

Исследование размола волокнистых материалов при помощи теории контактного взаимодействия ножей

С.Н. Вихарев^{1 a}, Т.А. Григорьева^{2 b}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² Братский государственный университет, ул.Макаренко, 40, Братск, Россия

^acbp200558@mail.ru, ^bUmubrgu@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0002-7945-8027>; ^b<https://orcid.org/0000-0002-5361-6832>

Статья поступила 03.02.2023, принята 20.02.2023

В статье исследовано силовое взаимодействие ножей при помощи разработанной теории дискретного контакта ножей ротора и статора. Время релаксации волокнистых полуфабрикатов составляет от десяти тысячной доли секунды до десятков секунд. Теоретически исследовано контактное давление между ножами гарнитуры. Амплитуда контактного давления зависит от факторов процесса размола. Частоты воздействий на волокнистый материал зависят от рисунка ножей гарнитуры и частоты вращения ротора. На выходе из площадки контакта ножей возникает отрицательное давление (разряжение) при размоле массы низкой концентрации. Рекомендуется увеличивать скорость скольжения ножей или частоту вращения ротора для снижения энергоёмкости при размоле щепы и массы высокой концентрации, а при размоле массы низкой концентрации — уменьшать. Энергоёмкость процесса размола при высокой плотности контакта ножей в диапазоне (0,02–0,12)/ξ снижается. Рекомендуется использовать гарнитуру с высокой плотностью контакта ножей при размоле волокнистых материалов. Для уменьшения энергоёмкости мельницы и вероятности подгорания волокнистых материалов рекомендуется подавать воду в зону размола.

Ключевые слова: ножевые машины; размол; волокнистый полуфабрикат; давление; число Деборы; коэффициент трения.

Research of fibrous material grinding using the theory of contact interaction of knives

S.N. Vikharev^{1 a}, T.A. Grigoreva^{2 b}

¹ Ural State Forest Engineering University, Siberian tract, 37, Ekaterinburg, Russia

² Bratsk state University; 40, Makarenko st., Bratsk, Russia

^acbp200558@mail.ru, ^bUmubrgu@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0002-7945-8027>; ^b<https://orcid.org/0000-0002-5361-6832>

Received 03.02.2023, accepted 20.02.2023

The article investigated the force interaction of knives using the developed theory of discrete contact between rotor and stator knives. Time of relaxation of fibrous semi-finished items ranges from ten thousandth of a second up to tens of seconds. Theoretically, the contact pressure between the knives of the headset has been investigated. The amplitude of the contact pressure depends on the factors of the grinding process. Frequency effects on the fibrous material depend on the pattern of the knives of the headset and often the rotation of the rotor. At the exit from the knife contact area, a negative pressure (vacuum) occurs when the mass of low concentration is ground. It is recommended to increase the sliding speed of knives or the rotor speed to reduce energy consumption when grinding chips and mass of high concentration, and to reduce when grinding mass of low concentration. Energy intensity of grinding process at high contact density of knives in the range (0.02–0.12)/ξ decreases. It is recommended to use a headset with a high contact density of knives when grinding fibrous materials. To reduce the energy consumption of the mill and the likelihood of burning fibrous materials, it is recommended to supply water to the grinding zone.

Keywords: bar machines; refining; fibrous materials; pressure; Deborah's number; factor of friction.

Введение. Ножевые мельницы — это основное технологическое оборудование для размола волокнистых материалов. При размоле древесных волокон закладываются качественные характеристики бумаги, картона и древесных плит. Эти машины очень энергоёмки и являются основными потребителями электроэнергии при производстве вышеперечисленной продукции из древесины [1–5]. Мощность привода современных мельниц в производствах древесной массы из щепы достигает де-

сятков мегаватт [6]. Процесс размола волокнистых материалов рассматривается в двух аспектах — гидродинамического [4; 6; 7 и др.] и силового [5–9 и др.] воздействий на волокнистый материал ножей гарнитуры ротора и статора. Коэффициент полезного действия ножевых мельниц не превышает 1 % [5].

