

## Контактное взаимодействие ножей гарнитуры при размоле волокнистых полуфабрикатов с учетом распространения упругих волн

С.Н. Вихарев<sup>a</sup>, В.П. Сиваков<sup>b</sup>, А.В. Вураско<sup>c</sup>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия  
<sup>a, b, c</sup> cbp200558@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7945-8027>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>  
 Статья поступила 20.08.2024, принята 16.09.2024

*Размол волокнистых полуфабрикатов, как правило, происходит в ножевых размалывающих мельницах. Процесс размола в мельницах возбуждает ударные процессы, которые в виде волн передаются на волокнистый материал и элементы конструкции мельницы. В статье сформулирована постановка задачи динамического воздействия ножей гарнитуры при размоле волокнистых полуфабрикатов в рамках волновой теории удара. Исследованы подходы к математическому моделированию волновых процессов при размоле волокнистых материалов в мельницах. Рассмотрены методы исследования динамического контактного взаимодействия ротора и статора применительно к размолу полуфабрикатов. Сделан вывод о том, что для решения поставленной волновой задачи можно использовать «лучевой метод». Этот метод основан на различии расстояния от области контакта ножей и зарождения волновых процессов. Предложенный метод позволяет учесть широкий спектр свойств в области контакта, начальных и граничных условий. Метод также позволяет учесть факторы процесса размола, начальные и граничные условия. Это позволит исследовать процесс размола в ножевых мельницах и разработать рекомендации по повышению эффективности этого процесса. Большая часть энергии мельницы расходуется на преодоление трения при вращении ротора. На основе теории контактного взаимодействия ножей исследован коэффициент трения между ротором и статором при размоле волокнистых материалов. Коэффициент трения зависит от вида трения ножей гарнитуры, вида и концентрации полуфабриката, давления между ротором и статором мельницы, модуля упругости материала гарнитуры, площади контакта ножей гарнитуры и скорости перемещения ножей ротора по ножам статора. Для уменьшения потребления энергии рекомендуется при размоле полуфабрикатов низкой концентрации снижать скорость вращения ротора, а при размоле щепы и полуфабрикатов высокой концентрации — увеличивать эту скорость. Рекомендуется для уменьшения энергоёмкости ножевых размалывающих машин использовать материал с низким модулем упругости. Разработанные методики расчета и полученные рекомендации позволят повысить эффективность ножевых размалывающих машин.*

**Ключевые слова:** нож; удар; волокнистые материалы; волны; размол.

## Contact interaction of headset knives when grinding fibrous semi-finished products in view of distribution of elastic waves

S.N. Vikharev<sup>a</sup>, V.P. Sivakov<sup>b</sup>, A.V. Vurasko<sup>c</sup>

Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia  
<sup>a, b, c</sup> cbp200558@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7945-8027>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>  
 Received 20.08.2024, accepted 16.09.2024

*The grinding of fibrous semi-finished products usually occurs in knife grinding mills. The grinding process in mills excites shock processes, which are transmitted as waves to the fibrous material and structural elements of the mill. The article formulates the problem of the dynamic effect of headset knives when grinding fibrous semi-finished products within the framework of the wave theory of impact. Approaches to the mathematical modeling of wave processes during the grinding of fibrous materials in mills are investigated. The methods of studying the dynamic contact interaction of the rotor and stator in relation to the grinding of semi-finished products are considered. It is concluded that the "beam method" can be used to solve the wave problem. This method is based on the difference between the distance from the knife contact area and the origin of wave processes. The proposed method allows one to take into account a wide range of properties in the contact area, initial and boundary conditions. The method also makes it possible to take into account the factors of the grinding process, initial and boundary conditions. This allows one to investigate the grinding process in knife mills and develop recommendations for improving the efficiency of this process. Most of the energy of the mills is spent on overcoming friction during rotation of the rotor. Based on the theory of contact interaction of knives, the coefficient of friction between the rotor and the stator during grinding of fibrous materials are studied. The coefficient of friction depends on the type of friction of the headset knives, the type and concentration of the semi-finished product, the pressure between the rotor and the mill stator, the modulus of elasticity of the headset material, the contact area of the headset knives and the speed of movement of the rotor knives along the stator knives. To reduce energy consumption, it is recommended to reduce the speed of rotation of the rotor when grinding semi-finished products of*

low concentration, and to increase this speed when grinding chips and semi-finished products of high concentration. It is advised to use a material with a low modulus of elasticity to reduce the energy consumption of knife grinding machines. The developed calculation methods and the recommendations obtained will improve the efficiency of knife grinding machines.

