 1999. 99 p.
26. Gorski D., Morseburg K., Axelsson P., Engstrand P. Peroxide – based ATMP refining of spruce: influence of chemical conditions on energy efficiency, fibre properties and pulp quality // *Nord and paper research journal*. 2011. Pp. 1–47.
27. Hill J., Sabourin M., Aichinger J., Johansson L., Gorski D., Axelsson P. Combining selective bleaching chemistries and ATMP technology for low energy mechanical pulping at higher brightness // 7th International Fundamental Mechanical Pulp. Nanjing, 2010. P. 164.
28. Johansson L., Hill J., Gorski D., Axelsson P. Improvement of energy efficiency in TMP process by selective wood disintegration and targeted application of chemicals // *Nord and paper research journal*. 2011. Pp. 31–46.
29. Sabourin M., Xu E., Cort B., Boileau I., Waller A. Optimizing residence time, temperature and speed to improve TMP pulp properties and reduce energy // *Pulp and paper*. 1997. Pp. 111–118.
30. Gorski D., Morseburg K., Olson J., Luukkonen A. Fibre and fines quality development in pilot scale high and low consistency refining of ATMP // *Nord and paper research journal*. 2012. Pp. 872–881.
31. Fernando D., Daniel G. Characterization of spruce thermo mechanical pulps at the fibre cell wall level: a method for quantitative assessment of pulp fibre development using Simons' stain // *Tappi journal*. 2010. Pp. 47–55.
32. Blanchette R.A., Akhtar M., Attridge M.C. Using Simons stain to evaluate fiber characteristics of biomechanical pulps // *Tappi journal*. 1992. Pp. 121–124.
33. Fernando D., Muhić D., Engstrand P., Daniel G. Surface and internal micro/ultrastructure of TMP fibres produced during high-intensity refining elucidate the development of pulp and paper properties // *Holzforschung*. 2012. Pp. 467–475.
34. Eriksen O. High-frequency pressure measurements in the refining zone of a high-consistency refiner: Doctoral thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2003. 303 p.
35. May W.D., McRae M.R., Miles K.B., Lunan W.E. An Approach to the Measurement of Pulp Residence Time in a Chip Refiner // *Journal of Pulp and Paper Science*. 1998. Pp. 47–53.
36. Peakes D.E. Combined High and Low Consistency Refining of Bleached Kraft Pulps // *Tappi*. 1967. Vol. 50. P. 38A.
37. Olender D., Wild P., Byrnes P., Ouellet D., Sabourin M. Forces on Bars in High Consistency Mill-Scale Refiners: Trends in Primary and Rejects Stage Refiners // *Journal of Pulp and Paper Science*. 2007. Pp. 163–171.
38. Heymer J.O., Olson J.A., Kerekes R.J. The role of multiple loading cycles on pulp in refiners // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2011. Pp. 283–287.
39. Eriksen O., Gregersen O., Krogstad P-A. High-Speed Measurement of Pressure and Temperature in the Refining Zone of a High Consistency Refiner // *Journal of Pulp and Paper Science*. 2005. Pp. 458–467.
40. Senger J.J., Ouellet D. Factors Affecting the Shear Forces in High-Consistency Refining // *Journal of Pulp and Paper Science*. 2002. Pp. 364–369.
41. Hietanen S. Effect of control variables and length of refining zone on the refining results with a new pilot refiner // *Paperi Puu*. 1991. Pp. 52–61.
42. Gorski D., Mörseburg K., Axelsson P., Engstrand P. Peroxide-based ATMP refining of spruce: energy efficiency, fibre properties and pulp quality // *Nord and paper research journal*. 2011. Pp. 47–63.
43. Gorski D., Mörseburg K., Johansson L. Influence of process conditions and addition of chemicals on energy process conditions and addition of chemicals on energy ATMP refining // *Nord and paper research journal*. 2011. Pp. 232–247.
44. Gorski D., Olson J., Luukkonen A. Two-stage low-consistency refining of mechanical pulp // *Appita journal*. 2012. Pp. 244–249.
45. Gorski D., Johansson L., Engstrand P. Refiner bleaching in a peroxide-based ATMP process compared with conventional bleaching // *Holzforschung*. 2012. Pp. 275–281.
46. Kang T., Paulapuro H. Effect of External Fibrillation on Paper Strength // *Pulp and Paper*. 2006. Pp. 51–54.
47. Hartman R.R. Mechanical Treatment of Pulp Fibres for Property Development: Doctoral Thesis. Appleton, 1984. 127 p.
48. Braaten K.R. Fibre and fibril properties versus light scattering and surface smoothness for mechanical pulps // *Pulp and paper*. 2000. Vol. 101. Pp. 122–127.
49. Miles K., Karnis A. The response of mechanical and chemical pulps to refining // *Tappi Journal*. 1991. Vol. 74(1). Pp. 157–164.
50. Wistara N., Young R. Properties and treatments of pulps from recycled paper Part I // *Physical and chemical properties of pulps*. 1999. Pp. 291–324.
51. Sjöberg J., Höglund H. High consistency refining of kraft pulp for reinforcing paper based on TMP furnishes // International mechanical pulping conference. Minnesota, 2007. 11 p.
52. Kang T., Paulapuro H. New Mechanical Treatment of Chemical Pulp // *The 2004 Progress in Paper Physics Seminar*. NTNU and PFI. Trondheim, 2004. Pp. 11–13.
53. Szwarcztajn E., Przybysz K. External Fibrillation of Beaten Cellulose Fibres // *Cellulose chemistry technology*. 1972. Pp. 223–238.
54. Hartler N. Aspects on curled and microcompressed fibres // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. 1995. N1. Pp. 4–7.

