

УДК 676.024.61

МЕХАНИЗМ РАЗМОЛА НА НОЖЕВОМ ЦЕНТРОБЕЖНО-РАЗМАЛЫВАЮЩЕМ АППАРАТЕ

© *И.А. Воронин**, Ю.Д. Алашкевич, В.А. Кожухов

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

В работе представлена методика расчета силового воздействия на волокнистую суспензию рабочих органов в центробежно-размалывающем аппарате. Целью исследований является расчет усилия, приходящегося на площадь одного зуба инерционного тела при различных скоростях вращения ротора, определение влияния окружной скорости движения инерционных тел на процесс размолва волокнистых полуфабрикатов. В статье рассмотрен механизм размолва на ножевом центробежно-размалывающем аппарате, определены касательные силы сдвига при контакте ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана, определено воздействие на волокно сил трения качения и сил трения скольжения при контакте ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана, а также воздействие удельного давления в месте контакта ножей сателлита с ножами размольного стакана при воздействии сил инерции. На основании результатов исследований научно обосновано, что усилия, возникающие при минимальной из рассмотренных нами значений скорости вращения инерционных тел, достаточном для разрушения волокна при использовании этой установки для размолва волокнистых полуфабрикатов. Увеличение скорости вращения сателлитов вызывает положительное изменение физико-механических характеристик готовых отливок.

Ключевые слова: размол, размольный сателлит, волокно, удельное давление, сила инерции, размольный стакан, сила трения.

Введение

Размоллом называется процесс обработки растительных волокон в присутствии воды, выполняемый в размалывающих машинах периодического и непрерывного действия. Размол является одним из важнейших процессов бумажного производства, позволяющих в широком интервале значений изменять многие свойства бумаги [1–4].

Для размолва волокнистых полуфабрикатов применяется центробежно-размалывающий аппарат [5]. Размол волокнистого материала в таком аппарате производится путем перекатывания размольного сателлита по внутренней стенке размольного стакана под действием центробежной силы и силы трения, возникающей при вращении размольного стакана вокруг центрального вала и собственной оси [5] (рис. 1).

На рисунке 1 представлена схема для определения касательных сил сдвига при контакте ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана.

Воронин Иван Андреевич – доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, кандидат технических наук, e-mail: ivan_voronin@list.ru

Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, e-mail: alashkevichud@sibsau.ru

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

Экспериментальная часть

Воздействие на волокно размольного сателлита за счет сил инерции

Условие разрушения волокна [6–9] может быть записано в следующем виде:

* Автор, с которым следует вести переписку.

$$J > F^{mp} \quad (1)$$

Сила инерции J , Н определяется по формуле

$$J = m \cdot \omega_2^2 \cdot R, \quad (2)$$

где m – масса размольного сателлита, кг; ω_2 – угловая скорость размольного стакана, c^{-1} ; R – радиус размольного стакана, м.

Угловая скорость размольного стакана ω_2^2 , c^{-1} определяется по формуле

$$\omega_2^2 = v_c / R, \quad (3)$$

где v_c – окружная скорость размольного стакана, м/с;

$$v_c = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n / 60, \quad (4)$$

где n – частота вращения размольного стакана вокруг собственной оси, об/мин.

Из рисунка 1 следует, что сила трения F^{TP} о дно размольного стакана препятствует движению размольного сателлита к внутренней боковой поверхности размольного стакана и, соответственно, снижает эффект воздействия на волокно инерционных сил J [7, 8].

Сила трения F^{TP} , Н определяется по формуле

$$F^{TP} = f_{ck} \cdot P = f_{ck} \cdot m \cdot g, \quad (5)$$

где f_{ck} – коэффициент трения скольжения металла по металлу, $f_{ck} = 0.2$; P – нормальная сила от массы сателлита, Н.