**Keywords:** bars; impact; fibrous materials; waves, refiners.

**Ведение.** В настоящее время размол волокнистых материалов, как правило, происходит в ножевых мельницах. Существуют две основные теории размола.

Первая из них — гидродинамическая теория воздействия потоков на древесные волокна между ножами гарнитуры. Автором теории является Ю.Д. Алашкевич [1]. Теория «работает» при зазорах между ротором и статором, превышающих толщину волокнистого материала между ножами. Компьютерное моделирование потоков волокнистого материала в канавках ножей ротора и статора выполнено в работе [2].

Вторая теория касается силового взаимодействия гарнитуры на древесные волокна между ножами ротора и статора. Автор теории — В.Н. Гончаров [3]. Эта теория «работает» при зазорах между ротором и статором меньше толщины волокнистого материала между ножами.

Сделана попытка разработки теории контактного действия гарнитуры на волокнистый полуфабрикат [4], в основу которой положена фундаментальная теория контакта двух тел. Разработанная теория объясняет волновой характер износа гарнитуры, тепловыделение и изменение коэффициента трения в зоне размола [4; 5]. Однако эта теория не учитывает возникающие упругие волны при контакте ножей ротора и статора.

*Цель статьи* — исследование контактного взаимодействия ножей ротора и статора при размоле полуфабрикатов с учетом распространения упругих волн.

**Методы исследования.** Контактное взаимодействие гарнитуры вызывает размол волокнистых полуфабрикатов. Это взаимодействие также возбуждает ударные процессы, которые в виде упругих волн передаются на полуфабрикат и узлы мельницы. Эти процессы можно рассматривать как диагностический признак правильности функционирования мельницы и дефектов гарнитуры [6]. Вибрация элементов конструкции мельницы происходит с различными амплитудами и частотами, которые зависят от факторов процесса размола и конструкции ножевой размалывающей машины. Анализируя параметры вибрации, можно выделить диагностическую информацию о процессе размола и техническом состоянии узлов мельницы, в том числе гарнитуры.

Ударные силы  $F(t)$  описываются выражением [7]:

$$F(t) = 2mV/t, \quad (1)$$

где  $m$  — приведенная масса двух взаимодействующих тел;  $V$  — относительная скорость одного тела относительно другого в момент удара;  $t$  — продолжительность удара.

Уравнение (1) характеризует ударные процессы при размоле полуфабриката в ножевой гарнитуре. Скорость скольжения ножей и продолжительность удара зависят

от габаритов гарнитуры, рисунка ее ножей и частоты вращения ротора [6].

Другой причиной возникновения ударных процессов являются зазоры в узлах мельницы. Зазоры приводят к биению и непараллельности ротора и статора ножевой гарнитуры мельницы [6]. При этом импульс силы удара можно рассчитать как [7]:

$$Q = a\sqrt{2mFS}, \quad (2)$$

где  $a$  — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции машины;  $S$  — зазор в элементах конструкции мельницы.

Впервые волновые процессы при контакте двух тел исследовал Сен-Венан [8]. Сен-Венан исследовал только упругие волны и не учитывал процессы, происходящие при контакте двух тел. С.П. Тимошенко исследовал удар двух тел с учетом контактного взаимодействия и образования упругих волн [9]. С.П. Тимошенко разработал волновую теорию, которая объединила колебательные процессы, возникающие при соударении двух тел, с контактной теорией Герца.