55. Genco J.M. Fundamental processes in stock preparation and refining // Tappi Pulping Conference. Atlanta, 1999. Pp. 57–96.
56. Stone J.E., Scallan A.M., Abrahamson B. Influence of Beating on Cell Wall Swelling and Internal Fibrillation // Svensk Papperstidn. 1968. Pp. 687–694.
57. Olejnik K. Impact of pulp consistency on refining process conducted under constant intensity determined by SEL and SEC factors // BioResources. 2013. Vol. 8. P. 3212.
58. Loijas M. Factors affecting the axial force in low-consistency refining. Tampere, 2010. 32 p.
59. Htun M., Fellers C. The Invariant Mechanical Properties of Oriented Hand sheets // Tappi. 1982. Vol. 65(4). P. 113.
60. Nanko H., Ohsawa J. Mechanisms of Fibre Bond Formation // Papermaking Raw Materials: Transactions of the Ninth Fundamental Research, Mechanical Engineering Publications. London, 1989. Pp. 783–830.
61. Retulainen E. The Role of Fibre Bonding in Paper Properties: Doctoral Thesis. Espoo, 1997. 312 p.
62. Giertz H. Understanding the Role of Fines // International Symposium on Fundamental Concepts of Refining Institute of Paper Chemistry. Appleton, 1980. Pp. 324–330.
63. Page D.H. The Mechanism of Strength development of Dried Pulps by beating // Svensk Papperstidn. 1985. Pp. 30–35.
64. Page D.H., Seth R.S., Jordan B.D., Barbe M.C. Curl, Crimps, Kinks and Microcompressions in Pulp Fibres Their Origin, Measurement and Significance // Papermaking Raw Materials: Transactions of the Eighth Fundamental Research. London, 1985. Pp. 183–227.
65. Кожухов В.А., Алашкевич Ю.Д. Особенности использования ножевой гарнитуры с ударным воздействием при размоле волокнистой массы // Химия растительного сырья. 2009. №2. С. 153–155.
66. Кожухов В.А., Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И. Исследование рисунков гарнитуры ножевых размалывающих машин с ударным эффектом // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2014. №2. С. 94–100.
67. Корда И., Либнар З., Прокоп И. Размол бумажной массы: учеб. для вузов. М., 1967. 421 с.
68. Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли: учеб. пособие. Красноярск, 2015. 317 с.
69. Пахарь Д.В., Ковалев В.И., Алашкевич Ю.Д. Анализ силового воздействия на волокно при размол в дисковых мельницах с ножами криволинейной формы // Химия растительного сырья. 2009. №1. С. 167–172.
70. Набиева А.А., Ковалев В.И., Алашкевич Ю.Д. Анализ формирования технологических параметров ножевых размалывающих гарнитур // Химия растительного сырья. 2009. №3. С. 169–172.
71. Иванов С.Н. Технология бумаги. М.; Л., 1970. 720 с.
72. Лаптев Л.Н., Халандовский И.Н. Новое в технологии размола массы на дисковых мельницах: сборник рефератов. Л.: Лесная промышленность, 1970. С. 157–171.
73. Сахаров С.М. Размол массы высокой концентрации: сборник рефератов по зарубежным материалам. М., 1971. 64 с.
74. Матвеев Б.П. Исследование основных факторов процесса размола сульфатной небеленой целлюлозы в дисковой мельнице при высокой концентрации: дис. ... кандидата технических наук. Л., 1971. 112 с.
75. Васильев А.А. Оптимизация параметров ножевой гарнитуры для размола массы высокой концентрации: дис. ... канд. тех. наук. Л., 1983. 225 с.
76. Савицкий Е.Е., Халандовский И.М., Лаптев Л.Н., Бывшев А.В. Об оптимальных зазорах при размолу массы высокой концентрации в дисковых мельницах // Сборник трудов ВНИИЦБ. 1976. С. 18–21.