В статье представлены основные результаты теории контактного взаимодействия ножей, разработанной применительно к ножевым размалывающим машинам

[10], и разрабатываются подходы к снижению энергопотребления размалывающего оборудования.

Объект исследований. Современные исследования размола древесных волокон в мельницах выделяют следующие фазы этого сложного процесса:

1. Шнековая или насосная подача щепы или древесной массы в зону размола.

2. Взаимодействие волокнистого материала с ножами гарнитуры. Силовые и гидродинамические процессы в межножевом зазоре мельницы, деформации и напряжения в древесных волокнах. Необратимая деформация древесных волокон в виде их размола. Выход размолотых древесных волокон из зоны размола.

Теория контакта ножей при размоле [10] разработана для фазы силового действия ножей на древесные волокна. Размол волокнистых материалов высокой концентрации и щепы существенно отличается от размола материалов при низкой концентрации. Это различие в основном обусловлено следующим [5]:

1. Межножевой зазор при размоле волокнистых материалов высокой концентрации и щепы существенно больше, чем при размоле материалов низкой концентрации.

2. Интенсивное выделение тепла и парообразование при размоле щепы и волокнистых материалов высокой концентрации.

3. Повышенная вероятность подгорания и забивания канавок между ножами размалываемым материалом.

В работе [10] получены выражения для определения контактного давления между ножами ротора и статора при размоле волокнистых материалов. Анализ этих выражений позволяет сделать вывод, о том, что контактное давление определяется следующими характеристиками:

1. Характеристики присадки мельницы, т. е. относительного межножевого зазора $\frac{\delta}{a+b}$, где δ — межножевой зазор в результате действия нагрузки P (рис. 1); $a + b$ — ширина ножа.

2. Характеристики нагрузки на нож $\hat{P} = \frac{2P}{(a+b)^3} h/E^*$, где h , E^* — толщина и приведенный модуль упругости волокнистого материала; $E^* = E_L/(1-\nu^2)$, где E_L — длительный модуль упругости волокнистого материала; ν — коэффициент Пуассона.

3. Характеристики размалываемого волокнистого материала $c = T_\varepsilon/T_\sigma$, где T_ε , T_σ — время последствия и релаксации материала.

4. Характеристики числа Деборы древесных волокон при размоле $\xi = T_\sigma V/a_H$, где a_H — ширина площадки контакта ножей; V — линейная скорость перемещения ротора.

5. Характеристики рисунка ножей гарнитуры, т. е. относительного шага (плотности та) ножей $\frac{l}{a+b}$, где l — шаг ножей.

Время релаксации волокнистых материалов. Волокнистые материалы (в том числе древесина и бумага) представляют собой вязкоупругий материал. Для исследования свойств таких материалов используется феноменологический подход [11]. Для обработки фе-

номенологических показателей материалов используют интегральный и аналитический методы.

Интегральный метод базируется на опытных данных, анализируя которые, получают выражения, описывающие влияние переменных факторов на показатели материала. Аналитический метод основан на реологических моделях, которые описывают поведение материала при деформациях [11].

В последнее время для описания свойств древесины и древесной массы используют модель Максвелла – Томсона [10; 11]. Реологические характеристики этой модели получают, как правило, анализируя взаимосвязь между напряжением и деформацией материала.

Силы, действующие на ножи гарнитуры, показаны на рис. 2.

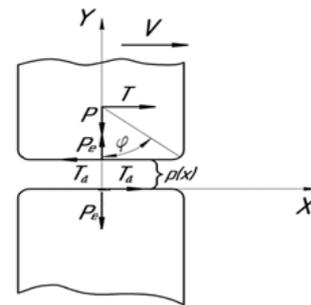


Рис. 1. Контактное взаимодействие ножей гарнитуры

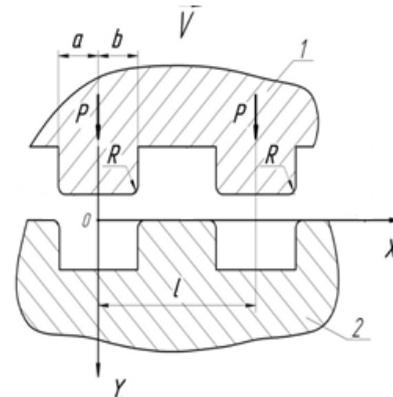


Рис. 2. Силы, действующие на ножи гарнитуры

Были попытки описать поведение материалов более сложными законами деформирования, однако при этом увеличивается сложность реологических моделей. Такой подход существенно усложняет исследования и не обладает достаточной точностью [12; 13]. Для моделирования волокнистых материалов многие авторы рекомендуют использовать стандартную модель вязкоупругого тела [14; 15].