В настоящее время разработано множество методов и алгоритмов решения волновых задач. Но для исследования волновых процессов, возникающих при размоле волокнистых полуфабрикатов в ножевых мельницах, методик и алгоритмов нет. Для разработки такой методики разберемся с методами решения волновых задач. Исследуем классификацию существующих методов, в качестве критерия используем параметры контактной и волновой задач. При деформации тел выделяют два типа процессов, стационарные и нестационарные.

Стационарные процессы, вызывающие волновые перемещения точек среды, можно разбить на гармонические и собственные колебания [10], на автомодельные колебания, перемещения и волны [11]. Для того, чтобы исследовать волновые процессы, необходимо разработать динамическую и математическую модели и вывести уравнения, которые адекватно описывают перемещение точек исследуемого объекта [12].

Для исследования динамических контактных процессов с учетом распространения волн при размоле волокнистых материалов могут быть использованы следующие модели: упругая [10], вязкоупругая [13], упругопластичная [14] и воздействие внешнего волнового процесса [12].

Применение упругой модели оправдано только при скоростях скольжения двух тел относительно друг друга до 5 м/с. Скорость перемещения ножей ротора относительно ножей статора в производственных мельницах может быть сопоставима со скоростью звука в металле [15]. Эта скорость зависит от наружного радиуса и дизайна размалывающих элементов гарнитуры и оборотной частоты ротора.

В ножевых мельницах существует два вида трения между гарнитурами — жидкостное и граничное. Вид трения зависит от факторов процесса размола и технического состояния системы «ротор – статор» мельницы. Волокнистый полуфабрикат в межножевом зазоре моделируется при жидкостном трении моделью вязкоупругого тела Максвелла – Томпсона [4] при граничном трении упругим телом Гука.

Нормальные перемещения  $w(x, z)$  описываются математической моделью контактного взаимодействия ротора и статора при жидкостном трении, связаны с контактным давлением  $p(x, z)$  выражением [16]:

$$w(x', z', t) + T_\varepsilon \frac{dw(x', z', t)}{dt} = \frac{(1 - \mu^2)h}{E_e} \left( p(x', z', t) + T_\sigma \frac{dp(x', z', t)}{dt} \right),$$

где  $T_\varepsilon, T_\sigma, \mu$  — соответственно время релаксации, время последствия и коэффициент Пуассона размалываемого полуфабриката.

Дифференциальные уравнения, описывающие волновые явления при размоле полуфабрикатов, получены из условия равновесия геометрической фигуры — параллелепипеда. Внутри этой фигуры находится площадка контакта ножей, стороны параллелепипеда обозначены как  $dx, dy, dz$ . Уравнения равновесия параллелепипеда получены относительно декартовых осей координат.

Уравнения, описывающие волновые процессы при размоле волокнистых полуфабрикатов, можно представить в виде:

$$\begin{aligned} (\vartheta + G) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + G \nabla^2 u &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\vartheta + G) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + G \nabla^2 v &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\vartheta + G) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + G \nabla^2 w &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  — оператор Лапласа;

$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$  — оператор объемной деформации;

$\vartheta = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ;  $E$  — модуль Юнга;  $G$  — модуль

сдвига;  $\nu$  — коэффициент поперечной деформации;

$u, v, w$  — перемещения точек вдоль осей  $x, y, z$ ;  $\rho$  — плотность среды, по которой перемещаются волны.

Свойства области контакта могут изменяться в широком диапазоне, величина которого определяется параметрами контакта гарнитуры ротора и статора и свойствами размалываемого полуфабриката. От контакта размалывающих элементов гарнитуры зарождаются упругие волны (рис. 1), которые действуют на полуфабрикат и элементы конструкции мельницы.

Для решения поставленной волновой задачи можно использовать «лучевой метод», разработанный в работе [16]. При этом методе исследования фронт распространения упругих волн моделируется как цилиндрическая поверхность с центром в области контакта ножей ротора и статора (рис. 1). Скорость распространения волн в материале обозначим  $V^{(\omega)}$ .

Причем  $\alpha = 1$  принимается для продольной волны и  $\alpha = 2$  — для поперечной волны [16].