Поступила в редакцию 15 июля 2020 г.

Принята к публикации 13 ноября 2020 г.

Для цитирования: Ушаков А.В., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А., Ковалев В.И. Современное состояние и перспективы совершенствования процесса размола волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации (обзор) // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 315–329. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048251.

*Ushakov A.V.**, *Alashkevich Yu.D.*, *Kozhukhov V.A.*, *Kovalev V.I.* CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR IMPROVING THE PROCESS OF MILLING FIBROUS SEMI-FINISHED HIGH CONCENTRATION PROCESSES (REVIEW)

Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev, pr. Krasnoyarskiy Rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: al.usakov2194@mail.ru

There is presented a review of scientific literature characterizing the main directions of modern research of the process of grinding of fibrous semi-finished products of high consistence. Theoretical approaches are described in the study of qualitative parameters of pulp during its processing in knife grinding machines.

Researchers note an increase in the paper-forming properties of the pulp and the physical and mechanical characteristics of the finished product. This paper provides an overview of experimental studies of the high consistence pulp milling process. The effect of high consistence mass grinding intensity on the quality of the finished product is considered, the nature of fiber development when grinding high and low consistence mass is compared. Experimental studies show that an increase in the intensity of exposure when grinding a high consistence mass leads to a decrease in the tensile energy absorption index, and a decrease in the deformation of the paper sheet is also observed with an increase in the grinding intensity. With an increase in the pulp consistence, a change in the degree of delamination, internal and external fibrillation of the fiber wall is observed. The high-consistence pulp milling process is accompanied by higher specific energy consumption compared to low-consistence pulp milling, but observations at the fiber wall level show a more developed external specific surface area.

This review of the scientific literature will serve as a basis for further research on the grinding of high consistence fibrous materials.

Keywords: grinding, mass of high-consistence, Specific Edge Load, grinding intensity, internal fibrillation, external fibrillation, physical and mechanical properties.

