

Леса России и хозяйство в них. 2023. № 3. С. 106–115.

Forests of Russia and economy in them. 2023. № 3. P. 106–115.

Научная статья

УДК676. 024. 61

DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ В ГАРНИТУРЕ РОТОРА МЕЛЬНИЦЫ

Сергей Николаевич Вихарев

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

cbp200558@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7945-8027>

Аннотация. В статье приведены результаты исследования потоков волокнистой массы в гарнитурах мельниц при помощи моделирования в программной среде Ansys Fluent. Гидродинамика потоков волокнистой массы в мельнице описывается уравнениями Навье – Стокса. Разработаны модели потоков в гарнитурах ротора. Исследования потоков проведены при следующих переменных факторах: частоты вращения ротора, расхода волокнистой массы, углов наклона ножей и разницы давления между входом и выходом межножевой канавки. При увеличении частоты вращения с 600 до 1000 мин⁻¹ расход в канавках ротора увеличивается в 2,3–5,4 раза. При увеличении разницы давления между выходом и входом канавки с 60 до 135 кПа расход в канавках ротора уменьшается в 1,4–1,5 раза. Поток в межножевых канавках ротора направлен от центра к периферии гарнитуры. Среднее значение скорости потока в межножевой канавке ротора по длине канавки при увеличении частоты вращения ротора с 600 до 1000 мин⁻¹ возрастает в 2,4–2,6 раза. При угле наклона 20° по направлению вращения ротора скорость потоков увеличивается в 1,2 раза. При угле наклона 20° против направления вращения ротора скорость потоков уменьшается в 1,1 раза.

Ключевые слова: мельница, канавка, поток, гарнитура, гидродинамика, размол

Для цитирования: Вихарев С. Н. Исследование потоков волокнистой массы в гарнитурах ротора мельницы // Леса России и хозяйство в них. 2023. № 3 (86). С. 106–115. DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.011.

Scientific article

RESEARCH OF STREAMS OF FIBROUS WEIGHT IN PLATE OF ROTOR REFINER

Sergey N. Vikharev

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia
cbp200558@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7945-8027>

Abstract. In researches of streams of fibrous weight in plate of refiners are lead by means of modeling in program Ansys Fluent environment. The hydrodynamics of streams of fibrous weight in refiner is described by equations Navier-Stokes. Models of streams in plate of rotor are developed. Researches of streams it is lead at the following variable factors: frequencies of rotation of rotor, the charge of fibrous pulp, corners of an inclination of knives and differences of pressure between an input and an output bar flutes. At increase in frequency of rotation with 600 up to 1000 min^{-1} the charge in flutes of rotor increases in 2,3–5,4 times. At increase in a difference of pressure between an output and an input of flute with 60 up to 135 kPa the charge in flutes of rotor decreases in 1,4–1,5 times. The stream in bar flutes of rotor is directed from the center to periphery plates. Average value of speed of stream in bar to flute of rotor on length of flute at increase in frequency of rotation of rotor with 600 up to 1000 min^{-1} grows in 2,4–2,6 times. At a corner of an inclination of 20 degrees on direction of rotation of rotor speed of streams increases in 1.2 times. At corner of an inclination of 20 degrees against a direction of rotation of rotor speed of streams decreases in 1,1 times.

Keywords: refiner, flute, stream, plate, hydrodynamics, refining

For citation: Vikharev S. N. Research of streams of fibrous weight in plate of rotor refiner // Forests of Russia and economy in them. 2023. № 3 (86). P. 106–115. DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.011.

Введение

Мельницы – основное технологическое оборудование для размола волокнистых материалов в целлюлозно-бумажной промышленности. При размолу волокнистых материалов в мельницах закладываются основные свойства выпускаемой продукции. Мельницы – самые энергоемкие машины в производстве бумаги и картона (Бывшев и др., 1991; Гончаров, 1990). Для изучения процесса размола в этих машинах необходимо исследовать динамику потоков волокнистой массы в ножевой гарнитуре. Современные представления о размолу волокнистых полуфабрикатов предлагают разбить этот процесс на три основные стадии.

1. Подача волокнистого материала в зону размола.
2. Силовое и гидродинамическое воздействие на волокнистый материал между ножами ротора и статора.
3. Удаление материала из мельницы.

Ранее исследование гидродинамики потоков волокнистой массы в гарнитуре мельниц производилось в работах Ю. Д. Алашкевича, В. Н. Гончарова и их учеников (Алашкевич, 1986; Алашкевич и др., 2010; Гончаров, 1990; Иванов, 2006; Шуркина, 2016, Легоцкий, 1990), а также за рубежом (Berg, Karlstrom, 2005; Eriksen, 2003; Huhtanen, 2004; Lumiainen, 2000; Miles, 1980). В статье приведены результаты исследования динамики этих потоков с использованием моделирования в программной среде Ansys Fluent.