Усилие, приходящееся в месте контакта сателлита с внутренней поверхностью размольного стакана P_1 , Н определяется по формуле

$$P_1 = J - F^{TP}. \quad (6)$$

Разрушение волокон за счет касательных сил сдвига при контакте ножей сателлита с ножами размольного стакана. Под действием силы P_1 размольный сателлит, находящийся на внутренней поверхности размольного стакана, условно деформируется, вследствие чего он опирается не на одну точку, а на площадку больших или меньших размеров [7, 8, 10, 11]. Это приводит к тому, что при качении тела точка «А» (рис. 1) приложения реакции опоры смещается немного вперед от вертикали, проходящей через центр тяжести тела, а линия действия силы реакции опоры R_A отклоняется немного назад от этой вертикали. При этом нормальная составляющая $R_n = N$ реакции опоры компенсирует силу инерции J (т.е. $R_n = -J$), а не скомпенсированная тангенциальная составляющая R_t реакции опоры направлена против движения размольного сателлита и играет роль силы трения качения F_k^{TP} или силы трения о стенку размольного стакана [8, 12, 13].

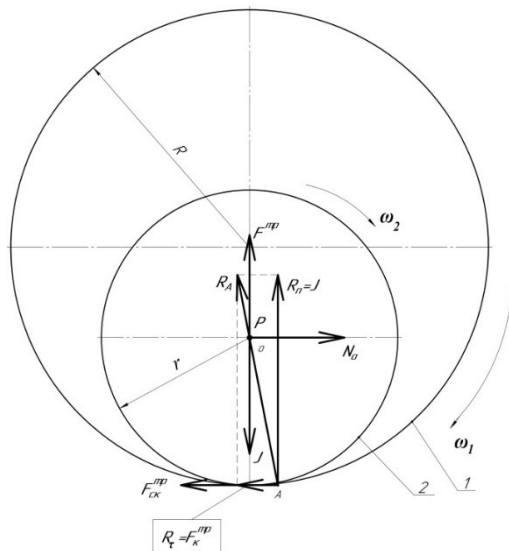


Рис. 1. Схема для определения касательных сил сдвига при контакте ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана:

1 – размольный стакан; 2 – размольный сателлит; F_k^{TP} – сила трения качения о размольный стакан, Н; R_n – нормальная составляющая реакции опоры, Н; R_t – тангенциальная составляющая реакции опоры, Н; R_A – сила реакции опоры, Н; F_{ck}^{TP} – сила трения скольжения о размольный стакан, Н; ω_1 – угловая скорость размольного стакана, c^{-1} ; ω_2 – угловая скорость размольного сателлита c^{-1} ; R – радиус размольного стакана; r – радиус размольного сателлита

Модуль силы трения качения о стенку размольного стакана F_k^{TP} определяется по формуле

$$F_k^{TP} = \frac{f_k \cdot P_1}{r}, \quad (7)$$

где f_k – коэффициент трения качения равен 0.005 м; r – радиус размольного сателлита равен 0.045 м.

Сила трения скольжения $F_{ск}^{TP}$, Н, о стенку размольного стакана определяется по формуле:

$$F_{ск}^{TP} = f_{ск} \cdot P_1. \quad (8)$$

Рассмотрим состояние размольного сателлита при различной частоте вращения и изменении окружного усилия $N_{окр}$ [7, 8]:

а) размольный сателлит катится без скольжения, если $F_k^{TP} < N_{окр} < F_{ск}^{TP}$;

б) размольный сателлит катится со скольжением, если $N_{окр} > F_{ск}^{TP}$.

Определим окружное усилие, действующее на размольный сателлит $N_{окр}$, Н:

$$N_{окр} = P_{дв} \cdot \eta / V_0, \quad (9)$$

где $P_{дв}$ – мощность электродвигателя, кВт; η – коэффициент полезного действия механической передачи от двигателя [6]; V_0 – окружная скорость вращения размольного сателлита, м/с.

Коэффициент полезного действия механической передачи от двигателя определяется по формуле

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4, \quad (10)$$

где η_1 – потери на трение в подшипниках качения; η_2 – потери на трение в ременной передаче с клиновыми ремнями; η_3 – потери на трение в конической передаче; η_4 – потери в опорах вала привода аппарата.

$$V_{са} = \pi \cdot d_{са} \cdot n / 60, \quad (11)$$

где $d_{са}$ – диаметр размольного сателлита, м.

Результаты расчета силовых параметров на волокно сведены в таблицу 1.

Из таблицы 1 следует, что при увеличении частоты вращения размольного сателлита по внутренней образующей поверхности размольного стакана до 883.5 об./мин сателлит катится со скольжением, так как $N_{окр} > F_{ск}^{TP}$. При дальнейшем увеличении частоты вращения размольного сателлита данный сателлит катится без скольжения [6–8], так как с этого момента с увеличением значения частоты вращения размольного сателлита наблюдается снижение значения окружного усилия $N_{окр}$ и увеличение силы трения скольжения о стенку размольного стакана $F_{ск}^{TP}$, что обеспечивает соблюдение условия $F_k^{TP} < N_{окр} < F_{ск}^{TP}$. Сила инерции J с увеличением частоты вращения размольного сателлита продолжает расти.