Процесс релаксации волокнистых материалов при размоле имеет огромное значение, так как волокнистый материал испытывает высокочастотное воздействие ножей гарнитуры [16]. Основной характеристикой процесса релаксации волокнистых материалов является время релаксации напряжений. Время релаксации древесины зависит от различных факторов [19] и находится в пределах от единиц до десятков секунд [20; 21]. Время релаксации различных волокнистых материалов представлено в таблице.

Таблица 1. Время релаксации волокнистых материалов

Волокнистый материал (вид деформации)	Время релаксации, с	Автор исследований
Древесина (сдвиг)	37,5–41,9	О.Р. Дворняк [20]
Древесина (сжатие)	4,6–4,7	Э.О. Булатасов [21]
Целлюлоза березовая сульфитная (сжатие) концентрацией 1 % 3 % 6 %	(2,8–3,9)10 ⁻⁴ (4,2–4,4)10 ⁻⁴ (2,9–5,6)10 ⁻⁴	О.А. Герентьев [22]
Целлюлоза сосновая сульфитная (сжатие) концентрацией 3 % 6 %	(2,8–4,2)10 ⁻⁴ (3,6–4,0)10 ⁻⁴	О.А. Герентьев [22]
Целлюлоза небеленая сульфатная концентрацией 8 %, сжатие со скоростью 2 м/с 30 м/с	(2,7–4,2)10 ⁻⁴ (1,8–2,3)10 ⁻⁴	В.Н. Гончаров [5]
Целлюлоза воздушно-сухая сульфатная небеленая (сжатие)	9,4–11,7	В.И. Комаров [14] В.А. Романов [19]

Давление в зоне контакта ножей. При контакте ножей ротора и статора возникает площадка контакта, ширину которой можно определить как [10]:

$$a_n = \sqrt[3]{\frac{3P(a+b)}{4E^*}}$$

где $a + b$ — ширина ножа гарнитуры.

Зависимость ширины площадки контакта ножей ротора и статора от нагрузки, действующей на нож, показана на рис. 3.

Максимальное значение a_{nmax} можно рассчитать по формуле:

$$a_{nmax} = \frac{a+b}{\cos \frac{\beta}{2}}$$

где β — угол перекрещивания ножей гарнитуры ротора и статора.

Давление в зоне контакта от внедрения ножей в волокнистый материал (сульфитная целлюлоза концентрацией 45–50 %, $V = 90$ м/с и $l/(a+b) = 2$) представлено на рис. 4.

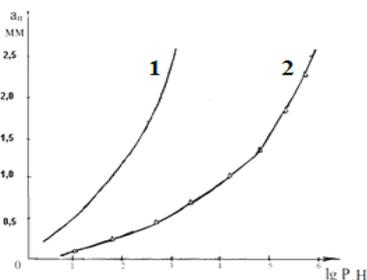


Рис. 3. Ширина площадки контакта от нагрузки на нож: 1 — $E^* = 1,5 \cdot 10^5$ Па, $(a+b) = 0,004$ м; 2 — $E^* = 1,1 \cdot 10^6$ Па, $(a+b) = 0,008$ м

Амплитуда контактного давления определялась по методике, разработанной в [10] для j -й полосы зоны контакта ножей. В расчетах ширина ножа и межножевой канавки составляла по 3 мм, $V = 100$ м/с, $P = 10^3$ Н. Амплитуда контактного давления от величины смещения ротора показана на рис. 5. На этом рисунке видны

импульсы давления, частота которых соответствует гарнитурной частоте. С этой частотой ножи гарнитуры ротора и статора взаимодействуют друг с другом. Амплитуда импульсного давления зависит от факторов процесса размола и экспериментально исследована в работе [16].