Объекты

и методы исследования

При исследовании динамики потоков приняты следующие допущения: ножи и межножевые канавки заменяются объектами в виде прямоугольных блоков; повышение температуры и парообразование при размолу не учитываются; волокнистая масса подчиняется основным законам гидродинамики

и моделируется как ньютоновская несжимаемая жидкость с постоянной вязкостью.

Гидродинамику потоков волокнистой массы в мельнице можно описать уравнениями Навье – Стокса (Кочин, 1963):

$$\frac{\partial v_i}{\partial y_i} = 0, \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial y_j} = - \frac{\partial p}{\partial y_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial y_j \partial y_j}, \tag{2}$$

где ρ , μ – плотность и динамическая вязкость волокнистой массы; p – давление; v_i – скорость i -й точки волокнистой массы.

Для решения таких задач целесообразно использовать метод конечных объемов, реализованный компьютерной программой Ansys Fluent.

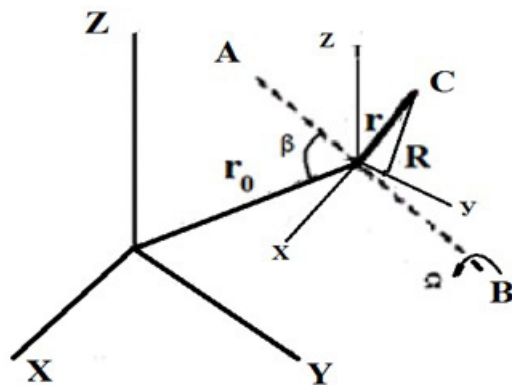


Рис. 1. Стационарная (XYZ) и подвижная (xyz) системы координат
Fig. 1. Stationary (XYZ) and mobile (xyz) systems of coordinates

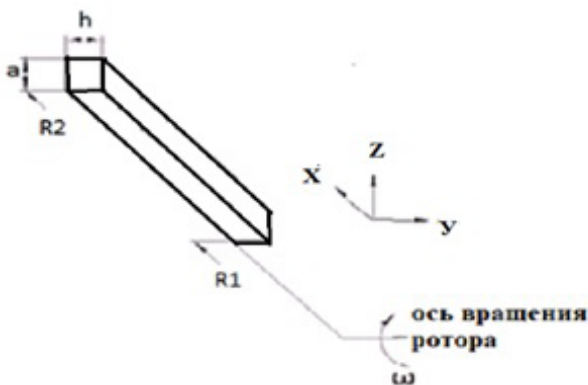


Рис. 2. Модель межножевой канавки гарнитуры ротора
Fig. 2. Model bar flutes plate rotor

Числовой алгоритм этой программы состоит из следующих шагов: поток жидкости разбивается на конечное число объемов; применяются законы физики к конечному числу объемов и преобразовываются интегральные уравнения, описывающие поведение этих объемов, в алгебраические выражения; решаются полученные алгебраические уравнения. Поле потока волокнистой массы в мельнице можно записать как (Ландау, Лифшиц, 1988)

$$V_i = \bar{V}_i + v'_i, \tag{3}$$

$$P_i = \bar{P}_i + P'_i. \tag{4}$$

Подставляя выражения (3) и (4) в уравнения Навье – Стокса, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v'_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + v'_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial y_j} + \bar{V}_j \frac{\partial v'_i}{\partial y_j} + \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial y_j} + v'_j \frac{\partial v'_i}{\partial y_j} = \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P'}{\partial y_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y_i} + g \nabla^2 v'_i + g \nabla^2 \bar{V}_i. \end{aligned} \tag{5}$$

Для исследования уравнения (5) применительно к потокам в межножевых канавках гарнитуры мельниц необходимо провести моделирование потоков. Введем неподвижную XYZ и подвижную xyz системы координат так, чтобы ось Y совпала с осью вращения ротора мельницы (рис. 1). Ось AB совпадает с осью межножевой канавки гарнитуры, которая находится под углом β к радиусу вращения r_0 . В канавке с угловой скоростью Ω вращается частица волокнистой массы C. Относительная скорость частицы массы в межножевой канавке ротора

$$V_r = v - \Omega r, \tag{6}$$

где v – абсолютная скорость частички массы, Ωr – скорость вращения частички относительно подвижной системы координат.

