

## Осевая сила, возникающая при размоле в мельницах

С.Н. Вихарев

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

cbp200558@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7945-8027>

Статья поступила 26.10.2022, принята 14.02.2023

*Предметом исследования автора статьи является осевая сила при размоле волокнистых материалов с учетом неравномерности межножевого зазора между гарнитурами ротора и статора мельницы. Разработана математическая модель для определения осевой силы. Экспериментальные исследования показали адекватность разработанной математической модели. Ошибка между теоретическими и экспериментальными исследованиями не превышает 15 %. Исследованы переменные факторы, влияющие на осевую силу в мельницах. При перекосе и биении гарнитуры мельницы осевая сила и мощность привода уменьшаются. Причем чем больше перекося и биения гарнитуры, тем сильнее уменьшаются осевая сила и мощность привода мельницы. В качестве диагностических признаков перекося и биения гарнитуры можно использовать осевую силу и мощность привода мельницы.*

**Ключевые слова:** осевая сила; ножевые мельницы; размол; давление; зазор.

## Axial force generated during grinding in mills

S.N. Vikharev

Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

cbp200558@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7945-8027>

Received 26.10.2022, accepted 14.02.2023

*The subject of the research is the axial force during the grinding of fibrous materials, taking into account the non-uniformity of the interknife gap between the plate of a rotor and a stator refiner. A mathematical model has been developed to determine the axial force. Experimental studies have shown the adequacy of the developed mathematical model. The error between theoretical and experimental studies does not exceed 15%. Variable factors influencing the axial force in mills have been investigated. When the mill head is skewed and beating, the axial force and drive power are reduced. Moreover, the more distortion and runout of the plate is, the more the axial force and drive power of the mill decrease. The axial force and drive power of the mill can be used as diagnostic signs of skew and runout of the plate.*

**Keywords:** axial force; bar refiners; mill; pressure; gap.

1. **Введение.** В настоящее время размол щепы и волокнистых материалов, как правило, производится в ножевых размалывающих машинах. При эксплуатации этих машин возникают осевые силы, которые достигают сотен килоньютон [1–9]. Многие авторы исследовали осевые силы в мельницах [1; 2; 5], однако при этом не учитывалась неравномерность межножевого зазора между гарнитурами ротора и статора. Под неравномерностью межножевого зазора между гарнитурами ротора и статора мельницы понимаем перекося гарнитуры статора и торцевое биение гарнитуры ротора [10].

Ранее выполненные исследования показали, что осевая сила  $P$  состоит из постоянной  $P_1$  и переменной  $P_2$  составляющих. Причем эти составляющие зависят от конструкции мельницы и факторов процесса размо-

ла [5; 11]. При увеличении зазора между ротором и статором мельницы эти составляющие осевой силы снижаются. Причем снижение составляющих силы происходит почти линейно, т. е. пропорционально межножевому зазору [11].

*Цель статьи* — исследование осевой силы и мощности привода при размоле волокнистых материалов с учетом неравномерности межножевого зазора между гарнитурами ротора и статора мельницы. Задачи статьи заключаются в теоретическом и экспериментальном исследовании влияния перекося и биения гарнитуры на осевую силу и мощность привода мельницы.

**Теоретические исследования.** Модель мельницы представлена на рис. 1. Осевую силу, возникающую при размоле волокнистых материалов, можно записать как:

$$P = P_1 + P_2 = (a_1 S_n - a_2) + \sum_{i=1}^n (c_i S - b_i) \cos \omega_{gi} t,$$

где  $a_1, a_2$  — коэффициенты, зависящие от факторов процесса размола;  $S$  — межножевой зазор между гарнитурами;  $n$  — число гармоник гарнитурных частот;  $b_i, c_i$  —  $i$ -й коэффициент процесса размола;  $\omega_{gi}$  —  $i$ -я гармоника гарнитурной частоты.

Давление в межножевом зазоре мельницы может быть равномерным и неравномерным (рис. 2). Неравномерное давление возникает при неравномерности зазора, вызванной перекосом и биением гарнитуры. Суммарная осевая сила  $P$  при этом прикладывается с эксцентриситетом. Давление в межножевом зазоре определяется характеристиками размалываемого материала, типоразмером мельницы и зазором между ротором и статором [12–14].