Так как разрушающая способность размольной установки на волокно обеспечивает максимальное значение частоты вращения размольного сателлита, соответствующее 228 об./мин, поэтому размольные сателлиты движутся в установке со скольжением, что соответствует выполнению условия $N_{окр} > F_{ск}^{TP}$. Р [6–8].

Таблица 1. Силовые параметры воздействия на волокно при изменении частоты вращения размольного сателлита

Частота вращения размольного сателлита n , об./мин	Сила инерции J , Н	Окружное усилие размольного сателлита $N_{окр}$, Н	Сила трения качения о стенку размольного стакана F_k^{TP} , Н	Сила трения скольжения о стенку размольного стакана $F_{ск}^{TP}$, Н
85.5	11.61	2497.05	0.13	2.32
114	20.64	1872.78	0.23	4.13
171	46.45	1248.52	0.52	9.29
228	82.58	936.39	0.93	16.52
285	129.03	749.11	1.45	25.81
342	185.80	624.26	2.09	37.16
399	252.89	535.08	2.84	50.58
798	1011.56	267.54	11.37	202.31
855	1161.23	249.70	13.05	232.25
883.5	1239.93	241.65	13.93	247.99
912	1321.22	234.10	14.85	264.24

Таким образом, в пределах технических характеристик работы установки до максимальной скорости вращения размольного сателлита 228 об./мин преобладающими силами воздействия на волокно при размоле являются силы инерции J и силы трения скольжения $F_{ск}^{TP}$ [7].

Обсуждение результатов

Рассмотрим зависимость сил трения скольжения и трения качения от частоты вращения размольного сателлита (рис. 2).

Из графика следует, что с увеличением частоты вращения размольного сателлита наблюдается увеличение сил трения качения и сил трения скольжения. Наивысшим показателем является сила трения скольжения о стенку размольного стакана [8].

Рассмотрим зависимость сил трения скольжения и трения качения от окружного усилия (рис. 3).

Из графика следует, что с увеличением окружного усилия уменьшается сила трения качения и сила трения скольжения. Сила трения скольжения о стенку размольного стакана является наибольшей, обеспечивающей максимальное разрушающее воздействие на волокно. Также на графике видно, что с уменьшением окружного усилия (увеличение частоты вращения рабочих тел) наблюдается резкий рост силы трения скольжения. Можно предположить, что при частоте вращения размольного сателлита выше критической процесс размола начнет замедляться [14].

Удельное давление в месте контакта ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана при воздействии сил инерции. Удельное давление при размоле волокнистых материалов в ножевых размалывающих машинах является одним из основных регулируемых факторов процесса размола. Высокое удельное давление при размоле приводит к преимущественной рубке волокон, низкое удельное давление – к их преимущественному фибриллированию [7, 9, 15, 16].

Аналогичную картину можно предвидеть и в исследуемой размольной установке с использованием размольного сателлита. Дело в том, что в качестве рабочих органов, непосредственно контактирующих друг с другом в процессе размола волокнистых материалов, выступают ножи сателлита и ножи внутренней боковой поверхности размольного стакана в виде насечки.

Удельное давление в зоне контакта ножей p , Па запишется:

$$P = P_1/F, \quad (12)$$

где P_1 – усилие, приходящееся в месте контакта размольного сателлита с внутренней поверхностью размольного стакана, Н; F – площадь перекрытия ножей размольного сателлита с ножами внутренней боковой поверхности размольного стакана, m^2 .

Из формулы 12 следует, что удельное давление в зоне контакта ножей зависит от величины P_1 , которая растет с увеличением окружной скорости вращения размольного сателлита и площади контакта ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана в зоне контакта «АБ» (рис. 4).