Используя преобразование (6), можно записать уравнение Навье – Стокса для относительной скорости следующим образом:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \nabla p + g + v \nabla^2 V_r - (2\Omega V_r) - (\Omega^2 r), \tag{7}$$

где $2\Omega V_r$, $\Omega^2 r$ – соответственно Кориолисово и центробежное ускорение, g – ускорение свободного падения.

Для абсолютной скорости можно записать:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v\nabla v = -\frac{1}{\rho}\nabla p + g + v\nabla^2 v - (\Omega v). \quad (8)$$

Рассмотрим модель межножевой канавки гарнитуры ротора (рис. 2).

При рассмотрении модели канавки вводим допущения: канавка имеет прямоугольное сечение ($a \times h$) по всей длине потока от R_1 до R_2 ; канавка вращается с постоянной угловой скоростью ω .

Исходные данные для расчета в программной среде Ansys Fluent представлены ниже.

Модель волокнистой массы Model of fibrous mass	Ньютоновская несжимаемая жидкость Newtonian incompressible fluid
Плотность волокнистой массы, кг/м ³ Density of fibrous mass, kg/m ³	990–1000
Вязкость волокнистой массы, Па·с Viscosity of the fibrous mass, Pa·s	0,001–0,1
Модель турбулентности Turbulence model	$k-\epsilon$ турбулентная модель
Частота вращения ротора мельницы, об/мин Speed of rotation of the mill rotor, turn./min.	600, 750, 1000
Наружный и внутренний радиусы ножевого пояса гарнитуры, мм Outer and inner radii of the headset knife belt, mm	200, 350
Размеры межножевой канавки ($a \times h \times l$), мм Dimensions of the foot groove ($a \times h \times l$), mm	$3 \times 4 \times 150$
Угол наклона оси межножевой канавки к радиусу гарнитуры, град The angle of inclination of the axis of the foot groove to the radius of the headset, deg.	20, 0, –20
Сетка модели Model Grid	Шестигранные элементы. В сечении канавки 284031 элемент Hexagonal elements. In the section of the groove 284031 element
Движение в модели Movement in the model	Канавка ротора вращается, плоскость статора неподвижна The rotor groove rotates, the stator plane is stationary

Результаты исследования и их обсуждение

Давление волокнистой массы на выходе из межножевой канавки за счет действия центробежных сил p_i без учета сил сопротивления определено по методике, предложенной В. Н. Гончаровым (1990). Результаты расчета представлены ниже.

Частота вращения ротора мельницы, мин ⁻¹ Mill rotor speed, min ⁻¹	Давление p_i , кПа Pressure p_i , kPa
600	124
750	188
1000	310

При вращении канавки ротора линейная скорость непрерывно возрастает в радиальном на-

правлении: $v_i = R_i\omega$, R_i – радиус в i -й точке канавки, ω – угловая частота вращения ротора. Модель межножевой канавки ротора представлена на рис. 3.

Расход через межножевую канавку ротора при различных величинах разницы давления между выходом и входом канавки представлен на рис. 4. Среднее значение скорости потока через межножевую канавку ротора в направлении x при различном давлении между выходом и входом канавки представлено в табл. 1. Скорость потоков в межножевой канавке ротора при частоте вращения 750 мин⁻¹ и разнице давления между выходом и входом канавки 60 кПа в сечениях канавки в направлении x представлена на рис. 5.

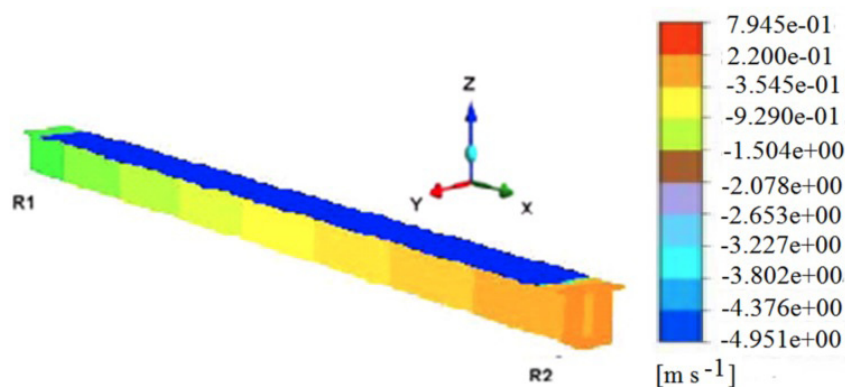


Рис. 3. Модель канавки ротора (показано распределение скоростей по длине канавки)
 Fig. 3. Model of a flute of rotor (distribution of speeds on length of a flute is shown)