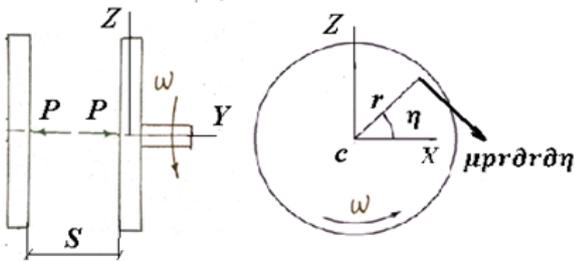


Рис. 1. Модель мельницы

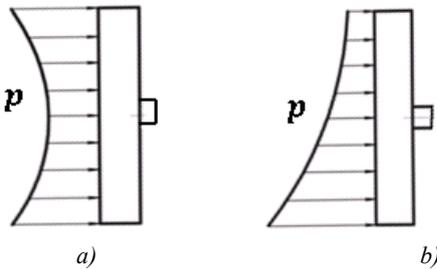


Рис. 2. Давление в межножевом зазоре: а — равномерное; б — неравномерное

Функции распределения давления между ротором и статором можно выразить как:

$m_1(r, \eta), m_2(r, \eta), m_{3i}(r, \eta), m_{4i}(r, \eta)$ . Тогда при равномерном распределении давления в межножевом зазоре можно записать:

$$p = (m_1(r, \eta) - m_2(r, \eta)S) + (\sum_{i=1}^n m_{3i}(r, \eta) \cos \omega_{gi} t).$$

При неравномерном распределении давления:

$$p = (m_1(r, \eta) - m_2(r, \eta)S_n) + (\sum_{i=1}^n (m_{3i}(r, \eta) - m_{4i}(r, \eta)S_n) \cos \omega_{gi} t),$$

$$S_n = S + r(\cos \alpha \sin \gamma \cos \eta - \sin \alpha \sin \eta),$$

где  $\alpha, \gamma$  — углы перекоса и биения гарнитуры мельницы.

Момент сопротивления вращению ротора мельницы при моделировании трения между ротором и статором моделью Кулона можно определить как:

$$M_r = -\mu \int_0^{2\pi} \int_{\partial\eta, r_1}^{r_2} \left[ m_1(r, \eta) + m_2(r, \eta)S_n - \sum_{i=1}^n (\delta_{3i}(r, \eta) - \delta_{4i}(r, \eta)S_n) \cos \omega_{gi} t \right] r^2 \partial r,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения между ротором и статором мельницы.

Мощность электродвигателя мельницы можно записать как:

$$N = \frac{M_r \omega}{\vartheta},$$

где  $\vartheta$  — коэффициент полезного действия привода.

**Результаты и дискуссия.** Проведены экспериментальные исследования осевых сил, мощности привода на лабораторной установке и на промышленных мельницах по методике [12; 13; 15 и др.]. Влияние переменных факторов размола на осевую силу при равномерном зазоре между ротором и статором можно оценить при помощи уравнения регрессии:

$$P = 32,9 + 7,2X_1 - 22,7X_2 + 3,8X_3 - 1,2X_4,$$

где  $X_1$  — удельная нагрузка на кромки нолей;  $X_2, X_3, X_4$  — степень помола, концентрация и расход волокнистого материала. Уровень значимости коэффициентов уравнения регрессии 0,05.

Характеристики волокнистого материала на входе в гарнитуру оказывают наибольшее влияние на осевую силу в мельнице. С увеличением степени помола и с уменьшением длины волокна волокнистого материала осевая сила уменьшается. Удельная нагрузка на кромки ножей — это второй по значимости фактор. Осевая сила возрастает при увеличении нагрузки на кромки ножей. Концентрация волокнистого материала — третий по значимости фактор. При возрастании концентрации осевая сила в мельнице увеличивается. В наименьшей степени осевая сила зависит от расхода волокнистого материала. При возрастании этого фактора осевая сила в мельнице уменьшается.

Исследование изменения осевой силы мельницы от биения и от перекоса гарнитуры представлено на рис. 3 и 4. Ошибка между теоретическими и экспериментальными исследованиями не превышает 15%. Такая ошибка, по моему мнению, вызвана погрешностью моделирования волокнистых материалов.

Исследование зависимости мощности привода мельницы от биения и от перекоса гарнитуры представлено на рис. 5.

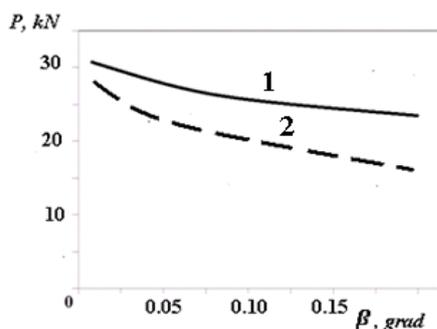


Рис. 3. Зависимость осевой силы мельницы от биения гарнитуры ротора: 1 — эксперимент; 2 — теория

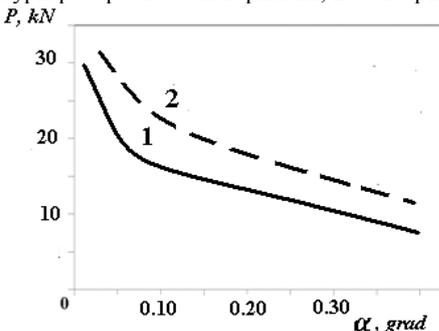


Рис. 4. Зависимость осевой силы мельницы от перекоса гарнитуры статора: 1 — эксперимент; 2 — теория

