

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.1

DOI: 10.64430/1993-0135-2026-3-128-134

Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 3. С. 128–134

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ В ЯЧЕЙКАХ СТАТОРА И РОТОРА ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ РАЗМОЛЕ ХВОЙНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: reshetovans@sibsau.ru

Аннотация. В ножевых размалывающих машинах, кроме течения волокнистой суспензии в узком зазоре между ножами ротора и статора, наблюдается интенсивное перетекание этой суспензии из ячеек статора в ячейки ротора и наоборот. При этом движение гарнитуры ротора относительно гарнитуры статора можно рассматривать как движение одной шероховатой поверхности относительно другой. Изучение движения волокнистой суспензии по шероховатой поверхности в ножевых размольных машинах представляет определенный интерес, как с точки зрения исследования процесса разработки волокнистой суспензии, за счет гидродинамических сил, и как исследование частного случая течения потока в гидромашинах.

Ключевые слова: размол, дисковая мельница, волокнистая суспензия, гидродинамика, хвойная целлюлоза, статор, ротор, шероховатая поверхность.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 3, P. 128–134

HYDRODYNAMICS OF FIBER SUSPENSION FLOW IN STATOR AND ROTOR CELLS OF A DISC REFINER DURING SOFTWOOD PULP REFINING

Yu. D. Alashkevich, N. S. Reshetova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: reshetovans@sibsau.ru

Abstract. In knife grinding machines, in addition to the flow of fibrous slurry in the narrow gap between the rotor and stator blades, there is an intense flow of this slurry from the stator cells to the rotor cells and vice versa. In this case, the movement of the rotor headset relative to the stator headset can be considered as the movement of one rough surface relative to another. The study of the movement of a fibrous suspension over a rough surface in knife grinding machines is of particular interest, both from the point of view of studying the process of developing a fibrous suspension due to hydrodynamic forces, and as a study of a special case of flow in hydraulic machines.

Keywords: refining, disc mill, fibrous slurry, hydrodynamics, coniferous pulp, stator, rotor, rough surface.

ВВЕДЕНИЕ

Размол волокнистой массы, предшествующий отливу бумаги, оказывает решающее влияние, как на процесс изготовления бумаги, так и на свойства готового продукта.

Лист бумаги, отлитый из неразмолотых волокнистых материалов, получается неудовлетворительным по своему строению, внешнему виду и физико-механическим свойствам. Он обладает неравномерным, облачным просветом, большой пористостью, пухлостью и малой прочностью.

Это происходит потому, что сравнительно длинные и грубые волокна сплетаются в хлопья и, оседая на

сетке, дают неоднородный по структуре лист. Неразмолотые волокна обладают малой пластичностью, слабо развитой поверхностью и мало гидратированы, вследствие чего такие волокна плохо связываются друг с другом в бумажном листе. На наш взгляд, главной целью размола волокнистых материалов является:

– придание волокнистому материалу определенной структуры в отношении размеров по длине и толщине, а также по фракционному составу, чтобы обеспечить желаемое строение и плотность бумажного листа;

– сообщение волокнистому материалу определенной степени гидратации – развитие поверхности, пла-

стичности и других свойств, от которых зависит создание в бумаге межволоконных сил связи и многие свойства бумаги: механическая прочность, объемный вес, впитывающая способность, воздухопроницаемость, прозрачность и другие.

Размол волокнистых материалов в бумажную массу производится в настоящее время на размалывающих аппаратах периодического и непрерывного действия – роллах, конических мельницах, рафинерах и специальных аппаратах для роспуска, рафинирования и размола массы. Независимо от типа размалывающего аппарата, принцип размола волокна в классических машинах примерно один и тот же.

Он заключается в том, что волокнистая суспензия непрерывным потоком поступает к ножам рабочего органа машины, состоящего из неподвижно закрепленных ножей статора или планки и вращающихся ножей, расположенных на барабане, конусе или диске (роторе).

ТЕЧЕНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ В ЯЧЕЙКАХ СТАТОРА И РОТОРА

Полагая, что при движении волокнистой суспензии в ячейках ротора и статора она подвергается разработке за счет гидродинамических сил, рассмотрим момент, когда при движении шероховатых поверхностей относительно друг друга ячейки статора перекрываются ячейками ротора (рис. 1).