Рассмотрим линейные и угловые перемещения среды как некоторую функцию  $Z(x_\alpha, y_\alpha, t)$ . Эту функцию можно расписать по времени и по пространственным координатам. Функцию  $Z$  можно определить как:

$$Z(s, y, t) = \sum_{k=0}^{\infty} (1/k!) (Z_{(k)})_{t=\frac{s}{V}} \left(t - \frac{s}{V}\right)^k H\left(t - \frac{s}{V}\right), \quad (4)$$

где  $Z_{(k)} = \partial^k Z / \partial t^k$  — производная функции  $Z$  по времени  $k$ -го порядка на исследуемом фронте распространения волны;  $H\left(t - \frac{s}{V}\right)$  — единичная функция Хейвисайда;  $s$  — длина дуги на фронте распространения волны;  $t$  — время контакта ножей.

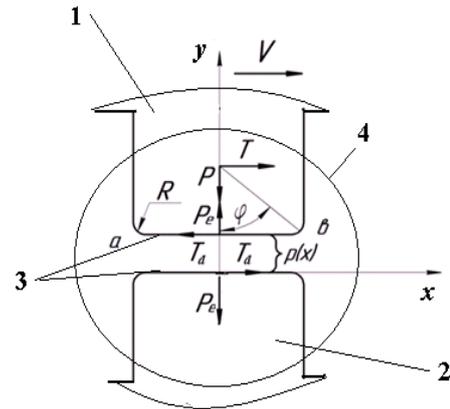


Рис. 1. Схема контакта ножей с учетом распространения упругих волн при размоле полуфабрикатов: 1 — нож ротора; 2 — нож статора; 3 — область контакта; 4 — фронт распространения волны

Если решение уравнения (4) не имеет разрыва, то оно может быть представлено в контактной области как:

$$Z(y_\alpha, t) = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{k=0}^{\infty} (1/k!) (Z_{(k)})_{t=0} t^k. \quad (5)$$

Контактное давление при размоле волокнистых материалов было исследовано в работах [4; 15]. Вектор смещений  $u_i$ , тензор напряжений  $\sigma_{ij}$  могут быть выражены как функции подвижной системы координат  $(x, y, z)$ . Подвижная система координат связана с перемещением ножей ротора следующим образом  $(x = x' - Vt, y = y', z = z')$ . Тензоры деформаций и напряжений в движущейся и неподвижной системах координат могут быть представлены как [17]:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{ij} + T_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon'_{ij}}{\partial t} &= \varepsilon_{ij} - T_\varepsilon V \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x} = \varepsilon^*_{ij}, \\ \sigma'_{ij} + T_\sigma \frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial t} &= \sigma_{ij} - T_\sigma V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x} = \sigma^*_{ij}, \\ u_i - T_\varepsilon V \frac{\partial u_i}{\partial x} &= u^*_i, \\ p(x) - T_\sigma V \frac{\partial p(x)}{\partial x} &= p^*(x). \end{aligned} \quad (6)$$

Зоны контакта ножей гарнитуры показаны на рис. 2. Контактное давление в  $j$ -й полосе контакта:

$$\hat{p}_j(\hat{x}, \hat{z}_j) = \frac{\zeta}{a_H} \int_{-a_j}^{x'} e^{\frac{(\hat{x}-\xi)\zeta}{a_H}} \left( \xi^2 - \frac{2c\hat{a}_H \xi}{\zeta} - 2\hat{\delta} + \hat{z}_j^2 \right) d\xi, \quad (7)$$

где  $\hat{x} = \frac{x}{a+b}$ ,  $\hat{z} = \frac{z}{a+b}$ ,  $\hat{w} = \frac{w}{a+b}$ ,  $\hat{\delta} = \frac{\delta}{a+b}$ ,  $\hat{l} = \frac{l}{a+b}$ ,

$$\hat{p}_j = \frac{2p_j}{a+b} \cdot \frac{h}{E^*}, \zeta = \frac{2a_n}{T_\sigma V}, \hat{a}_n = \frac{2a_n}{a+b}, a_n = \sqrt[3]{\frac{3P(a+b)}{4E^*}}$$

(a+b),  $l$  — соответственно ширина и шаг размалывающих элементов гарнитуры (ножей);  $T, P$  — составляющие силы контакта;  $w$  — нормальные перемещения полуфабриката;  $\delta$  — величина внедрения ножей в полуфабрикат.