References

1. Kerekes R.J. *Nordic Pulp and Paper Research journal*, 2011, pp. 14–20.
2. Leider P.J., Nissan A.H. *TAPPI*, 1977, pp. 85–101.
3. Alashkevich Yu.D. *Gidrodinamicheskiye yavleniya pri razmole voloknistykh polufabrikatov v nozhevykh razmalyvayushchikh mashinakh: monografiya*. [Hydrodynamic phenomenon during the grinding of fibrous semi-finished products in knife grinding machines: monograph]. Krasnoyarsk, 2000, 248 p. (in Russ.).
4. Miles K.B., May W.D. *Pulp Paper Scientific Journal*, 1990, pp. 63–72.
5. Miles K.B. *Paperi ja Puu*, 1991, pp. 852–857.
6. Wultsch F., Flucher W. *Papier*, 1958, pp. 334–342.
7. Brecht W. *Papier*, 1966, pp. 4–14.
8. Kerekes R.J. *Pulp Paper Scientific Journal*, 2010, pp. 1–6.
9. Kerekes R.J., Senger J.J. *Pulp Paper Scientific Journal*, 2006, pp. 1–8.
10. Lumiaainen J. *Tappi Papermakers Conference*, 1990, pp. 269–278.
11. Gurnagul N., Shuohui J., Shallhorn P. *Article in Appita Annual Conference*, Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment, 2005, pp. 379–386.
12. Milles K.B. *Proc. The Marcus Wallenberg Foundation Symposia*, 1998, pp. 20–30.
13. Alashkevich Yu.D. *Osnovy teorii gidrodinamicheskoy obrabotki voloknistykh materialov v razmol'nykh mashinakh: dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk*. [Fundamentals of the theory of hydrodynamic treatment of fibrous materials in grinding machines: dis. ... Doctors of technical sciences]. Krasnoyarsk, 1986, 361 p. (in Russ.).
14. Nabyeva A.A. *Otsenka vliyaniya i sovershenstvovaniye osnovnykh tekhnologicheskikh parametrov nozhevykh razmalyvayushchikh mashin: dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk*. [Assessment of the influence and improvement of the main technological parameters of knife grinding machines: dis. ... Candidate of technical sciences]. Krasnoyarsk, 2004, 177 p. (in Russ.).
15. Kovalev V.I. *Razmol voloknistykh polufabrikatov pri razlichnom kharaktere postroyeniya risunka nozhevoy garnitury: dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk*. [Grinding of fibrous semi-finished products with a different nature of the construction of the pattern of the knife set: dis. ... Candidate of technical sciences]. Krasnoyarsk, 2007, 176 p. (in Russ.).
16. Goncharov V.N. *Teoreticheskiye osnovy razmola voloknistykh materialov v nozhevykh mashinakh: dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk*. [Theoretical foundations of refining fibrous materials in knife machines: dis. ... Doctors of technical sciences]. Leningrad, 1990, 474 p. (in Russ.).
17. Legotskiy S.S., Laptev L.N. *Razmol bumazhnoy massy*. [Pulp grinding]. Moscow, 1981, 83 p. (in Russ.).
18. Laptev L.N. *Issledovaniye razmola otkhodov drevesno-massnogo proizvodstva na diskovoy mel'nitse: dis. ... kand. tekh. nauk*. [Investigation of the grinding of wood-pulp production waste in a disk mill: dis. ... Cand. tech. sciences]. Leningrad, 1969, 168 p. (in Russ.).
19. Khalandovskiy I.N., Laptev L.N., Gensler T.A. *Trudy VNIIBa*, 1973, pp. 109–116. (in Russ.).
20. Rosenfeld K., Hoffman I. *Das papier*, 1965, pp. 58–66.
21. Kurdin J.A. *Doshi Assoc. Sem. Refining Chem. Pulps*, Appleton. 1986, p. 15.
22. Herbert W., Marsh P.G., Harbron D.L. *Paper Trade Journal*, 1967, vol. 1551, pp. 42–48.
23. El Hosseiny F. *Pulp and Paper Sci.*, 1994, vol. 20(12), pp. 366–370.
24. Dinesh F., Gorski D., Sabourin M., Geoffrey D. *Holzforchung*, 2013, pp. 735–745.