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что контактное давление между ножами хорошо описывается моделью стандартного вязкоупругого тела Максвелла – Томсона. При моделировании контактного давления выявлено следующее:

1. Амплитуда давления зависит от факторов процесса размола, одним из самых значимых факторов является характеристики присадки мельницы и концентрация размалываемого материала.
2. Частоты воздействий на волокнистый материал зависят от рисунка ножей гарнитуры и частоты вращения ротора. Эти частоты названы гарнитурными частотами [15; 16].
3. На выходе из площадки контакта ножей возникает отрицательное давление (разряжение) при размоле массы низкой концентрации.

Результаты теоретического моделирования контактного давления подтверждены экспериментально [5; 16; 23; 25 и др.].

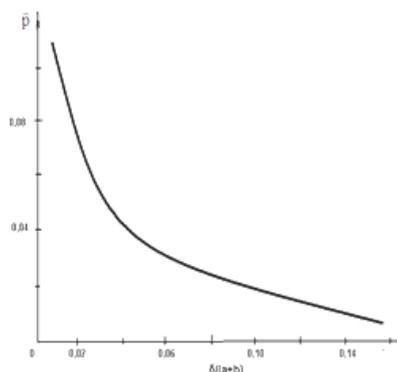


Рис. 4. Максимальная амплитуда контактного давления от величины внедрения ножей в волокнистый материал

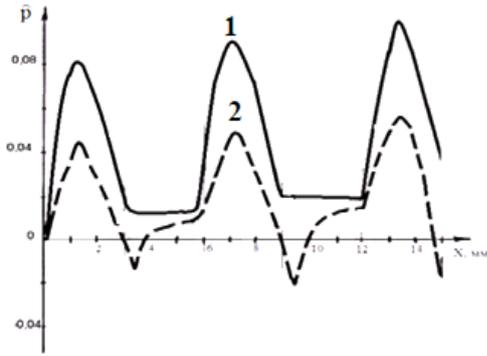


Рис. 5. Амплитуда контактного давления между ножами гарнитуры от перемещения ротора: 1 — пропаренная сосновая щепа концентрацией 50 %; 2 — древесная масса концентрацией 2 %

Число Деборы при размоле волокнистых материалов. На рис. 6 показана зависимость зазора между ножами S от числа Деборы ξ . Полученные результаты исследований выявили эффект «всплывания» ножей гарнитуры над размалываемым волокнистым материалом при значительных скоростях ротора мельницы. Этот эффект подобен эффекту «всплывания» цапфы в подшипниках скольжения [24]. При малых скоростях перемещения ножей (при $V \rightarrow 0$ и $\xi \rightarrow \infty$) межножевой зазор не зависит от плотности их контакта. При увеличении скорости перемещения ротора плотность контакта ножей существенно влияет на межножевой зазор и контактное давление между ротором и статором. При увеличении плотности контакта ножей межножевой зазор при постоянном контактном давлении также увеличивается.

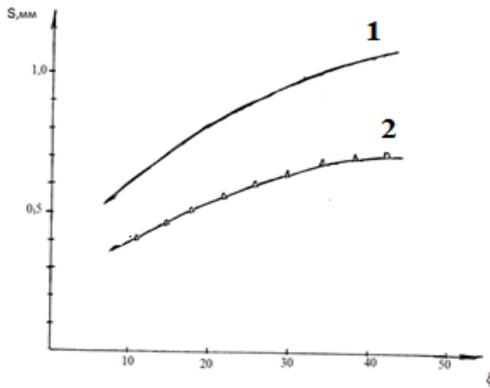


Рис. 6. Зависимость зазора между ротором и статором от числа Деборы: 1 — $\bar{p} = 0,052$ $l/(a+b) = 1,5$; 2 — $\bar{p} = 0,09$ $l/(a+b) = 3,5$

На рис. 7 показана зависимость обратного числа Деборы $1/\xi$ от скорости перемещения ротора V . Эта зависимость является линейной величиной при постоянной ширине площадки контакта ножей a_H . Угол наклона этой линейной зависимости определяют характеристики волокнистого материала. Чем больше концентрация волокнистого материала, тем меньше угол наклона линейной зависимости, описывающей обратное число Деборы, к оси абсцисс.