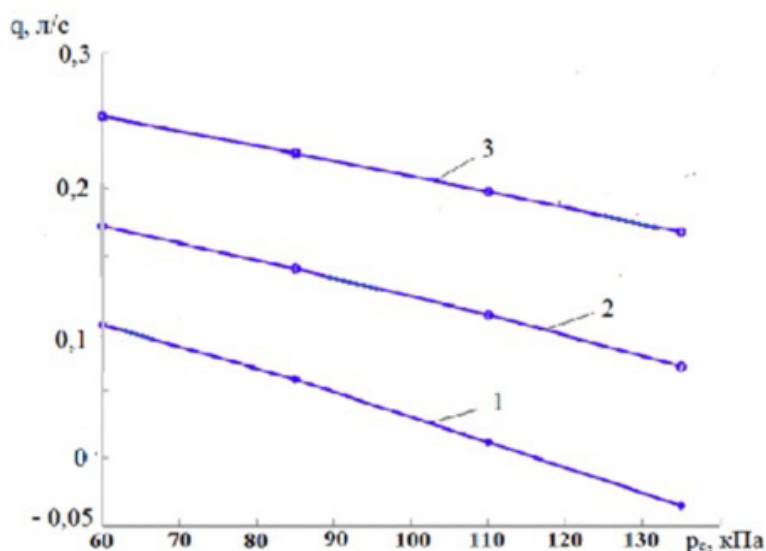


Рис. 4. Расход через межножевую канавку ротора при различном давлении между выходом и входом канавки: 1 – частота вращения ротора 600 мин⁻¹; 2 – 750 мин⁻¹; 3 – 1000 мин⁻¹
 Fig. 4. The charge through bar flute of rotor at various pressure between an output and an input flute: 1 – frequency of rotation of a rotor of 600 min⁻¹; 2 – 750 min⁻¹; 3 – 1000 min⁻¹

Таблица 1

Table 1

Среднее значение скорости потока в межножевой канавке ротора, м/с
 в направлении x при различном давлении между выходом и входом канавки
 Average value of speed of stream in bar to flute of rotor, km/s in direction x
 at various pressure between an output and an input of flute

Частота вращения ротора, мин ⁻¹ Rotor speed, min ⁻¹	Разность давления Δp _с , кПа Pressure difference Δp _с , kPa			
	60	80	100	135
600	2,95	1,87	0,35	-1,22
750	5,04	4,03	3,12	1,85
1000	7,18	6,30	5,55	4,36