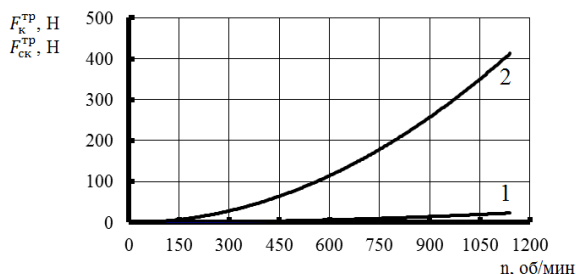


Рис. 2. Зависимость сил трения скольжения и трения качения от частоты вращения размольного сателлита: 1 – сила трения качения о стенку размольного стакана, F_k^{TP} , Н; 2 – сила трения скольжения о стенку размольного стакана, $F_{ск}^{TP}$, Н

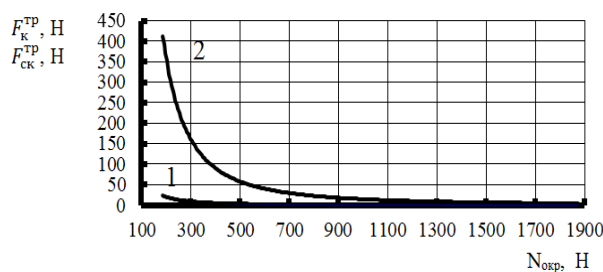
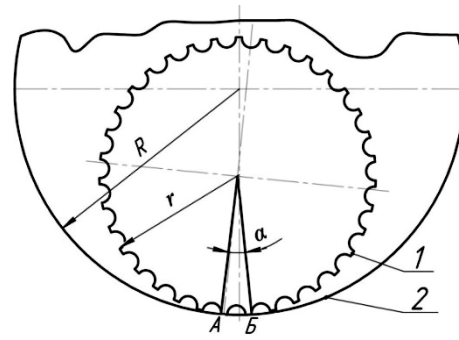


Рис. 3. Зависимость сил трения скольжения и трения качения от окружного усилия: 1 – сила трения качения о стенку размольного стакана, F_k^{TP} , Н; 2 – сила трения скольжения о стенку размольного стакана, $F_{ск}^{TP}$, Н

Рис. 4. Схема определения длины дуги контакта размольного сателлита с внутренней поверхностью размольного стакана:
 1 – размольный сателлит; 2 – размольный стакан; R – радиус размольного стакана; r – радиус размольного сателлита; α – центральный угол дуги



Для определения площади перекрытия ножей размольного сателлита с ножами внутренней боковой поверхности размольного стакана построим расчетную схему воздействия сателлита с внутренней поверхности размольного стакана (рис. 4).

По данной схеме определим длину контакта поверхности размольного сателлита с внутренней поверхностью размольного стакана [18].

Длина дуги АБ, описываемой концом радиуса, пропорциональна величине центрального угла α .
 Дуга АБ (длина контакта) определяется по формуле

$$AB = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \alpha / 360 = \pi \cdot r \cdot \alpha / 180, \tag{13}$$

где r – радиус размольного сателлита равен 0.045 м; α – центральный угол дуги равен 13° .

$$AB = 3.14 \cdot 0.045 \cdot 13 / 180 = 0.01 \text{ м.}$$

При постоянной длине дуги контакта ножей АБ площадь их контакта зависит от угла расположения ножей на боковой поверхности размольного сателлита относительно вертикальной оси (рис. 5).

На рисунке 6 представлена схема перекрытия поверхности ножей размольного стакана с ножами размольного сателлита при различном угле расположении ножей размольного сателлита относительно вертикальной оси.

Геометрические фигуры, полученные после перекрытия ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана, имеют вид трапеций и параллелограммов. Площади этих фигур определяются по известным формулам.

Площадь перекрытия ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана F , м^2 , определяется по формуле

$$F = \sum F_{\text{трап}} + \sum F_{\text{пара-ма}}, \tag{14}$$

где $F_{\text{трап}}$ – площадь трапеции, м^2 ; $F_{\text{пара-ма}}$ – площадь параллелограмма, м^2 .

Результаты расчета удельного давления p , усилий в месте контакта размольного сателлита с поверхностью размольного стакана P_1 и площади размола представлены в таблице 2.