* Corresponding author.

25. Kure K.A. *On the relationship between process input variables and fibre characteristics in thermomechanical pulping: Doctoral thesis*, Trondheim, 1999, 99 p.
26. Gorski D., Morseburg K., Axelsson P., Engstrand P. *Nord and paper research journal*, 2011, pp. 1–47.
27. Hill J., Sabourin M., Aichinger J., Johansson L., Gorski D., Axelsson P. *7th International Fundamental Mechanical Pulp*, Nanjing, 2010, p. 164.
28. Johansson L., Hill J., Gorski D., Axelsson P. *Nord and paper research journal*, 2011, pp. 31–46.
29. Sabourin M., Xu E., Cort B., Boileau I., Waller A. *Pulp and paper*, 1997, pp. 111–118.
30. Gorski D., Morseburg K., Olson J., Luukkonen A. *Nord and paper research journal*, 2012, pp. 872–881.
31. Fernando D., Daniel G. *Tappi journal*, 2010, pp. 47–55.
32. Blanchette R.A., Akhtar M., Attridge M.C. *Tappi journal*, 1992, pp. 121–124.
33. Fernando D., Muhić D., Engstrand P., Daniel G. *Holzforschung*, 2012, pp. 467–475.
34. Eriksen O. *High-frequency pressure measurements in the refining zone of a high-consistency refiner: Doctoral thesis*, Norwegian University of Science and Technology, 2003, 303 p.
35. May W.D., McRae M.R., Miles K.B., Lunan W.E. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1998, pp. 47–53.
36. Peakes D.E. *Tappi*, 1967, vol. 50, p. 38A.
37. Olender D., Wild P., Byrnes P., Ouellet D., Sabourin M. *Journal of Pulp and Paper Science*, 2007, pp. 163–171.
38. Heymer J.O., Olson J.A., Kerekes R.J. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2011, pp. 283–287.
39. Eriksen O., Gregersen O., Krogstad P.-A. *Journal of Pulp and Paper Science*, 2005, pp. 458–467.
40. Senger J.J., Ouellet D. *Journal of Pulp and Paper Science*, 2002, pp. 364–369.
41. Hietanen S. *Paperi Puu*, 1991, pp. 52–61.
42. Gorski D., Mörseburg K., Axelsson P., Engstrand P. *Nord and paper research journal*, 2011, pp. 47–63.
43. Gorski D., Mörseburg K., Johansson L. *Nord and paper research journal*, 2011, pp. 232–247.
44. Gorski D., Olson J., Luukkonen A. *Appita journal*, 2012, pp. 244–249.
45. Gorski D., Johansson L., Engstrand P. *Holzforschung*, 2012, pp. 275–281.
46. Kang T., Paulapuro H. *Pulp and Paper*, 2006, pp. 51–54.
47. Hartman R.R. *Mechanical Treatment of Pulp Fibres for Property Development: Doctoral Thesis*, Appleton, 1984, 127 p.
48. Braaten K.R. *Pulp and paper*, 2000, vol. 101, pp. 122–127.
49. Miles K., Karnis A. *Tappi Journal*, 1991, vol. 74(1), pp. 157–164.
50. Wistara N., Young R. *Physical and chemical properties of pulps*, 1999, pp. 291–324.
51. Sjöberg J., Höglund H. *International mechanical pulping conference*, Minnesota, 2007, 11 p.
52. Kang T., Paulapuro H. *The 2004 Progress in Paper Physics Seminar. NTNU and PFI*, Trondheim, 2004, pp. 11–13.
53. Szwarzajtajn E., Przybysz K. *Cellulose chemistry technology*, 1972, pp. 223–238.
54. Hartler N. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 1995, no. 1, pp. 4–7.
55. Genco J.M. *Tappi Pulping Conference*, Atlanta, 1999, pp. 57–96.
56. Stone J.E., Scallan A.M., Abrahamson B. *Svensk Papperstidn*, 1968, pp. 687–694.
57. Olejnik K. *BioResources*, 2013, vol. 8, p. 3212.
58. Loijas M. *Factors affecting the axial force in low-consistency refining*, Tampere, 2010, 32 p.