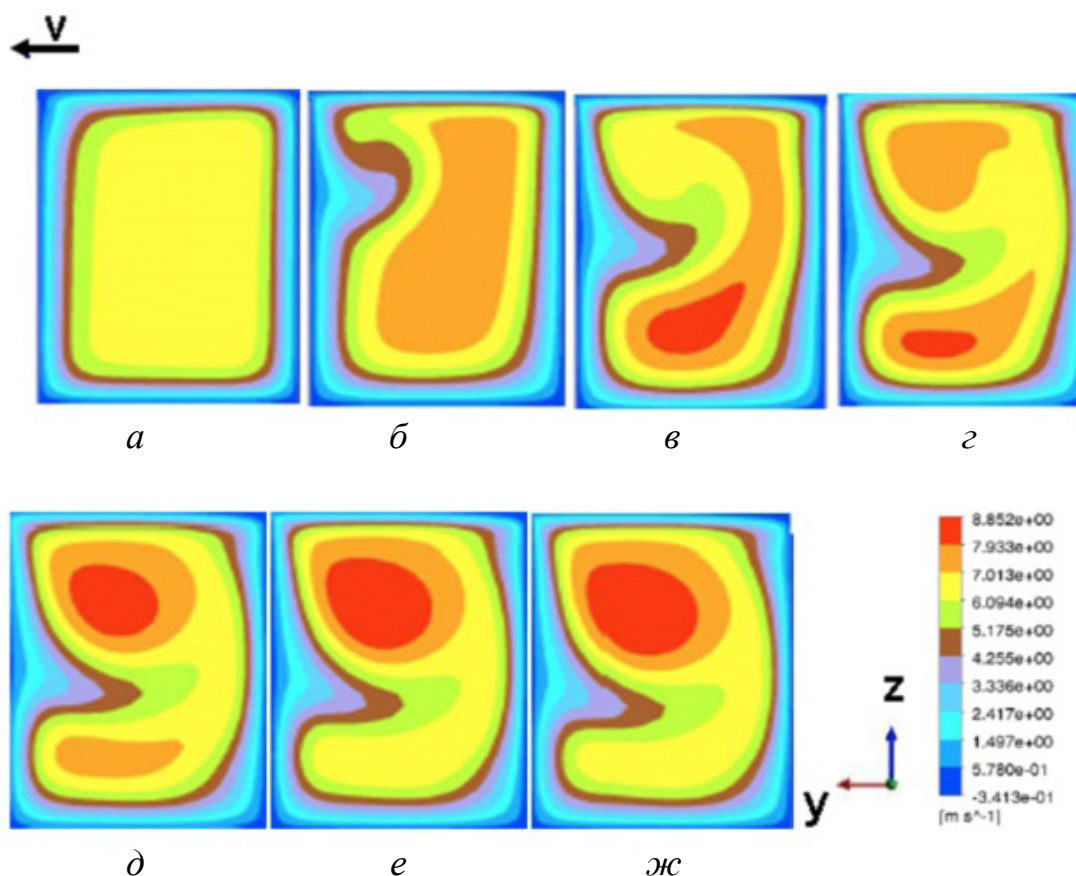


Рис. 5. Скорость потоков в межножевой канавке ротора при частоте вращения 750 мин^{-1} и разнице давления между выходом и входом канавки 60 кПа в сечениях канавки в направлении x , мм:
a – 5; *б* – 25; *в* – 45; *г* – 65; *д* – 85; *е* – 105; *жс* – 135

Fig. 5. Speed of streams in barto flute of rotor at frequency of rotation of 750 min^{-1} and difference of pressure between an output and an input of flute 60 kPa in sections of flute in direction x , mm:
a – 5; *б* – 25; *в* – 45; *г* – 65; *д* – 85; *е* – 105; *жс* – 135

Характер этой скорости существенно изменяется в сечениях канавки. В начале канавки этот поток практически однороден (рис. 5, *a*), затем появляется область с повышенной скоростью внизу канавки (рис. 5, *в–г*). Эта область по мере движения потока смещается вниз к основанию гарнитуры (рис. 5, *е*). Затем образуется очаг с высокой скоростью потока вверху канавки (рис. 5, *д*). По мере дальнейшего движения потока очаг повышенной скорости в низу канавки перемещается вверх (рис. 5, *д–жс*), и увеличивается интенсивность потока вверху канавки. Средняя скорость потока в межножевой канавке ротора в направлении x при различных углах наклона оси канавки к радиусу при давлении $\Delta p_c = 80 \text{ кПа}$ представлено в табл. 2.

Скорость в межножевой канавке ротора в направлении x в среднем сечении канавки при частоте вращения 1000 мин^{-1} и различном давлении между выходом и входом канавки представлена на рис. 6.

Скорость в межножевой канавке ротора при частоте вращения 750 мин^{-1} и разнице давления между выходом и входом канавки 60 кПа в сечениях канавки в направлении z представлена на рис. 7.

Эта скорость в межножевой канавке ротора существенно отличается в различных сечениях канавки. С начала канавки эта скорость практически однородна (рис. 7, *a*). Затем появляется у выходной кромки задней грани ножа область с отрицательной скоростью потока, т.е. поток направлен вниз относительно оси z .

Также появляется область с положительной скоростью потока, т.е. поток направлен по оси z . Интенсивность этих потоков увеличивается по ходу межножевой канавки (рис. 7, б–ж).

Средняя скорость потока по длине межножевой канавки ротора в направлении x в зависимости от частоты вращения ротора представлена на рис. 8.

Средняя скорость потока по длине межножевой канавки повышается с ростом частоты вращения ротора. При входе в межножевую канавку средняя скорость резко возрастает, достигает максимума на длине канавки 5–10 мм. Затем монотонно повышается примерно в 1,2–1,5 раза по ходу канавки (рис. 8).

Таблица 2

Table 2

Средняя скорость потока в межножевой канавке ротора, м/с в направлении x при различных углах наклона оси канавки к радиусу
Average speed of stream in barto flute of rotor, m/s in a direction x at various corners of an inclination of an axis of flute to radius

Частота вращения ротора, мин ⁻¹ Rotor speed, min ⁻¹	Угол β^* , град Angle β^* , degree		
	20	0	-20
600	2,24	1,87	1,58
750	4,87	4,03	3,18
1000	7,58	6,30	5,53

* Угол β положительный, когда направления вращения и угла совпадают, и угол β отрицательный, когда направления не совпадают.

* The angle β is positive when the direction of rotation and the angle coincide and the angle β is negative when the directions do not coincide.