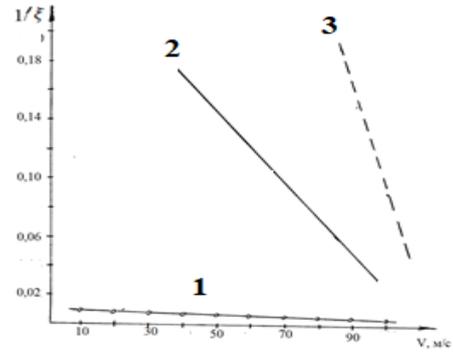


Рис. 7. Обратное число Деборы волокнистого материала при размоле от скорости скольжения ножей: 1 — еловая щепа концентрацией 50 %; 2 — небеленая сульфитная целлюлоза концентрацией 20 %; 3 — то же концентрацией 3 %

Коэффициент трения между ножами при размоле волокнистых материалов. Коэффициент трения складывается из адгезионной и деформационной составляющих [24]. Деформационную составляющую силы трения между ротором и статором мельницы можно определить как сопротивление перемещению ротора для деформации волокнистого материала между ножами гарнитуры. Адгезионная составляющая рассчитывается как сопротивление срезу адгезионных связей между ножами при размоле волокнистых материалов.

На основании разработанной модели контактного взаимодействия ножей проведены исследования коэффициента трения. Результаты исследований представлены на рис. 8. Эта зависимость получена при $\bar{p} = 0,08$.

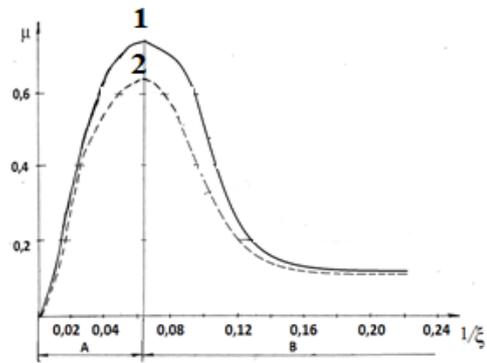


Рис. 8. Деформационная составляющая коэффициента трения при размоле между ротором и статором от обратного числа Деборы: 1 — низкая плотность контакта ножей $\frac{l}{a+b} = 4$; 2 — высокая плотность контакта ножей $\frac{l}{a+b} = 2$; A — зона размола щепы и волокнистых материалов высокой концентрации; B — зона размола волокнистых материалов низкой концентрации

На графике (рис. 8) можно выделить зоны А и В. Зона А соответствует размолу щепы и волокнистых материалов высокой концентрации, а зона В — размолу волокнистых материалов низкой концентрации.

Обобщая полученные результаты исследований, можно сделать вывод о том, что для уменьшения коэффициента трения и энергоемкости мельницы рекомендуется следующее:

– при размоле щепы и массы высокой концентрации рекомендуется увеличивать скорость перемещения ножей или частоту вращения ротора;

– при размоле массы низкой концентрации рекомендуется снижать скорость перемещения ножей или частоту вращения ротора.

Как известно, в зоне размола выделяется тепло, и концентрация размалываемой массы увеличивается по радиусу размалывающих дисков [25]. Это может привести к «подгоранию» и уменьшению проходимости волокнистой массы в канавках гарнитуры [5; 25].

При увеличении концентрации массы повышается приведенная жесткость материала и, согласно исследованиям автора, приводит к увеличению коэффициента трения и потребляемой энергии на размол [10]. Для снижения энергоемкости рекомендуется выравнивание концентрации массы по радиусу дисков мельницы. Для этого рекомендуется подавать воду в зону размола.