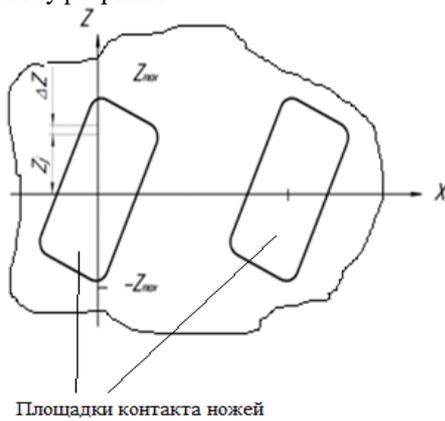


Рис. 2. Площадки контакта ножей ротора и статора

На рис. 1 показаны силы при контактном взаимодействии ножей.  $T_d, P_e$  — составляющие силы контакта. Можно записать:

$$\hat{P}_e = 2 \sum_{j=1}^N \Delta z \int_{-a_j}^{b_j} \hat{p}_j(\hat{x}, \hat{z}_j) \cos \varphi(\hat{x}) d\hat{x}$$

$$\hat{T}_d = 2 \sum_{j=1}^N \Delta z \int_{-a_j}^{b_j} \hat{p}_j(\hat{x}, \hat{z}_j) \sin \varphi(\hat{x}) d\hat{x} \quad (8)$$

Момент сопротивления движению ножа ротора  $\hat{M}$ :

$$\hat{M} = \iint_{\Omega} \hat{x} \hat{p}(\hat{x}, \hat{z}) d\hat{x} d\hat{z}.$$

Коэффициент трения между ротором и статором при размоле можно записать как:

$$\mu = \hat{T}_d / \hat{P}_e.$$

**Результаты и дискуссия.** Поставлена задача разработки методов математического моделирования контакта гарнитуры и образования волн при размоле древесных волокон. Волокнистые полуфабрикаты при размоле моделируются вязкоупругой моделью Максвелла – Томпсона [3]. В статье рассматривается новый подход к постановке задачи динамического воздействия размалывающих элементов в рамках теории контактного взаимодействия ножей и волновой теории удара. Такой подход к постановке задачи основан на разработанных ранее теориях контактного взаимодействия ножей; гидродинамической теории размола; теории силового действия на полуфабрикат.

Для решения поставленной задачи рекомендуется применить «лучевой» метод решения задачи, который можно использовать для нахождения параметров в области удара и на расстоянии от удара (области

взаимодействия ножей ротора и статора, где волновые поверхности возникают и распространяются по конструкции мельницы и волокнистому полуфабрикату).

Для решения волновой задачи вблизи зоны взаимодействия ножей рекомендуется применить разложение искомых параметров по времени в степенной ряд и по координате. Координата в пространстве совпадает с направлением действия упругих волн.

Для исследования динамики фронта волны рекомендуется применить полиномы Лежандра. Применение этих полиномов к решению волновой задачи позволит исследовать процессы, возникающие при контакте ротора и статора.

Планируется разработать численный метод определения деформаций и напряжения в области контакта и при распространении упругих волн в волокнистом материале и выявить их вклад в необратимую деформацию волокна, т. е. в разمول полуфабриката. Численный метод основывается на совместном решении волновых и контактных уравнений, описывающих процесс размола.

Сила трения между гарнитурой ротора и статора при размоле полуфабрикатов складывается из адгезионной и деформационной составляющих [18]. Деформационная составляющая соответствует силе сопротивления деформации полуфабриката. Адгезионная составляющая соответствует силе адгезионного разрыва ножей гарнитуры при размоле.

