

## Исследование температуры в зоне размола мельницы

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 09.10.2024, принята 11.11.2024

*Предметом исследования авторов статьи является температура в зоне размола мельницы. Проведены теоретические и экспериментальные исследования этой температуры с учетом следующих факторов: межножевого зазора между гарнитурами ротора и статора; мощности привода; радиуса дисков. Разработана математическая модель для определения температуры дисков мельницы. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанной математической модели. Ошибка между теоретическими и экспериментальными исследованиями температуры не превышает 10 %. Температура роторного и статорного дисков на одинаковых радиусах различается незначительно. Распределение температуры по радиусу диска неравномерное. Максимальные значения температуры наблюдаются в кольцевой зоне 0,80–0,86 радиуса диска при силовом воздействии ножей на древесные волокна. При увеличении мощности привода максимальная температура также возрастает. При определенной мощности привода происходит увеличение ширины зоны максимальной температуры в три раза. Причем при дальнейшем увеличении мощности и контактного давления ширина этой зоны изменяется незначительно. При больших межножевых зазорах, когда силовое воздействие на древесные волокна уменьшается, температура статора снижается, и зона максимальной температуры перемещается в область 0,75–0,80 радиуса диска. При уменьшении межножевого зазора мельницы температура статора увеличивается по линейному закону, а мощность привода — по экспоненциальному. Зона максимальной температуры соответствует области максимального давления пара в зазоре между ротором и статором мельницы. Эта зона соответствует зоне нулевой скорости пара. Для обеспечения правильности функционирования мельницы необходимо обеспечить минимальное гидравлическое сопротивление от зоны нулевой скорости пара до выходного патрубка. Для этого в современных видах гарнитуры предусматривают различные конструктивные решения (пароотводящие канавки, паровые замки). Результаты, полученные в статье, могут быть использованы при проектировании гарнитуры и при управлении функционированием мельницы по температуре в зоне размола.*

**Ключевые слова:** температура; ножевые мельницы; разمول; диск; зазор.

## Research of temperature in the grinding zone of the mill

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 09.10.2024, accepted 11.11.2024

*The article discusses the temperature in the grinding zone of the mill. Theoretical and experimental studies of this temperature are carried out taking into account the following factors: the interblade gap between the rotor and stator fittings; drive power; radius of the disks. A mathematical model has been developed to determine the temperature of mill disks. The experimental studies carried out show the adequacy of the developed mathematical model. The error between theoretical and experimental temperature studies does not exceed 10%. The temperature of the rotor and stator disks at the same radii differs slightly. The temperature distribution along the radius of the disk is uneven. The maximum temperature values are observed in the annular zone 0.80–0.86 of the disk radius when the knives exert force on the wood fibers. As the drive power increases, the maximum temperature also increases. At a certain drive power, the width of the maximum temperature zone increases three times. Moreover, with a further increase in power and contact pressure, the width of this zone changes slightly. With large blade gaps, when the force on the wood fibers decreases, the stator temperature decreases, and the maximum temperature zone moves to the area of 0.75–0.80 of the disk radius. As the mill blade gap decreases, the stator temperature increases linearly, and the drive power increases exponentially. The zone of maximum temperature corresponds to the region of maximum steam pressure in the gap between the rotor and stator of the mill. This zone corresponds to the zone of zero steam velocity. To ensure proper functioning of the mill, it is necessary to ensure minimum hydraulic resistance from the zone of zero steam velocity to the outlet pipe. For this purpose, modern types of headsets provide various design solutions (steam vents, steam locks). The results obtained in the article can be used in the design of the headset and in controlling the operation of the mill based on the temperature in the grinding zone.*

**Keywords:** temperature; bar refiners; refining; disk; gap.

**Введение.** Размол волокнистых материалов, как правило, производится в ножевых мельницах. Процесс размола сопровождается повышением температуры в размалывающей зоне [1–3]. Это приводит к нагреву размалываемого полуфабриката и элементов конструкции ножевой размалывающей машины. Особенно много тепла выделяется при размоле щепы и древесной массы высокой концентрации. Это приводит к интенсивному парообразованию в зоне размола [4].