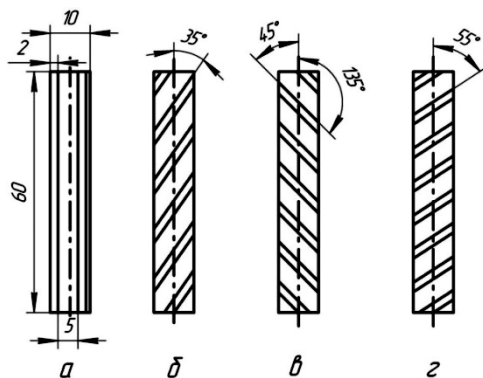


Рис. 5. Схемы отпечатков ножей размольного сателлита при контакте с поверхностью размольного стакана. Углы установки ножей размольного сателлита относительно оси: а – 0° ; б – 35° ; в – 45° ; г – 55°

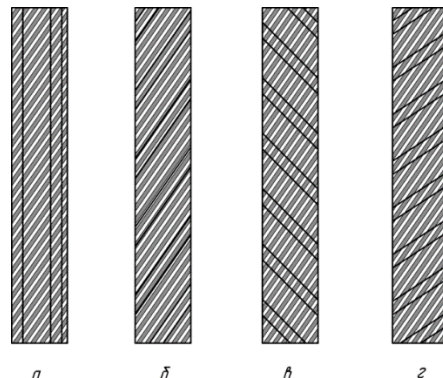


Рис. 6. Схема перекрытия ножей размольного стакана с ножами размольного сателлита. Углы установки ножей размольного сателлита относительно оси: а – 0° ; б – 35° ; в – 45° ; г – 55°

Таблица 2. Расчетные значения основных факторов процесса размола

Угол установки ножей на размольном сателлите относительно оси 0°			
Площадь размола F, м ²	Частота вращения тела n, об/мин	Усилие P ₁ , Н	Давление p, Па
0.00037	114	16.72	45189
	142.5	28.34	76595
	171	42.53	114946
	199.5	59.3	160270
	228	78.63	212514
Угол установки ножей на размольном сателлите относительно оси 35°			
0.00051	114	16.72	32784
	142.5	28.34	55568
	171	42.53	83392
	199.5	59.3	116275
	228	78.63	154176
Угол установки ножей на размольном сателлите относительно оси 45°			
0.00036	114	16.72	46444
	142.5	28.34	78722
	171	42.53	118138
	199.5	59.3	164722
	228	78.63	218417
Угол установки ножей на размольном сателлите относительно оси 55°			
0.00044	114	16.72	38000
	142.5	28.34	64410
	171	42.53	96660
	199.5	59.3	134773
	228	78.63	178705

Из таблицы следует, что наибольшая поверхность перекрытия наблюдается у сателлита с углом установки ножей к оси, равным 35°. При этом с уменьшением площади размола увеличивается удельное давление, приходящееся на эту площадь размола [19, 20].

Выводы

При движении размольного сателлита в размольном стакане воздействие на волокно в большей степени осуществляется за счет силы инерции J и силы трения скольжения $F_{ск}^{ТР}$ о стенку барабана, которая является наибольшей, обеспечивающей максимальное разрушающее воздействие на волокно. Сила трения качения $F_{к}^{ТР}$ оказывает незначительное действие.

Удельное давление в зоне контакта ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана зависит от величины силы, приходящейся в месте контакта размольного сателлита с внутренней поверхностью размольного стакана P₁, которая растет с увеличением окружной скорости вращения сателлита и площади контакта ножей размольного сателлита с ножами размольного стакана.

Список литературы

1. Zhang D., Zhang A., Xue L. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism // Wood Sci Technol. 2015. Vol. 49. Pp 661–679. DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6.
2. Mcdonald D., Tchepel M., Ouellet D., Wild P., Jeffrey D., Provan J. Wood mechanics: from chips to flocs to fibres – part I // J–FOR. 2014. Vol. 4(5). Pp. 23–30.
3. Vikharev S. Research of a fibrous layer at refining in the refiners // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. P. 316.
4. Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. Average fibre length as a measure of the amount of long fibres in mechanical pulps – ranking of pulps may shift // Nord. Pulp Pap. Res. J. 2018. Vol. 33, no. 3. Pp. 468–481. DOI: 10.1515/nppri-2018-3058.
5. Патент 2314381 (РФ). Центробежный размалывающий аппарат / Ю.Д. Алашкевич, В.И. Ковалев, И.А. Воронин, В.Г. Васютин. 20.09.2009.
6. Воронин И.А., Дирацуян А.А., Алашкевич Ю.Д. Расчет технологических параметров процесса размола в размольной установке с инерционными телами // Лесной вестник. 2010. №6. С. 156–159.
7. Алашкевич Ю.Д., Воронин И.А. Размол волокнистых полуфабрикатов с использованием инерционных тел. Целлюлозно-бумажное производство. LAP LAMBERT Academic Publishing., 2012. 136 с.