Литература

1. Легоцкий С.С., Гончаров В.Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М.: Лесная пром-сть, 1990. 224 с.
2. Иванов С.Н. Технология бумаги. М.: Лесная пром-сть, 2006. 696 с.
3. Бывшев А.В., Савицкий Е.Е. Механическое диспергирование волокнистых материалов. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1991. 216 с.
4. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1986. 36 с.
5. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых мельницах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1990. 31 с.
6. Kang T., Somboon P., Paulapuro H. Fibrillation of mechanical pulp fibers // Pap. Puu. 2006. V. 88 (7). P. 409-411.
7. Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И., Набиева А.А. Влияние рисунка гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов: моногр. в 2-х ч. Красноярск: СибГТУ, 2010. Ч. 1. 168 с.
8. Алашкевич Ю.Д., Пахарь Д.В., Ковалев В.И. Анализ силового воздействия на волокно при размоле в дисковых мельницах с ножами криволинейной формы // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 167-172.
9. Шуркина В.И. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2016. 145 с.
10. Вихарев С.Н. Контактное взаимодействие гарнитуры мельниц с волокнистым полуфабрикатом // Лесной журнал. 2013. № 3. С. 133-138.
11. Комаров В.И. Деформация и разрушение целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 440 с.
12. Бабурин С.В., Киприанов А.И. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесная пром-сть, 1983. 224 с.
13. Кленкова Н.И. Структура и релаксационная способность целлюлозы. Л.: Наука, 1976. 367 с.
14. Комаров В.И., Казаков Я.В. Определение времени релаксации напряжения в целлюлозно-бумажных материалах из статических кривых « σ - ϵ » при деформировании и

Выводы

1. Стадия силового взаимодействия ножей гарнитуры при размоле волокнистых материалов моделируется разработанной теорией дискретного контакта ножей гарнитуры. Полученные теоретические зависимости подтверждены экспериментальными исследованиями.

2. Рекомендуется увеличивать скорость скольжения ножей или частоту вращения ротора для снижения энергоемкости при размоле щепы и массы высокой концентрации, а при размоле массы низкой концентрации — уменьшать.

3. Энергоемкость процесса размола при высокой плотности контакта ножей в диапазоне (0,02–0,12)/ ξ снижается. Рекомендуется использовать гарнитуру с высокой плотностью контакта ножей при размоле волокнистых материалов.

4. Для уменьшения энергоемкости мельницы и вероятности подгорания волокнистых материалов рекомендуется подавать воду в зону размола.

нагружении с постоянной скоростью // Лесной журнал. 1993. № 5-6. С. 130-133.

15. Вихарев С.Н., Душина С.А. Модель волокнистой прослойки при размоле в дисковых мельницах // Лесной журнал. 2014. № 2. С. 116-122.
16. Вихарев С.Н. Экспериментальные исследования процессов размола при помощи вибрации на гарнитуре статора // Машины и аппараты ЦБП: межвуз. сб. науч. тр. Л., 1990. С. 29-33.
17. Гермелис А.А., Латышенко В.А. Определение реологических характеристик из статических кривых « σ - ϵ », кривых ползучести и релаксации // Механика полимеров. 1967. № 6. С. 977-988.
18. Латышенко В.А. Диагностика жесткости и прочности материалов. Рига: Знание, 1968. 320 с.
19. Романов В.А. Методика оценки упругорелаксационных и деформационных свойств бумаги. Л.: ЛТИ ЦБП, 1988. 70 с.
20. Дворняк О.Р. Моделирование реологического поведения древесины в процессах прессования // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 3. С. 150-155.
21. Булатасов Э.О. Совершенствование конструкции фрезерного ротора для измельчения древесины на основе повышенной демпфирующей способности корпуса: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Оренбург, 2017. 16 с.
22. Терентьев О.А. Гидродинамических волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесная пром-сть, 1980. 248 с.
23. Eriksen O. Mechanism in refining zone for development of physical properties of TMP fibers in low-consistency refiner. Norwegian University of Science and Technology, June 2013. 64 p.
24. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 509 p.
25. Olender D., Wild P. Forces on Bars in High-Consistency Mill-Scale Refiners. Trends in Primary and Rejects Stage Refiners // J. Pulp Paper Sci. 2007. V. 33 (3). P. 163-171.