Исследованию влияния температуры при размоле на характеристики полуфабриката посвящено множество работ [5; 6 и др.]. В работах [7–9] предлагается управлять функционированием мельниц по температуре статора. Влиянию конструктивных и эксплуатационных факторов размола на температуру статора мельницы посвящены работы [3; 10]. Однако в этих работах не исследованы распределение температуры по радиусу ножевого диска и влияние факторов размола на это распределение.

*Цель статьи* — исследование температуры в зоне размола мельницы с учетом различных факторов.

**Теоретические исследования.** Для исследования температуры в зоне размола волокнистых материалов рассмотрим тепловыделение при контакте ротора и статора мельницы вдоль продольной оси  $X$ . Выделение тепла происходит в тонком слое толщиной  $s$  между ротором и статором мельницы.

При работе мельницы выделяется тепло, количество которого можно представить в виде зависимости [11]:

$$Q = k_1 f V F_c(t), \quad (1)$$

где  $V$  — скорость скольжения ножей гарнитуры относительно друг друга;  $f$  — коэффициент трения между ротором и статором;  $k_1$  — коэффициент пропорциональности;  $F_c(t)$  — осевая сила, возникающая при размоле [12].

Одномерное уравнение теплопроводности в системе «ротор – волокнистая прослойка – статор мельницы»:

$$[\lambda(x)T'(x)]' = -f(x), \quad (2)$$

где  $T'(x)$ ,  $\lambda(x)$ ,  $f(x)$  — соответственно температура, коэффициент теплопроводности и распределенные источники тепла в волокнистом материале между ножами гарнитуры.

Рассмотрим граничные условия на границах волокнистой прослойки при  $x = -s/2$ :

$$T = T_1, \quad \lambda(s/2)T' = \lambda_1, \quad (3)$$

при  $x = s/2$ :

$$T = T_2, \quad \lambda(-s/2)T' = \lambda_2 T_2', \quad (4)$$

где  $T_1, T_2$  — температура ротора и статора;  $\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициент теплопроводности материала статора и ротора.

Равенство потоков тепла и температуры в этой теплофизической системе описывается выражениями (2) и (3). Основываясь на непрерывности теплофизических свойств размалываемого материала между ротором и статором ножевой размалывающей машины при  $x = -\frac{s}{2}$  и  $x = \frac{s}{2}$ , получим:

$$\lambda(-s/2) = \lambda_2 \text{ и } \lambda(s/2) = \lambda_1.$$

Преобразуем выражение (2), и с учетом (1), (3) и (4) можно записать:

$$\lambda_2 T_2' - \lambda_1 T_1' = Q = Vk(p). \quad (5)$$

$$T_1 - T_2 = -\int_{-s/2}^{s/2} f(\eta) d(\eta) \int_{\eta}^s \frac{dy}{\lambda(y)} + \lambda_2 T_2' \frac{s}{\lambda_0}, \quad (6)$$

где  $\frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{s} \int_{-s/2}^{s/2} \frac{d\eta}{\lambda(\eta)}$ .

Анализируя полученные уравнения, можно записать:

$$T_1 - T_2 \leq \lambda_2 T_2' \frac{s}{\lambda_0} \quad (7)$$

$$T_1 - T_2 \geq -Q \frac{s}{\lambda_0} + \lambda_2 T_2' \frac{s}{\lambda_0} = \lambda_1 T_1' \frac{s}{\lambda_0}. \quad (8)$$

Межножевой зазор  $s$  в мельницах при силовом воздействии на волокнистый материал, как правило, не превышает миллиметра [1]. Тогда можно для разницы температуры для волокнистой прослойки  $T_1 - T_2$  использовать некоторое среднее значение, т. е. получим выражение неидеального теплового контакта двух тел [13]:

$$\lambda_2 T_2' + \lambda_1 T_1' = \frac{2}{r_s} (T_1 - T_2), \quad (9)$$

где  $r_s = \frac{s}{\lambda_0}$  — сопротивление двух контактирующих тел.

При увеличении контактного давления при размоле волокнистых материалов сопротивление контактирующих тел будет меньше, т. е.  $r_s = r_s(p)$ .