8. Voronin I.A. Application of the knife machine's operation elements with inertia bodies force to fiber // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 467, issue 1. Pp. 86. DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012003.
9. Smith S. Die rationelle Theorie des Ganzzeughollandar // Otto Ernst Verlag. Teil I. Berlin, 1922.
10. Benthien J., Bähnisch C., Heldner S., Ohlmeyer M. Effect of fiber size distribution on medium-density fiberboard properties caused by varied steaming time and temperature of defibration process // Wood and fiber science. 2014. Vol. 46, no. 2. Pp. 175–185.
11. Ihnát V., Lübke H., Russ A., Borůvka V. Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards. Part I. Preparation and characterization of wood chips in terms of their reuse // Wood research. 2017. Vol. 62, no. 1. Pp. 45–56.
12. Алашкевич Ю.Д., Воронин И.А. Силовой характер воздействия на волокнистый материал рабочих органов ножевой установки с инерционными телами // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: IV международная научно-техническая конференция, посвященная памяти профессора В.И. Комарова. Архангельск, 2017. С. 159–164.
13. Набиева А.А. Оценка влияния и совершенствования технологических параметров ножевых размалывающих машин : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2004. 156 с.
14. Алашкевич Ю.Д., Воронин И.А. Влияние сил трения на волокнистый материал рабочих органов ножевой установки с инерционными телами // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: Всероссийская VI научно-практическая конференция. Барнаул, 2014. С. 383–385.
15. Воронин И.А., Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Удельное давление при размоле волокнистых материалов на размольной установке с использованием инерционных тел // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: Всероссийская VII конференция с международным участием. Барнаул, 2017. С. 366–368.
16. Bordin R., Roux, J.-C., Bloch, J.-F. New technique for measuring clearance in low-consistency refiners // Appita Journal. 2008. Vol. 61. Pp. 71–77.
17. Fernandez F.J., Martinez D.M., Olson J.A. Investigation of low consistency reject refining of mechanical pulp for energy savings // Nord. PulpPap. Res. J. 2018. Vol. 33, no. 1. Pp. 21–27. DOI: 10.1515/npprj-2018-3006.
18. Воронин И.А., Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Влияние силового характера воздействия на волокнистый материал рабочих органов ножевой установки с инерционными телами // Лесной и химический комплекс – проблемы и решения: Всероссийская научно-практическая конференция. Красноярск, 2012. Т. II. С. 39–42.
19. Алашкевич Ю.Д., Воронин И.А., Ковалев В.И., Решетова Н.С. Размол волокнистых полуфабрикатов нетрадиционным способом // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 165–168.
20. Riegler M., Spangl B., Weigl M., Wimmer R., Muller U. Simulation of a real-time process adaptation in the manufacture of high-density fibreboards using multivariate regression analysis and feedforward control // Wood Sci. Technol. 2013. Vol. 47. Pp. 1243–1259.

Поступила в редакцию 2 июля 2020 г.

Принята к публикации 13 ноября 2020 г.

Для цитирования: Воронин И.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А. Механизм размола на ножевом центробежно-размалывающем аппарате // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 485–492. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048164.

Voronin I.A.*, Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A. THE GRINDING MECHANISM ON A KNIFE CENTRIFUGAL GRINDING MACHINE

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Krasnoyarskiy Rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: ivan_voronin@list.ru

The article presents a methodology for calculating the force effect on a fibrous suspension of working bodies in a centrifugal grinding apparatus. The aim of the research is to calculate the force per tooth of an inertial body at different speeds of rotation of the rotor, to determine the effect of the circumferential speed of movement of inertial bodies on the grinding process of fibrous semi-finished products. The article discusses the mechanism of grinding on a centrifugal knife grinding apparatus, determines the tangential shear forces at the contact of the grinding satellite knives with the grinding bowl knives, determines the effect on the fiber of rolling friction forces and sliding friction forces when the grinding satellite knives come into contact with the grinding bowl knives, as well as the effect of specific pressure at the point of contact of the satellite knives with the grinding bowl knives under the influence of inertial forces. Based on the research results, it is scientifically substantiated that the forces arising at the minimum of the considered values of the rotation speed of inertial bodies are sufficient to break the fiber when using this installation for grinding fibrous semi-finished products. An increase in the speed of rotation of the satellites causes a positive change in the physical and mechanical characteristics of the finished castings.