References

1. Legockij S.S., Goncharov V.N. Potters the equipment and preparation of paper weight. M.: Lesnaya prom-st', 1990. 224 p.
2. Ivanov S.N. Technology of a paper. M.: Lesnaya prom-st', 2006. 696 p.
3. Bvyshev A.V., Savickij E.E. Mechanical of fibrous materials. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. un-ta, 1991. 216 p.

4. Alashkevich YU.D. Bas of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in mill machines: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 1986. 36 p.
5. Goncharov V.N. Theoretical potters of a fundamentals of a milling of fibrous materials in knife mills: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. L., 1990. 31 p.
6. Kang T., Somboon P., Paulapuro H. Fibrillation of mechanical pulp fibers // *Pap. Puu*. 2006. V. 88 (7). P. 409-411.
7. Alashkevich YU.D., Kovalev V.I., Nabieva A.A. Influence of figure sets on process mill fibrous semifinished items: monogr. v 2-h ch. Krasnoyarsk: SibGTU, 2010. CH. 1. 168 p.
8. Alashkevich YU.D., Pahar' D.V., Kovalev V.I. Analyses of power influence on a fiber at mill in disk refiner with knives of the curvilinear form // *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* (Chemistry of plant raw material). 2009. № 1. P. 167-172.
9. SHurkina V.I. Perfection knife mill fibrous vegetative polymers in pulp-and-paper manufacture: dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 2016. 145 p.
10. Viharev S.N. Contact interaction sets of mills with a fibrous semi finished item // *Forest Journal*. 2013. № 3. P. 133-138.
11. Komarov V.I. Mosquitoes and destruction of pulp and paper materials. Arhangel'sk: Izd-vo AGTU, 2002. 440 p.
12. Baburin S.V., Kiprianov A.I. Rheological bases of processes of pulp-and-paper manufacture. M.: Lesnaya prom-st', 1983. 224 p.
13. Klenkova N.I. Structure and relaxation ability of cellulose. L.: Nauka, 1976. 367 p.
14. Komarov V.I., Kazakov YA.V. Definition of time of a relaxation of a pressure in pulp-and-paper materials from static curves « σ - ε » at deformation and loading with constant speed // *Forest Journal*. 1993. № 5-6. P. 130-133.
15. Viharev S.N., Dushinina S.A. Model of a fibrous layer at mill in disk refiner // *Forest Journal*. 2014. № 2. P. 116-122.
16. Viharev S.N. Experimental researches of processes mill by means of vibration on set stator // *Mashiny i apparaty CBP: mezhvuz. sb. nauch. tr. L.*, 1990. P. 29-33.
17. Germelis A.A., Latyshenko V.A. Definition rheological characteristics from static curves « σ - ε », curves of creep and a relaxation // *Polymer Mechanics*. 1967. № 6. P. 977-988.
18. Latyshenko V.A. Diagnostics of rigidity and durability of materials. Riga: Znanie, 1968. 320 p.
19. Romanov V.A. Technique's novels of an estimationelastoplastic and deformation properties of paper. L.: LTI CBP, 1988. 70 p.
20. Dvornyak O.R. Modelling rheological behavior of wood during pressing // *Journal of Engineering Physics*. 2003. V. 76. № 3. P. 150-155.
21. Bulatasov E.O. Improving the design of the milling rotor for grinding wood based on the increased damping capacity of the housing: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Orenburg, 2017. 16 p.
22. Terent'ev O.A. Hydrodynamical of fibrous suspensions in pulp-and-paper manufacture. M.: Lesnaya prom-st', 1980. 248 p.
23. Eriksen O. Mechanism in refining zone for development of physical properties of TMP fibers in low-consistency refiner. Norwegian University of Science and Technology, June 2013. 64 p.
24. Dzhonson K. Contact Interaction Mechanics. M.: Mir, 1989. 509 p.
25. Olender D., Wild P. Forces on Bars in High-Consistency Mill-Scale Refiners. Trends in Primary and Rejects Stage Refiners // *J. Pulp Paper Sci.* 2007. V. 33 (3). P. 163-171.