Дисковой мельнице удовлетворяют условия (5) и (9) при  $x = -s/2$ . Примем допущение, что температура размалываемого материала во входном патрубке мельницы постоянна. В этом случае температуру роторного и статорного диска можно определить как:

$$T_1 = T_1^k \left(1 - \frac{x}{h_1}\right), \quad T_2 = T_2^k \left(1 + \frac{x}{h_2}\right), \quad (10)$$

где  $h_1, h_2$  — толщина дисков статора и ротора;  $T_1^k, T_2^k$  — температура в зоне контакта статора и ротора мельницы.

Температуру ротора и статора мельницы в области их контакта можно определить из выражения (10) с учетом уравнений (5) и (9):

$$T_1^k = \frac{Vk(p)h_1(\lambda_2 r_s + 2h_2)}{2(\lambda_1 \lambda_2 r_s + \lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2)}, \quad (11)$$

$$T_2^k = \frac{Vk(p)h_2(\lambda_1 r_s + 2h_1)}{2(\lambda_1 \lambda_2 r_s + \lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2)}.$$

Рассмотрим силы, действующие на щепу или волокнистую массы высокой концентрации в межножевом зазоре (рис. 1). Выделим силы, действующие на кольцо полуфабриката толщиной  $dr$  и массой  $dm$  в межножевом зазоре мельницы. Сила, под действием которой происходит перемещение частички волокнистого материала по радиусу размалывающей гарнитуры, рассчитывается как:

$$dF_r = dF_y - dF_{r1} - dF_{r2} \pm dF_n, \quad (12)$$

где  $dF_y$  — центробежная сила, действующая на частичку полуфабриката;  $dF_{r1}, dF_{r2}$  — сила трения волокнистого материала о статорный и роторный диски,  $dF_n$  — сила, вызванная давлением пара на частичку материала.

В формуле (12) знак «+» применяют тогда, когда пар движется от центра диска к его наружному диаметру.

ру, а знак «-» — когда пар перемещается в противоположном направлении.

Сила действия пара на частичку полуфабриката зависит от межножевого зазора мельницы и реологических свойств размалываемого материала [18; 20]. Силу, вызванную давлением пара на частичку материала в направлениях осей  $X, Y, Z$ , запишем как:

$$dF_{nx,ny,nz} = \mu_n \rho_n(r) [V_n(r)]^2 A(r)_{x,y,z} dm, \quad (13)$$

где  $\mu_n$  — коэффициент трения между паром и волокнистым материалом;  $V_n(r), \rho_n(r)$  — скорость и плотность пара на радиусе диска  $r$ ;  $A(r)_{x,y,z}$  — площадь частички материала на радиусе диска  $r$  в направлениях  $X, Y, Z$ .

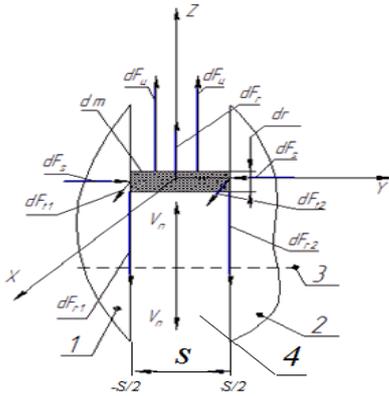


Рис. 1. Силы, действующие на волокнистый материал в зазоре между гарнитурами ротора и статора: 1 — статорный диск; 2 — роторный диск; 3 — зона нулевой скорости пара; 4 — полуфабрикат

Центробежную силу, действующую на элемент волокнистого материала, можно представить как:

$$dF_{ц} = \omega^2 r dm, \quad (14)$$

где  $\omega$  — частота вращения ротора мельницы;  $r$  — радиус на котором располагается элемент волокнистого материала.

Сила трения волокнистого материала о размалывающие диски в радиальном направлении:

$$dFr_{1,2} = dFr_1 + dFr_2 = 4 \mu_r \pi r p(r) dr, \quad (15)$$

где  $\mu_r$  — коэффициент трения волокнистого материала о диски в радиальном направлении;  $p(r)$  — давление на волокнистый материал на радиусе гарнитуры  $r$ .