59. Htun M., Fellers C. *Tappi*, 1982, vol. 65(4), p. 113.
60. Nanko H., Ohsawa J. *Papermaking Raw Materials: Transactions of the Ninth Fundamental Research, Mechanical Engineering Publications*, London, 1989, pp 783–830.
61. Retulainen E. *The Role of Fibre Bonding in Paper Properties: Doctoral Thesis*, Espoo, 1997, 312 p.
62. Giertz H. *International Symposium on Fundamental Concepts of Refining Institute of Paper Chemistry*, Appleton, 1980, pp. 324–330.
63. Page D.H. *Svensk Papperstidn*, 1985, pp. 30–35.
64. Page D.H., Seth R.S., Jordan B.D., Barbe M.C. *Papermaking Raw Materials: Transactions of the Eighth Fundamental Research*, London, 1985, pp. 183–227.
65. Kozhukhov V.A., Alashkevich Yu.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 2, pp. 153–155. (in Russ.).
66. Kozhukhov V.A., Alashkevich Yu.D., Kovalev V.I. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 2014, no. 2, pp. 94–100. (in Russ.).
67. Korda I., Libnar Z., Prokop I. *Razmol bumazhnoy massy: ucheb. dlya vuzov*. [Grinding paper pulp: textbook for universities]. Moscow, 1967, 421 p. (in Russ.).
68. Alashkevich Yu.D., Reshetova N.S. *Teoriya i konstruktivnaya mashin i oborudovaniya otrasli: ucheb. posobiye*. [Theory and design of machinery and equipment in the industry: textbook allowance]. Krasnoyarsk, 2015, 317 p. (in Russ.).
69. Pakhar' D.V., Kovalev V.I., Alashkevich Yu.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 1, pp. 167–172. (in Russ.).
70. Nabyeva A.A., Kovalev V.I., Alashkevich Yu.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 3, pp. 169–172. (in Russ.).
71. Ivanov S.N. *Tekhnologiya bumagi*. [Paper technology]. Moscow, Leningrad, 1970, 720 p. (in Russ.).
72. Laptev L.N., Khalandovskiy I.N. *Novoye v tekhnologii razmola massy na diskovykh mel'nitsakh: sbornik referatov*. [New in the technology of pulp grinding in disk mills: a collection of abstracts]. Leningrad, 1970, pp. 157–171. (in Russ.).
73. Sakharov S.M. *Razmol massy vysokoy kontsentratsii: sbornik referatov po zarubezhnym materialam*. [Grinding the mass of high concentration: a collection of abstracts on foreign materials]. Moscow, 1971, 64 p. (in Russ.).
74. Matveyev B.P. *Issledovaniye osnovnykh faktorov protsessa razmola sul'fatnoy nebelenoy tsellyulozy v disko-voymel'nitse pri vysokoy kontsentratsii: dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk*. [Investigation of the main factors of the

- process of grinding unbleached sulfate cellulose in a disc mill at high concentration: dis. ... Candidate of technical sciences]. Leningrad, 1971, 112 p. (in Russ.).
75. Vasil'yev A.A. *Optimizatsiya parametrov nozhevoy garnitury dlya razmola massy vysokoy kontsentratsii: dis. ... kand. tekhn. nauk.* [Optimization of the parameters of the knife set for grinding a mass of high concentration: dis. ... Cand. tech. sciences]. Leningrad, 1983, 225 p. (in Russ.).
76. Savitskiy Ye.Ye., Khalandovskiy I.M., Laptev L.N., Byvshev A.V. *Sbornik trudov VNIITSB*, 1976, pp. 18–21. (in Russ.).

Received July 15, 2020

Accepted November 13, 2020

For citing: Ushakov A., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V., Kovalev V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 315–329. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048251.