Графики зависимости коэффициента трения между гарнитурами от скорости ротора мельницы показаны на рис. 3, а. Исследуя полученные графики, можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент трения при обработке полуфабрикатов концентрацией до 6 % увеличивается с 0,12 до 0,19 при изменении скорости ротора мельницы от 10 до 180 м/с.
2. При обработке щепы и древесной массы концентрацией более 6 % коэффициент трения уменьшается с 0,63–0,70 до 0,45–0,55 при изменении скорости ротора мельницы от 10 до 180 м/с.
3. При большой площади контакта гарнитуры коэффициент трения уменьшается, при низкой площади контакта — увеличивается [19].

Для уменьшения энергопотребления в ножевых мельницах рекомендуется при обработке полуфабрикатов концентрацией до 6 % снижать скорость вращения ротора. И наоборот при обработке полуфабрикатах концентрацией более 6 % и щепы рекомендуется повышать скорость ротора мельницы.

На рис. 3, б показаны графики зависимости коэффициента трения от модуля упругости материала ножей. Исследуя эти графики, можно сделать вывод, что с понижением модуля упругости материала ножей гарнитуры с  $2,2 \cdot 10^5$  до  $1,2 \cdot 10^3$  МПа коэффициент трения уменьшается в 1,6–1,7 раза. Поэтому для уменьшения потребления энергии при размоле следует применять материал гарнитуры с малым модулем

упругости. Рекомендуется использовать износостойкие полимерные материалы.

На рис. 4 показаны экспериментальные (1, 3) и теоретические (2) графики ножевой мельницы при обработке еловой щепы концентрацией 40 %.

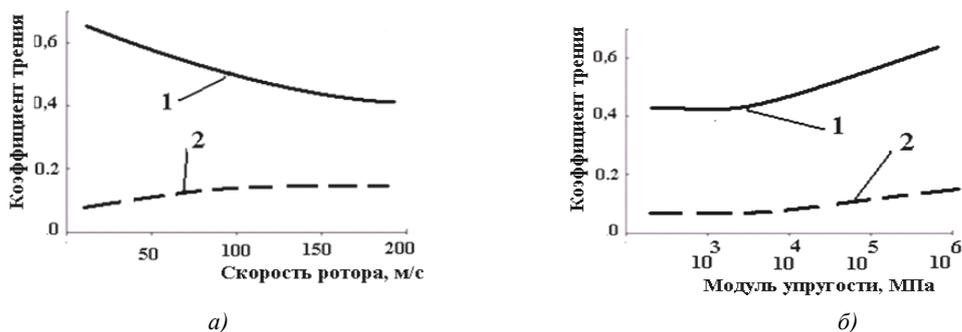


Рис. 3. Изменение коэффициента трения между гарнитурами в зависимости от линейной скорости ротора (а) и модуля упругости материала ножей (б): 1 — полуфабрикаты концентрацией выше 6 %; 2 — полуфабрикаты концентрацией до 6 %

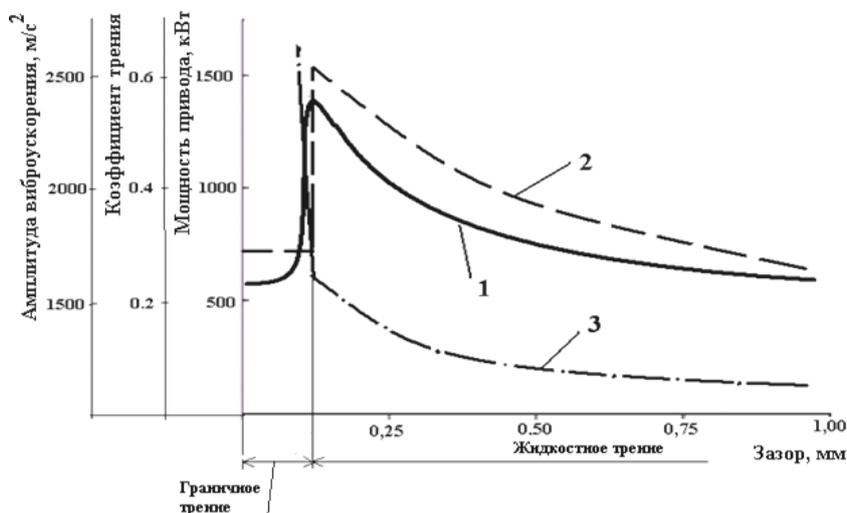


Рис. 4. Параметры мельницы при изменении зазора между гарнитурами: 1 — мощность, потребляемая двигателем мельницы; 2 — коэффициент трения между ротором и статором; 3 — среднееквадратическое значение виброускорения гарнитуры статора