Сила трения волокнистого материала о размалывающие диски в тангенциальном направлении:

$$dF_t = dF_{t1} + dF_{t2} = 4\pi \mu_t p(r) r dr, \quad (16)$$

где  $\mu_t$  — коэффициент трения волокнистого материала о диски в тангенциальном направлении.

Сила, действующая на волокнистый материал в радиальном направлении:

$$F_r = \int_{r_1}^{r_2} 4\pi \mu_r r p(r) dr + \int_{r_1}^{r_2} dF_{nz} dr, \quad (17)$$

где  $r_1, r_2$  — внутренний и наружный диаметр размалывающих дисков

Сила, действующая на волокнистый материал в тангенциальном направлении:

$$F_t = \int_{r_1}^{r_2} 4\pi \mu_t r p(r) dr + \int_{r_1}^{r_2} dF_{nx} dr, \quad (18)$$

где  $dF_{nz}, dF_{nx}$  — силы, вызванные давлением пара на элемент волокнистого материала по осям  $Z$  и  $X$ .

**Результаты и дискуссия.** Результаты теоретических исследований температуры диска статора при размоле щепы на мельнице с диаметром дисков 1 200 мм представлены на рис. 2.

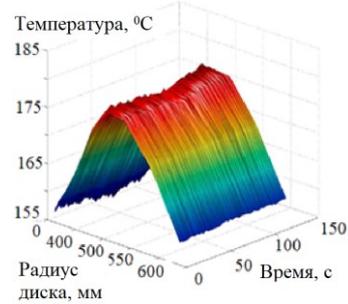


Рис. 2. Температура в зоне контакта ротора и статора при размоле еловой пропаренной щепы

Как правило, в мельницах используется одинаковый материал гарнитуры ротора и статора. Расчет установлено, что температура роторного и статорного диска на одинаковых радиусах различается незначительно (не более  $\pm 5$  °C). Погрешность между теоретическим и экспериментальным определением температуры в зоне размола не превышает 10 %.

Максимальная температура при размоле волокнистых полуфабрикатов соответствует области, которая находится в кольцевой зоне между внутренним и наружным диаметром гарнитуры. В этой зоне происходит интенсивное образование пара. Распределение температуры и давления в этой зоне неравномерно и зависит от факторов процесса размола. В области максимальной давления пара возникает зона максимальной температуры, а эта область соответствует зоне нулевой скорости пара [20]. Пар от этой зоны может перемещаться к внутреннему или наружному диаметру ротора и статора (рис. 3), в зависимости от действующих на него сил. Пар движется от центра к наружному диаметру дисков, если центробежная сила, действующая на него:

$$\vec{F}_{ц} > \vec{F}_t + \vec{F}_r, \quad (19)$$

и от наружного диаметра к центру дисков при:

$$\vec{F}_{ц} < \vec{F}_t + \vec{F}_r, \quad (20)$$

где  $\vec{F}_t, \vec{F}_r$  — силы, действующие на пар в тангенциальном и радиальном направлении.

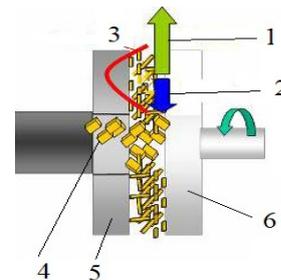


Рис. 3. Течение волокнистого материала и пара между ротором и статором мельницы: 1 — прямой поток пара; 2 — обратный поток пара; 3 — температура в зоне размола; 4 — волокнистый материал (щепы); 5 — статор; 6 — ротор

Течение пара в межножевом зазоре зависит от технологических и режимных факторов процесса размола. Течение пара к центру дисков против движения подачи волокнистого материала в мельницу нежелательно, так как при этом уменьшается производительность мельницы, и возникают повышенные динамические нагрузки на подающий шнек мельницы. Поэтому для устранения этого режима рекомендуется отводить пар из области максимальной температуры в зоне размола, т. е. из зоны нулевой скорости пара [21].