Keywords: Milling, grinding satellite, fiber, specific pressure, inertia force, grinding bowl, friction force.

References

- Zhang D., Zhang A., Xue L. *Wood Sci Technol.*, 2015, vol. 49, pp 661–679. DOI: 10.1007/s00226-015-0728-6.
- Mcdonald D., Tchepel M., Ouellet D., Wild P., Jeffrey D., Provan J. *J-FOR*, 2014, vol. 4(5), pp. 23–30.
- Vikharev S. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, P. 316.
- Ferritsius O., Ferritsius R., Rundlof M. *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 468–481. DOI: 10.1515/npprj-2018-3058.
- Patent 2314381 (RU). 2009. (in Russ.).
- Voronin I.A., Diratsuyan A.A., Alashkevich YU.D. *Lesnoy vestnik*, 2010, no. 6, pp. 156–159. (in Russ.).
- Alashkevich YU.D., Voronin I.A. *Razmol voloknistykh polufabrikatov s ispol'zovaniyem inertsiionnykh tel. Tsellyulozno-bumazhnoye proizvodstvo*. [Grinding of fibrous semi-finished products using inertial bodies. Pulp and paper production]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 136 p. (in Russ.).
- Voronin I.A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 467, issue 1, pp. 86. DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012003.
- Smith S. *Die rationelle Theorie das Ganzeueghollandar*. Otto Ernst Verlag. Teil I. Berlin, 1922. (in German).
- Benthien J., Bähnisch C., Heldner S., Ohlmeyer M. *Wood and fiber science*, 2014, vol. 46, no. 2, pp. 175–185.
- Ihnát V., Lübke H., Russ A., Borůvka V. *Wood research*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 45–56.
- Alashkevich YU.D., Voronin I.A. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: IV mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya pamyati professora V.I. Komarova*. [Problems of the mechanics of pulp and paper materials: IV international scientific and technical conference dedicated to the memory of Professor V.I. Komarov]. Arkhangelsk, 2017, pp. 159–164. (in Russ.).
- Nabiyeva A.A. *Otsenka vliyaniya i sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh parametrov nozhevykh razmalyvayushchikh mashin : dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk*. [Assessment of the influence and improvement of technological parameters of knife grinding machines: dissertation of the candidate of technical sciences]. Krasnoyarsk, 2004. 156 p. (in Russ.).
- Alashkevich YU.D., Voronin I.A. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: Vserossiyskaya VI nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. [New achievements in the chemistry and chemical technology of plant raw materials: All-Russian VI scientific and practical conference]. Barnaul, 2014, pp. 383–385. (in Russ.).
- Voronin I.A., Alashkevich YU.D., Reshetova N.S. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: Vserossiyskaya VII konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem*. [New Achievements in Chemistry and Chemical Technology of Plant Raw Materials: VII All-Russian Conference with International Participation]. Barnaul, 2017, pp. 366–368. (in Russ.).
- Bordin R., Roux, J.-C., Bloch, J.-F. *Appita Journal*, 2008, vol. 61, pp. 71–77.
- Fernandez F.J., Martinez D.M., Olson J.A. *Nord. PulpPap. Res. J.*, 2018, vol. 33, no. 1, pp. 21–27. DOI: 10.1515/npprj-2018-3006.
- Voronin I.A., Alashkevich YU.D., Reshetova N.S. *Lesnoy i khimicheskii kompleks – problemy i resheniya: Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. [Forestry and chemical complex – problems and solutions: All-Russian scientific and practical conference]. Krasnoyarsk, 2012, vol. II, pp. 39–42. (in Russ.).
- Alashkevich YU.D., Voronin I.A., Kovalev V.I., Reshetova N.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 2, pp. 165–168. (in Russ.).
- Riegler M., Spangl B., Weigl M., Wimmer R., Muller U. *Wood Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, pp. 1243–1259.

Received July 2, 2020

Accepted November 13, 2020

For citing: Voronin I.A., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 485–492. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048164.

* Corresponding author.