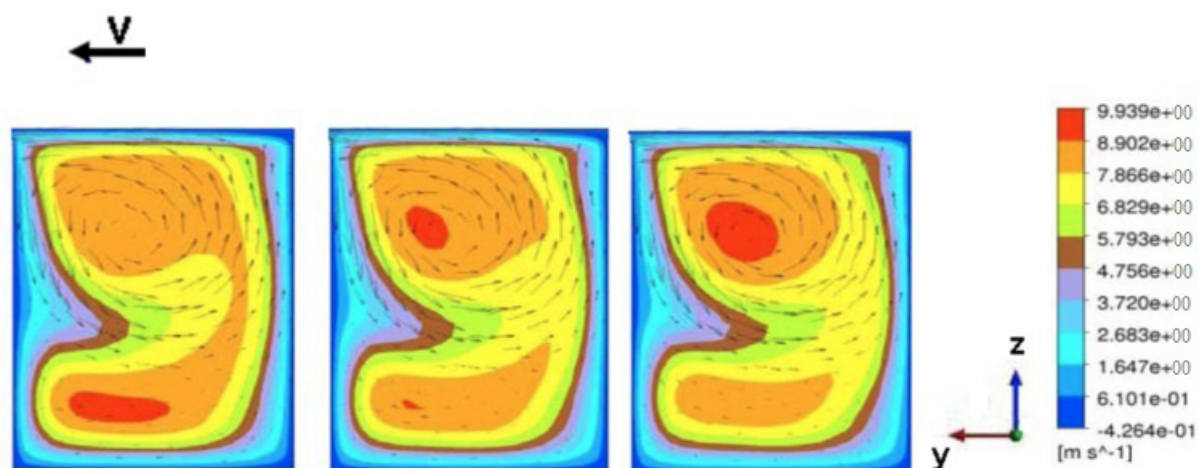


Рис. 6. Скорость потоков в межножевой канавке ротора в направлении x в среднем сечении канавки (75 мм) при частоте вращения 1 000 мин⁻¹ и разнице давления между выходом и входом канавки, кПа:

$a - 60$; $b - 80$; $c - 100$

Fig. 6. Speed of streams in межножевойto flute of rotor in a direction x on the average section of flute (75 mm) at frequency of rotation of 1000 min⁻¹ and a difference of pressure between an output and an inputof flute, kPa:

$a - 60$; $b - 80$; $c - 100$

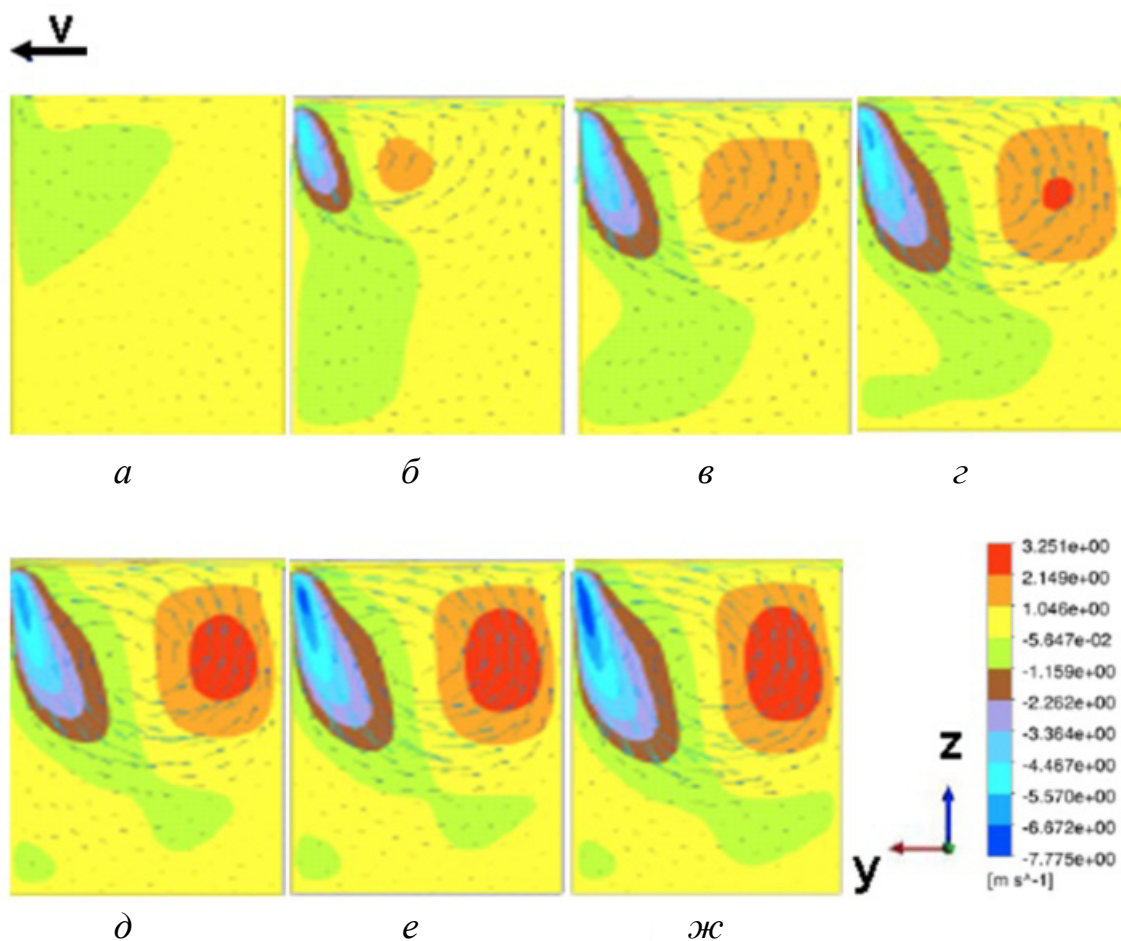


Рис. 7. Скорость потоков в межжевой канавке ротора при частоте вращения 750 мин^{-1} и разнице давления между выходом и входом канавки 60 кПа в сечениях канавки в направлении z , мм:
 а – 5; б – 25; в – 45; г – 65; д – 85; е – 105; ж – 135

Fig. 7. Speed of streams in bar to flute of rotor at frequency of rotation of 750 min^{-1} and difference of pressure between an output and an input of flute 60 kPa in sections of flute in direction z , mm:
 а – 5; б – 25; в – 45; г – 65; д – 85; е – 105; ж – 135

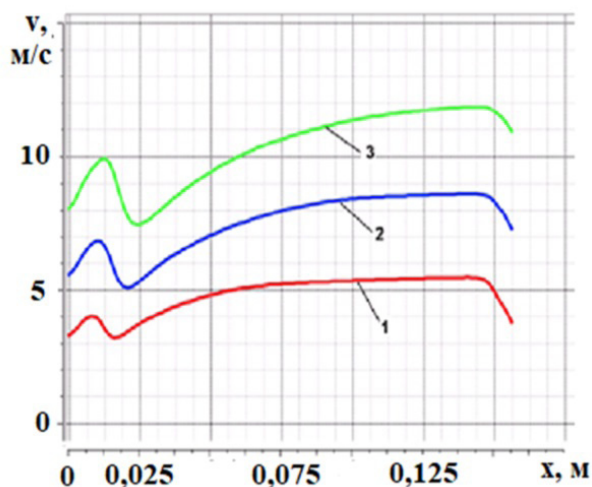


Рис. 8. Средняя скорость потока по длине межжевой канавки ротора в направлении x в зависимости от частоты вращения ротора, мин^{-1} : 1 – 600; 2 – 750; 3 – 1 000

Fig. 8. Average speed of stream on length bar flutes of rotor in a direction x depending on frequency of rotation, min^{-1} : 1 – 600; 2 – 750; 3 – 1 000

Выводы

1. Расход в межножевых канавках ротора зависит от частоты вращения ротора. При увеличении частоты вращения с 600 до 1000 мин⁻¹ расход увеличивается в 2,3–5,4 раза. При увеличении разницы давления между выходом и входом канавки с 60 до 135 кПа расход в канавках ротора уменьшается в 1,4–1,5 раза. Поток в межножевой канавке ротора направлен от центра к периферии гарнитуры.

2. Среднее значение скорости потока в межножевой канавке ротора по длине канавки при увеличении частоты вращения ротора с 600 до 1000 мин⁻¹ возрастает в 2,4–2,6 раза (большее значение соответствует большей разности давления между входом и выходом канавки). Средняя скорость потока

ротора изменяется при изменении угла наклона канавки к радиусу гарнитуры. При угле наклона 20° по направлению вращения ротора скорость потоков увеличивается в 1,2 раза (режим прокачивания). При угле наклона 20° против направления вращения ротора скорость потоков уменьшается в 1,1 раза (режим удержания). При входе в межножевую канавку средняя скорость резко возрастает, достигает максимума на длине канавки 5–10 мм. Затем монотонно повышается примерно в 1,2–1,5 раза по ходу канавки.

3. При увеличении разницы давления между выходом и входом межножевой канавки ротора до 80–100 кПа наибольшая скорость потока смещается в верх канавки.