Временные зависимости мощности, межножевого зазора и частоты вращения ротора мельницы производства термомеханической массы АО «Соликамскбумпром» представлены на рис. 4.

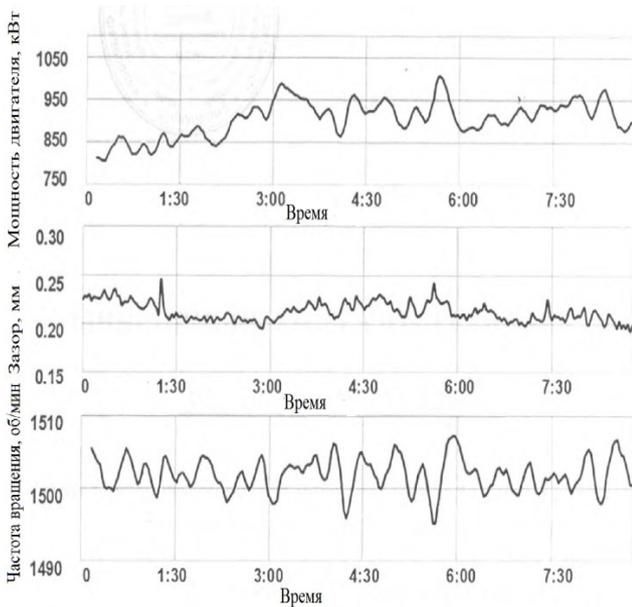


Рис. 4. Временные зависимости мощности, межножевого зазора и частоты вращения ротора мельницы производства термомеханической массы АО «Соликамскбумпром»

Зависимость температуры статора от радиуса диска и мощности привода мельницы представлена на рис. 5 и 6.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Температура статора мельницы существенным образом зависит от радиуса размалывающего диска и зазора между ротором и статором. Причем распределение температуры по радиусу диска неравномерное. Максимальных значений температура достигает в кольцевой зоне  $(0,80-0,86) \cdot R$ , где  $R$  — наружный радиус размалывающего диска.

При увеличении мощности привода с 500 до 1 200 кВт (что соответствует контактному давлению между ножами  $p = 40-85$  МПа) максимальная температура возрастает с 145 до 152 °С;

При мощности привода 680–700 кВт ( $p = 50-52$  МПа) происходит увеличение ширины зоны максимальной температуры с 80 до 240 мм, т. е. в три раза. Причем при дальнейшем увеличении контактного давления ширина этой зоны изменяется незначительно.

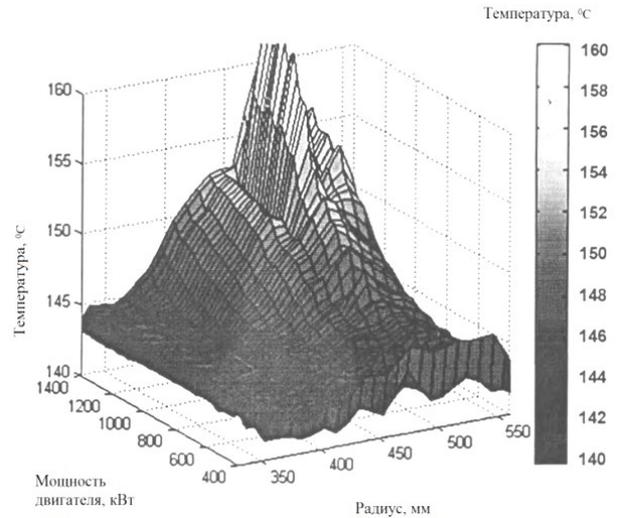


Рис. 5. Зависимость температуры статора от мощности двигателя и радиуса гарнитуры при размоле щепы производства термомеханической массы АО «Соликамскбумпром»

На рис. 7 и в таблице представлены результаты экспериментальных исследований на мельнице TF-52 производства термомеханической массы АО «Соликамскбумпром» максимальной температуры статора от межножевого зазора и мощности привода мельницы.

При уменьшении зазора между ротором и статором мельницы температура статора возрастает по линейному закону, а мощность привода мельницы — по экспоненциальному. Средняя длина волокна после размола также зависит от межножевого зазора. При увеличении зазора средняя длина волокна увеличивается. Это объясняется рубящими воздействиями ножей на древесные волокна [3].