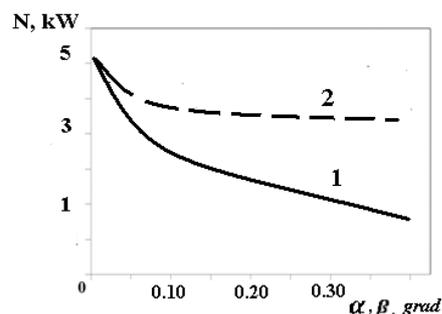


Рис. 5. Зависимость мощности привода мельницы от перекоса гарнитуры статора (1) и биения гарнитуры ротора (2)

Проведенные исследования показали, что при перекосе и биении гарнитуры осевая сила в мельнице уменьшается. Причем чем больше перекося и биение гарнитуры, тем значительно уменьшается осевая сила.

#### Литература

1. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых мельницах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1990. 31 с.
2. Легоцкий С.С., Гончаров В.Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М.: Лесная промышленность, 1990. 224 с.
3. Иванов С.Н. Технология бумаги. М.: Лесная промышленность, 2006. 696 с.
4. Бывшев А.В., Савицкий Е.Е. Механическое диспергирование волокнистых материалов. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1991. 216 с.
5. 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.

Это справедливо при межножевом зазоре менее 1–2 мм, т.е. когда ножи гарнитуры производят преимущественно силовое воздействие на волокнистый материал. В исследованиях, результаты которых приведены выше, это происходит при перекосе гарнитуры статора с углами  $\alpha$  до  $0,4^\circ$  и биения гарнитуры ротора с углами  $\beta$  до  $0,25^\circ$ . При дальнейшем увеличении углов  $\alpha$  и  $\beta$  увеличение осевой силы  $P$  практически не происходит. Методы и средства вибрационной диагностики перекоса и биения гарнитуры разработаны автором в публикации [15].

Мощность привода мельницы, по сути, пропорциональна осевой силе и так же зависит от величины перекоса и биения гарнитуры. При минимальных величинах углов  $\alpha$  и  $\beta$ , т.е. когда гарнитура прицекована, мощность привода максимальна. Поэтому в качестве диагностических признаков для определения углов перекоса и биения гарнитуры можно использовать осевую силу и мощность привода мельницы.

**2. Заключение.** Исследована осевая сила в мельницах с учетом неравномерности межножевого зазора между гарнитурами ротора и статора мельницы. Разработана математическая модель для определения осевой силы с учетом перекоса и биения гарнитуры мельницы. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанной математической модели. Ошибка между теоретическими и экспериментальными исследованиями не превышает 15 %.

Исследованы следующие переменные факторы, влияющие на осевую силу в мельницах (перечислены в порядке значимости): характеристики волокнистого материала; удельная нагрузка на кромки ножей; концентрация волокнистого материала; расход волокнистого материала.

При перекосе и биении гарнитуры мельницы осевая сила и мощность привода уменьшаются, причем чем больше перекося и биение гарнитуры, тем сильнее уменьшаются осевая сила и мощность привода мельницы. В качестве диагностических признаков перекоса и биения гарнитуры можно использовать осевую силу и мощность привода мельницы.

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. Vikharev S.N. Vibration diagnostics of plates of knife refiners // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Infor-

mation Technologies and Engineering - APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University, 2019. P. 44008.

11. Вихарев С.Н. Осевые силы, возникающие при размоле в дисковой мельнице // Лесной журнал. 2013. № 6. С. 107-114.
12. Вихарев С.Н., Душина С.А. Модель волокнистой прослойки при размоле в дисковых мельницах // Лесной журнал. 2014. № 2. С. 116-122.
13. 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.
14. 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.
15. Вихарев С.Н. Вибрационная диагностика гарнитуры ножевых размалывающих машин // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 20-24.
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. Vibration diagnostics of plates of knife refiners // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University, 2019. P. 44008.
11. Viharev S.N. The axial forces arising at mill in a disk refiners // Forest Journal. 2013. № 6. P. 107-114.
12. Viharev S.N., Dushinina S.A. Model of a fibrous layer at mill in disk refiner // Forest Journal. 2014. № 2. P. 116-122.
13. Viharev S.N. Experimental research of processes mill by means of vibration on set stator // Mashiny i apparaty CBP: mezhvuz. sb. nauch. tr. L., 1990. P. 29-33.
14. 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.
15. Viharev S.N. Vibrating diagnostics plate bar refiners // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 3 (51). P. 20-24.

#### *References*

1. 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.
2. Legockij S.S., Goncharov V.N. Potters the equipment and preparation of paper weight. M.: Lesnaya prom-st', 1990. 224 p.
3. Ivanov S.N. Technology of a paper. M.: Lesnaya prom-st', 2006. 696 p.
4. Byvshev A.V., Savickij E.E. Mechanical of fibrous materials. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. un-ta, 1991. 216 p.
5. 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.