На графиках, представленных на рис. 4, показано граничное и жидкостное трение ножей гарнитуры. Вид трения определяется межножевым зазором мельницы. Реологическая и математическая модели, описывающие свойства полуфабриката при граничном и жидкостном трении, показаны в работе [15]. Износ ножей при граничном трении увеличивается [20]. Эксплуатация ножевых размалывающих машин при граничном трении гарнитуры не рекомендуется из-за снижения надежности гарнитуры.

При изменении вида трения от жидкостного к граничному уменьшаются мощность привода и коэффициент трения, но при этом резко, в 3–5 раз, увеличивается амплитуда высокочастотной вибрации гарнитуры. По параметрам высокочастотной вибрации гарнитуры и мощности привода происходит управление мельницей в современных системах управления технологическим процессом размала [6].

Большая часть мощности привода мельницы затрачивается на преодоление трения и выделение тепла [1; 3; 16 и др.]. Поэтому для уменьшения

потребляемой энергии рекомендуются эксплуатация мельниц с минимальным коэффициентом трения в зоне размала.

**Заключение.** Контакт ножей гарнитуры мельницы можно представить как ударный процесс. Параметры этого процесса определяются факторами, влияющими на эксплуатацию мельницы. В статье представлены методы решения задач контактного взаимодействия гарнитуры с учетом волновых процессов применительно к размалу волокнистых материалов.

Исследованы подходы к математическому моделированию волновых процессов при размале полуфабрикатов в мельницах. Сделан вывод о том, что для решения поставленной волновой задачи рекомендуется использовать «лучевой метод». Этот метод основан на различии расстояния от области контакта ножей и зарождения волновых процессов.

Предложенный метод позволяет учесть широкий спектр свойств в области контакта, начальных и граничных условий. Это позволит исследовать процесс размала в ножевых мельницах и разработать

рекомендации по повышению эффективности этого процесса.

Большая часть мощности привода мельницы затрачивается на преодоление трения и выделение тепла. На основе теории контакта исследовано трение в зоне размола мельницы. Коэффициент трения зависит от множества факторов, в том числе:

- вида трения между ножами гарнитуры;
- вида и концентрации полуфабриката;
- давления на волокнистую прослойку;
- модуля упругости материала гарнитуры;
- площади и рисунка контакта ножей гарнитуры ротора и статора;

#### Литература

1. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1986. 36 с.
2. Вихарев С.Н. Исследование потоков волокнистой массы в гарнитуре ротора мельницы // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 3 (86). С. 106-115.
3. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых мельницах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1990. 31 с.
4. Вихарев С.Н. Контактное взаимодействие гарнитуры мельниц с волокнистым полуфабрикатом // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2013. № 3. С. 133-138.
5. Вихарев С.Н., Григорьева Т.А. Исследование размола волокнистых материалов при помощи теории контактного взаимодействия ножей // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 1 (57). С. 74-79.
6. Вихарев С.Н. Вибрационная диагностика гарнитуры ножевых размалывающих машин // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3 (51). С. 20-24.
7. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. М.: Машиностроение, 1983. 221 с.
8. St.-Venant B.D. Courbes representatives des lois du choc longitudinal et du choc transversal d'une barre prismatique // Journal ecolepolytechnique. 1889. № 59. P. 97-103.
9. Timoshenko S.P. Zur fragenach der wirkungeinesstrosseanfeinerbalken // Zeitschrift fur mathematische Physik. 1914. № 62. P. 198-209.
10. Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами. М.: Физматлит, 2001. 305 с.
11. Вибрации в технике: справ. В 6-ти т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.
12. Вибрации в технике: справ. В 6-ти т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.
13. Левицкий А.И. Колебания в механизмах. М.: Наука, 2001. 184 с.
14. Фролов К.В. Динамические свойства линейных виброзащитных систем. М.: Наука, 1982. 288 с.
15. Vikharev S.N. Vibroacoustic processes of grinding fibrous semi-finished products in the knife refiners. IOP Conference. Ser. Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020. P. 12046.
16. Rossihin J.A. Impact of a sphere about elastic buffer established on plate of overlapping. News of high schools // Construction. 2004. № 11. P. 16-22.
17. Горячева И.Г. Контактная задача качения вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материала // Прикладная математика и механика. 1973. Т. 37, вып. 5. С. 877-885.
18. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 509 с.
19. Vikharev S.N. Research mill fibrous semi-finished products with the help theories of contact interaction of knives // Forestry 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 226. P. 012048.