Таблица. Результаты экспериментальных исследований параметров мельницы

Межножевой зазор, мм	Максимальная температура статора, °С	Мощность привода, кВт	Средняя длина волокна, мм
0,28	205	1 250	1,1
0,40	177	950	1,5
0,55	155	630	1,8

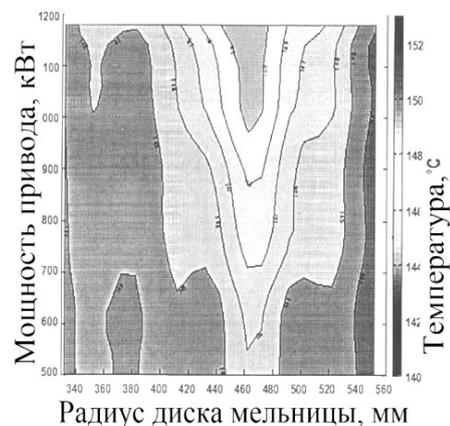


Рис. 6. Зависимость температуры статора от радиуса диска и мощности привода мельницы

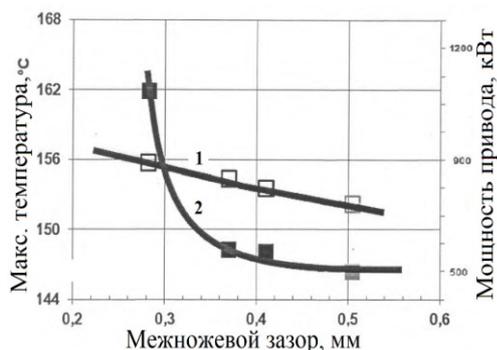


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры статора от межножевого зазора (1) и мощности привода (2)

На рис. 8 показана зависимость температуры статора от радиуса диска мельницы при различных межножевых зазорах.



Рис. 8. Зависимость температуры статора от межножевого зазора: 1 — профиль межножевого зазора; 2 — зазор 0,3 мм; 3 — зазор 1,5 мм; 4 — зазор 2,0 мм

Максимальных значений температура статора мельницы достигает при силовом воздействии на древесные волокна (рис. 8, межножевой зазор 0,3 мм). Зона максимальной температуры соответствует области максимального давления пара в зазоре между ротором и статором мельницы. Как показали исследования [10; 14; 16], области максимального давления и нулевой скорости пара совпадают. Пар при размоле щепы или массы высокой концентрации из зоны нулевой скорости течет к выходному или входному патрубку. Направление его движения зависит от гидравлического сопротивления его движению в межножевом зазоре. Пар из зоны размола перемещается в том направлении, где гидравлическое сопротивление меньше, исходя из условий (19) и (20). Для обеспечения правильности функционирования мельницы необходимо обеспечить минимальное гидравлическое сопротивление от зоны нулевой скорости пара до выходного патрубка. Для этого в современных видах гарнитуры предусматривают пароотводящие канавки и паровые замки во входной зоне размалывающей гарнитуры [17; 18]. Также рекомендуется увеличивать частоту вращения ротора для создания больших

центробежных сил, действующих на пар и полуфабрикат.

При больших зазорах, когда силовое воздействие на древесные волокна уменьшается, а размол происходит в основном за счет гидродинамических воздействий [19], температура статора снижается, и зона максимальной температуры перемещается в область (0,75–0,87)-R.

**Заключение.** Теоретически и экспериментально исследована температура в зоне размола с учетом следующих факторов: зазора между ножами ротора и статора; мощности привода; радиуса диска. Разработана математическая модель для определения температуры дисков мельницы. Проведенные экспериментальные исследования на производствах древесной массы высокого выхода показали адекватность разработанной математической модели. Ошибка между теоретическими и экспериментальными исследованиями температуры не превышает 10 %.