Список источников

- Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Набиева А. А.* Влияние рисунка гарнитуры на процесс размола волокнистых полуфабрикатов : моногр. : в 2 ч. Красноярск : СибГТУ, 2010. Ч. 1. 168 с.
- Алашкевич Ю. Д.* Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах : дис. ... д-ра техн. наук / Алашкевич Юрий Давыдович. Красноярск, 1987.
- Бышев А. В., Савицкий Е. Е.* Механическое диспергирование волокнистых материалов. Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1991. 216 с.
- Гончаров В. Н.* Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Гончаров Владимир Николаевич. Л., 1990. 31 с.
- Иванов С. Н.* Технология бумаги. М. : Лесн. пром-сть, 2006. 696 с.
- Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.* Теоретическая гидродинамика. М. : Физматгиз, 1963. 458 с.
- Легоцкий С. С., Гончаров В. И.* Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М. : Лесн. пром-сть, 1990. 224 с.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. М. : Наука, 1988. 354 с.
- Шуркина В. И.* Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве : дис. ... канд. техн. наук / Шуркина Валентина Ивановна. Красноярск, 2016. 145 с.
- Berg D., Karlstrom A.* Dynamic pressure measurements in full-scale thermomechanical pulp refiners, Proceedings of 2005 International Mechanical Pulping Conference, P. 42–49, Oslo, Norway.
- Eriksen O.* High-frequency pressure measurements in the refining zone of a high consistency refiner, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2003.
- Huhtanen J-P.* Modeling of Fiber Suspension Flows in Refiner and Other Papermaking Processes by Combining Non-Newtonian Fluid Dynamics and Turbulence, Doctoral Thesis, Tampere University of Technology, Energy and Process Engineering, Tampere, 2004.
- Lumiainen J.* Refining of chemical pulp, Papermaking Science and Technology, Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Book 8, Fapet Oy, H. Paulapuro (Ed.), Gummerus Printing, Jyvaskyla, Finland, 2000, 87–121.
- Miles K. B., Dana H. R., May W. D.* The Flow of Steam in Chip Refiner, proceedings from the 1980 International Symposium on Fundamental Concept of Refining, Appleton, WI, USA.

References

- Alashkevich J. D.* Bas of the theory of hydrodynamic processing of fibrous materials in mill machines : Abstract thesis doctors tech. sciences. Krasnoyarsk, 1986.
- Alashkevich J. D., Kovalev V. I.* Influence of figure plate on process mill fibrous semifinished items. The monography in 2 parts. Part 1. Krasnoyarsk, 2010. 168 p.
- Berg D., Karlstrom A.* Dynamic pressure measurements in full-scale thermomechanical pulp refiners, Proceedings of 2005 International Mechanical Pulping Conference, P. 42–49, Oslo, Norway.
- Byvshev A. V., Savitsky E. E.* Mechanical of fibrous materials. Krasnoyarsk : Publishing house Krasnoyarsk university, 1991. 216 p.
- Eriksen O.* High-frequency pressure measurements in the refining zone of a high consistency refiner, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2003.
- Goncharov V. N.* Theoretical potters of a fundamentals of a milling of fibrous materials in knife refiners : Abstract thesis doctors tech. sciences. Leningrad, 1990. 31 p.
- Huhtanen J-P.* Modeling of Fiber Suspension Flows in Refiner and Other Papermaking Processes by Combining Non-Newtonian Fluid Dynamics and Turbulence, Doctoral Thesis, Tampere University of Technology, Energy and Process Engineering, Tampere, 2004.
- Ivanov S. N.* Technology of a paper. Moscow : Forest industry, 2006. 696 p.
- Kochin N. E., Kibel I. A., Rose N. V.* Theoretical hydrodynamics. Moscow : Fizmatgiz, 1963. 458 p.
- Landau L. D., Lifshits E. M.* Hydrodynamics. Moscow : Science, 1988. 354 p.
- Legotskij S. S., Goncharov V. N.* Potters the equipment and preparation of paper pulp. Moscow : Wood industry, 1990. 224 p.
- Lumiainen J.* Refining of chemical pulp, Papermaking Science and Technology, Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Book 8, Fapet Oy, H. Paulapuro (Ed.), Gummerus Printing, Jyväskylä, Finland, 2000, 87–121.
- Miles K. B., Dana H. R., May W. D.* The Flow of Steam in Chip Refiner, proceedings from the 1980 International Symposium on Fundamental Concept of Refining, Appleton, WI, USA.
- Shurkina V. I.* Perfection knife mill fibrous vegetative polymers in pulp-and-paper manufacture : Abstract thesis cand. tech. sciences / Shurkina Valentina Ivanovna. Krasnoyarsk, 2016. 145 p.

Информация об авторе

С. Н. Вихарев – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

S. N. Vikharev – Doctor of Technical Sciences, Professor.

Статья поступила в редакцию 17.02.2023; принята к публикации 20.05.2023.

The article was submitted 17.02.2023; accepted for publication 20.05.2023.