– скорости перемещения ножей ротора по ножам статора.

Для уменьшения потребления энергии рекомендуется:

- при обработке полуфабрикатов концентрацией до 6 % снижать скорость вращения ротора;
- при обработке щепы и полуфабрикатов концентрацией более 6 % увеличивать скорость вращения ротора;
- использовать материал ножей гарнитуры с низким модулем упругости.

Разработанные методики расчета и полученные рекомендации позволят повысить эффективность ножевых размалывающих машин.

20. Демин П.П., Пашинский В.Ф., Киселев С.С. Стойкость гарнитуры дисковых мельниц. М.: ВНИПИЭлеспром, 1972. 36 с.

#### References

1. 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.
2. Viharev S.N. Research of streams of fibrous weight in set of rotor of refiner // The Woods of Russia and economy in them. 2023. № 3 (86). P. 106-115.
3. 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.
4. Viharev S.N. Contact interaction sets of mills with a fibrous semifinished item // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2013. № 3. P. 133-138.
5. Viharev S.N., Grigor'eva T.A. Research refiningfibrous materials by means of the theory of contact interaction of knives // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 1 (57). P. 74-79.
6. Viharev S.N. Vibrating diagnostics platesknife grinding machines // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 3 (51). P. 20-24.
7. Pavlov B.V. Acoustic diagnostics of mechanisms. M.: Mashinostroenie, 1983. 221 p.
8. St.-Venant B.D. Courbes representatives des lois du choc longitudinal et du choc transversal d'une barre prismatique // Journal ecolepolytechnique. 1889. № 59. P. 97-103.
9. Timoshenko S.P. Zur fragenach der wirkungeinesstrosseanfeinerbalken // Zeitschrift fur mathematische Physik. 1914. № 62. P. 198-209.
10. Vesnickij A.I. Wave in systems with moving borders. M.: Fizmatlit, 2001. 305 p.
11. Vibrations in technics: directory. V 6-ti t. V. 6. Protection against vibration and impacts. M.: Mashinostroenie, 1981. 456 p.
12. Vibrations in technics: directory. V 6-ti t. V. 2. Fluctuations of nonlinear mechanical systems. M.: Mashinostroenie, 1979. 351 p.
13. Levickij A.I. Fluctuation in mechanisms. M.: Nauka, 2001. 184 p.
14. Frolov K.V. Dynamic of property linear vibroprotectionsystems. M.: Nauka, 1982. 288 p.
15. Vikharev S.N. Vibroacoustic processes of grinding fibrous semi-finished products in the knife refiners. IOP Conference. Ser. Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020. P. 12046.
16. Rossihin J.A. Impact of a sphere about elastic buffer established on plate of overlapping. News of high schools // Construction. 2004. № 11. P. 16-22.
17. Goryacheva I.G. Contact problem rolling motion viscoelastic cylinder on basis from same material // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1973. V. 37, vyp. 5. P. 877-885.
18. Dzhonson K. Mechanics of contact interaction. M.: Mir, 1989. 509 p.
19. Vikharev S.N. Research mill fibrous semi-finished products with the help theories of contact interaction of knives // Forestry 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 226. P. 012048.
20. Demin P.P., Pashinskij V.F., Kiselev S.S. Stability plates of disk refiners. M.: VNIPIElesprom, 1972. 36 p.