Температура роторного и статорного диска на одинаковых радиусах различается незначительно (не более  $\pm 5$  °C). Распределение температуры по радиусу диска неравномерное. Максимальные значения температуры наблюдаются в кольцевой зоне 0,80–0,86 радиуса диска при силовом воздействии на древесные волокна. При увеличении мощности привода максимальная температура также возрастает. При мощности привода 680–700 кВт происходит увеличение ширины зоны максимальной температуры в три раза. Причем при дальнейшем увеличении мощности и контактного давления ширина этой зоны изменяется незначительно.

При больших межножевых зазорах, когда силовое воздействие на древесные волокна резко уменьшается, температура статора снижается, и зона максимальной температуры перемещается в область 0,75–0,80 радиуса диска.

При уменьшении межножевого зазора мельницы температура статора увеличивается по линейному закону, а мощность привода – по экспоненциальному.

Зона максимальной температуры соответствует области максимального давления пара в зазоре между ротором и статором мельницы. Эта зона соответствует зоне нулевой скорости пара. Для обеспечения правильности функционирования мельницы необходимо обеспечить минимальное гидравлическое сопротивление от зоны нулевой скорости пара до выходного патрубка. Для этого в современных видах гарнитуры предусматривают различные конструктивные решения (пароотводящие канавки, паровые замки).

Результаты, полученные в статье, могут быть использованы при проектировании гарнитуры и при управлении функционированием мельницы по температуре в зоне размола.

#### Литература

1. Легоцкий С.С., Гончаров В.Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М.: Лесная промышленность, 1990. 224 с.
2. Иванов С.Н. Технология бумаги. М.: Лесная промышленность, 2006. 696 с.
3. Бывшев А.В., Савицкий Е.Е. Механическое диспергирование волокнистых материалов. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1991. 216 с.

4. Гончаров В.Н. Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых мельницах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1990. 31 с.
5. Kang T., Somboon P., Paulapuro H. Fibrillation of mechanical pulp fibers // *Pap. Puu*. 2006. Vol. 88 (7). P. 409-411.
6. 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.
7. Шапоров О.М., Лихтер А.Д. Теоретическое и экспериментальное исследование свойств конической мельницы как объекта управления в потоке непрерывного размола // *Бумагоделательное машиностроение: сб. ст. Л., 1972. Вып. 19. С. 32-36.*
8. Паук Я.А., Ойтсалу Р.И., Рейска Р.А. Управление процессом размола по приросту температуры бумажной массы // *Бумага и целлюлоза*. 1976. Вып. 9. С. 8-9.
9. Sferazza M. Optimal control stock preparation refiners // *TAPPI*. 1986. Vol. 69, № 1. P. 82-85.
10. 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. Vol. 33 (3). P. 163-171.
11. Александров В.М., Чебаков М.И. Введение в механику контактных взаимодействий. Ростов н/Д.: ООО ЦВВР, 2005. 108 с.
12. Вихарев С.Н. Осевые силы, возникающие при размоле в дисковой мельнице // *Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал*. 2013. № 6. С. 107-114.
13. Азоян А.И., Иваночкин П.Г. Моделирование контактного взаимодействия жесткого штампа с двухслойным покрытием при учете тепловыделения в зоне контакта // *Труды XI междунар. науч.-технической конф. (1-3 нояб. 2016 г.)*. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2016. С. 6-8.
14. Senger J., Olmstead M., Ouellet D. Measurement of Shear and Normal Forces in the Refining Zone of a TMP Refiner // *J. Pulp Paper Sci.* 2004. № 30 (9). P. 247-251.
15. Daniel G., Bardage S., Fernando D., Hafren J., Ander P. Energy consumption in refining of Scots pine and Norway spruce TMP is governed by fibre morphology and ultrastructure // *Proceedings of the Int. Mech. Pulp. Conf. - Sundsvall, Sweden, 2009. June 1-4. P. 82-86.*
16. Miles K.B., Omholt I. Improving the strength properties of TMP // *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Quebec. Canada, 2003. P. 179-186.*
17. Eriksson K. Performance analysis in TMP refining. Diploma thesis, Control and Automation Laboratory; Department of Signals and Systems. Chalmers University of Technology, Goteborg, 2001. Sweden. P. 30-34.
18. Heymer J.O., Olson J.A., Kerekes R.J. The role of multiple loading cycles on pulp in refiners, *Nordic Pulp and Paper Res. J.*, 2011. Vol. 26 (3). P. 283-287.
19. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1986. 36 с.
20. Eriksen O., Gregersen O., Krogstad P.-A. High-speed measurements of pressure and temperature in the refining zone of a high-consistency refiner *Nord. Pulp Paper Res*, 2005. J., 20 (4). P. 459-467.
21. Vikharev S.N. Contact problem at mill semi finished items with the account of the thermal emission and forces in knife grinding machines // *FORESTRY 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. 226. 012010 IOP Publishing.
2. Ivanov S.N. Technology of a paper. M.: Lesnaya prom-st', 2006. 696 p.
3. Byvshev A.V., Savickij E.E. Mechanical of fibrous materials. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. un-ta, 1991. 216 p.
4. 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.
5. Kang T., Somboon P., Paulapuro H. Fibrillation of mechanical pulp fibers // *Pap. Puu*. 2006. Vol. 88 (7). P. 409-411.
6. 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.
7. Shaporov O.M., Lihter A.D. Theoretical and an experimental research of properties of a conic mill as object of management in stream continuous refining // *Bumagodelatel'noe mashinostroenie: sb. st. L., 1972. Vyp. 19. P. 32-36.*
8. Pauok Ya.A., Ojtsalu R.I., Rejska R.A. Management process refining on gain of temperature of paper palp // *Bumaga i cellyuloza*. 1976. Vyp. 9. P. 8-9.
9. Sferazza M. Optimal control stock preparation refiners // *TAPPI*. 1986. Vol. 69, № 1. P. 82-85.
10. 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. Vol. 33 (3). P. 163-171.
11. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. Introduction in mechanics of contact interactions. Rostov n/D.: ООО CVVR, 2005. 108 p.
12. Viharev S.N. Axial forces arising at refining in a disk refiners // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2013. № 6. P. 107-114.
13. Azoyan A.I., Ivanochkin P.G. Modelling of contact interaction of rigid stamp with a two-layer covering at the account of thermal emission in zone of contact // *Trudy XI mezhdunar. nach.-tekhnicheskoj konf. (1-3 noyab. 2016 g.)*. M.: In-t komp'yuternyh issledovanij, 2016. P. 6-8.
14. Senger J., Olmstead M., Ouellet D. Measurement of Shear and Normal Forces in the Refining Zone of a TMP Refiner // *J. Pulp Paper Sci.* 2004. № 30 (9). P. 247-251.
15. Daniel G., Bardage S., Fernando D., Hafren J., Ander P. Energy consumption in refining of Scots pine and Norway spruce TMP is governed by fibre morphology and ultrastructure // *Proceedings of the Int. Mech. Pulp. Conf. - Sundsvall, Sweden, 2009. June 1-4. P. 82-86.*
16. Miles K.B., Omholt I. Improving the strength properties of TMP // *Proceedings of International Mechanical Pulping Conference, Quebec. Canada, 2003. P. 179-186.*
17. Eriksson K. Performance analysis in TMP refining. Diploma thesis, Control and Automation Laboratory; Department of Signals and Systems. Chalmers University of Technology, Goteborg, 2001. Sweden. P. 30-34.
18. Heymer J.O., Olson J.A., Kerekes R.J. The role of multiple loading cycles on pulp in refiners, *Nordic Pulp and Paper Res. J.*, 2011. Vol. 26 (3). P. 283-287.
19. Alashkevich Yu.D. Fundamentals of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in mill machines: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Krasnoyarsk, 1986. 36 p.
20. Eriksen O., Gregersen O., Krogstad P.-A. High-speed measurements of pressure and temperature in the refining zone of a high-consistency refiner *Nord. Pulp Paper Res*, 2005. J., 20 (4). P. 459-467.
21. Vikharev S.N. Contact problem at mill semifinished items with the account of the thermal emission and forces in knife grinding machines // *FORESTRY 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. 226. 012010 IOP Publishing.

#### References

1. Legockij S.S., Goncharov V.N. Potters the equipment and preparation of paper weight. M.: Lesnaya prom-st', 1990. 224 p.