Выбор такой модели течения волокнистой суспензии объясняется тем, что в этом случае имеют место наименьшие скоростные характеристики потока за счет резкого увеличения объема исследуемого пространства, следовательно, и наименьшие гидродинамические силы, действующие на волокно. Делаем следующие допущения:

1. Движение потока можно рассматривать как течение жидко-твердой среды, состоящей из воды и диспергированных в ней волокон, имеющий ньютоновский характер движения [1–5]. Ориентирование волокон по потоку приводит к отсутствию связей между ними. Волокна гасят поперечные пульсации чистой воды (причем тем интенсивнее, чем выше концентрация волокнистой суспензии). Исходя из этого, можем считать, что движение потока волокнистой суспензии в рабочей камере установки будет проис-

ходить в ламинизированном режиме с наличием турбулентных пульсаций.

2. Движение потока в межножевой ячейке происходит в направлении, перпендикулярном меридиональной плоскости рабочей камеры установки, то есть вектор осредненной скорости потока в ячейке между ножами направлен перпендикулярно боковой поверхности ножа гарнитуры.

3. Поток жидкости в межножевом зазоре имеет постоянную скорость. В действительности, за счет пульсаций давления при перекрытии ячеек, скорость непостоянна во времени, однако за счет высокой частоты перекрытий, происходит сглаживание пульсаций скорости в ячейке между соседними ножами.

Учитывая принятые нами допущения, а также, основываясь на теории гидродинамического подобия, можно полагать, что течение жидкости в рабочей камере установки сходно с течением жидкости по шероховатой поверхности или в канале за плохо обтекаемым телом, рассмотренным в работах [6–12].

Для гидравлических машин, к которым относятся и ножевые размалывающие машины, при установившемся течении потока условием гидродинамического подобия можно считать сходство критериев Рейнольдса и симплексов геометрического подобия – коэффициента стеснения потока $I = \frac{S}{h}$ (рис. 1) и со-

отношение $\frac{L}{\ell}$, характеризующего ячейку гарнитуры и плохо обтекаемое тело. Наиболее полно схема течения потока за плохо обтекаемым телом изложена в работе Г. И. Абрамовича [8].

Исходя из подобия схем течения потока (рис. 1) в канале за плохо обтекаемым телом и в ячейках статора установки можем считать, что в ячейке статора существует циркуляционная зона интенсивного смещения вследствие срыва расширяющейся струи с поверхности ножа статора. За счет отражения струи от стенки ячейки образуется зона обратного течения, причем величина обратной скорости потока определяется как скоростью сорванной струи, так и геометрическими параметрами ячейки статора [8].

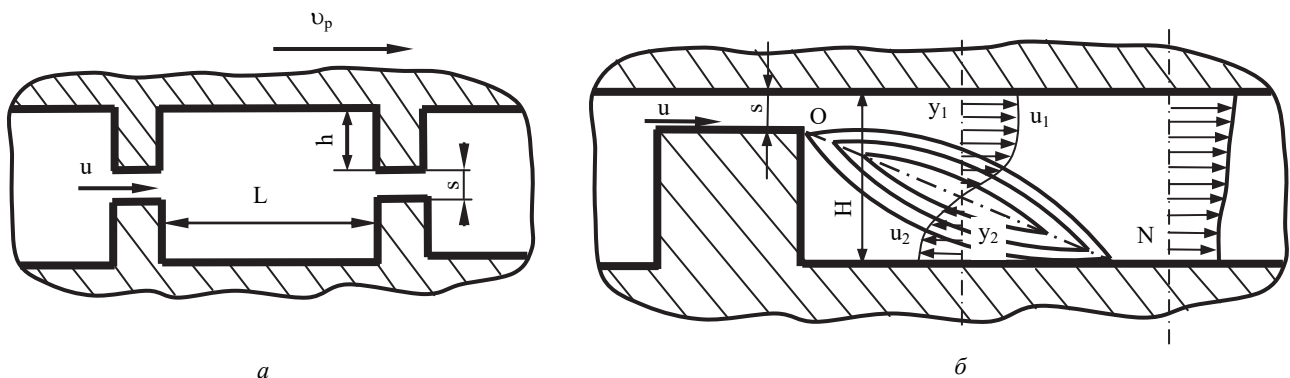


Рис. 1. Схема течения жидкости в ячейке:

а – для дисковой размалывающей машины; б – для плохообтекаемого тела (по Г. И. Абрамовичу)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА В ЯЧЕЙКАХ СТАТОРА УСТАНОВКИ

Для изучения профиля скорости потока волокнистой суспензии в циркуляционной зоне ячейки статора воспользуемся реологическим уравнением волокнистой суспензии и уравнением движения волокнистой суспензии в векторной форме в общем виде [1], которое спроектируем на оси прямоугольной системы координат:

на ось ОХ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ & = \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \times \\ & \times \left[e^{-\alpha_k} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \right]; \end{aligned}$$

на ось ОУ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ & = \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \times \\ & \times \left[\frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \right. \\ & \left. + e^{-\alpha_k} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) \right]; \quad (1) \end{aligned}$$

на ось ОZ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \\ & + \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \times \\ & \times \left[\frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + e^{-\alpha_k} \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Если к трем уравнениям в проекциях на оси прямоугольной системы координата (1) добавить уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

то они могут быть использованы для расчета поля скоростей в циркуляционной зоне ячейки статора.

Для решения задачи вводим следующие допущения:

1. Считаем движение суспензии в ячейке статора установившимся. Следовательно, можно принять,

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0.$$

2. Полагаем, что поток в ячейке имеет преобладание в направлении оси ОХ. Тогда можно пренебречь составляющими скорости по осям ОУ и ОZ, т. е. $v = w = 0$.

3. Массовыми силами в потоке можно пренебречь, т. е.:

$$\bar{F}_x = \bar{F}_y = \bar{F}_z = 0.$$

4. Поток является однородным по ширине и по ходу его движения, то есть, учитывая высокую диспергированность, имеем

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

В этом случае система уравнений движения жидкости значительно упрощается и приводится к виду

$$\left. \begin{aligned} 1. \quad 0 &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \frac{\partial u}{\partial y}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \\ 2. \quad 0 &= -\frac{\partial P}{\partial y}; \\ 3. \quad 0 &= -\frac{\partial P}{\partial z}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Второе и третье уравнения системы (3) говорят о постоянстве гидростатического давления по всей поверхности рассматриваемого сечения потока. Поэтому будем рассматривать профиль скорости, ограничившись первым уравнением системы (3), как предложено в [13].

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \frac{\partial u}{\partial y}} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (4)$$

С учетом обозначений $\frac{\partial u}{\partial x} = \gamma$, $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial \gamma}{\partial y}$, выражение (4) принимает вид

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial y} + \sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial y}. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$\sum_{k=1}^{n+1} -\alpha_k A_k \frac{1}{2} e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma}. \quad (6)$$

Получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma}. \quad (7)$$

Проинтегрируем уравнение (4)

$$\frac{\partial P}{\partial x} y = \frac{\mu}{2} \gamma + \sum_{k=1}^{n+1} A_k e^{-\frac{\alpha_k}{2} \gamma} + c, \quad (8)$$

для чего при разложении экспоненциальной функции в ряд ограничимся первыми двумя членами:

$$e^{-\frac{\alpha_k}{2}\gamma} \approx 1 - \frac{\alpha_k}{2}\gamma. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} y = \frac{\mu}{2} \gamma + \sum_{k=1}^{n+1} A_k - \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} \gamma + c_1. \quad (10)$$

Введем граничные условия: $y = 0$, то $\gamma = 0$, тогда из уравнения (10) имеем

$$c_1 = -\sum_{k=1}^{n+1} A_k. \quad (11)$$

Подставляя значение c_1 в уравнение (10), получим:

$$\frac{\partial P}{\partial x} y = \frac{\mu}{2} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2}. \quad (12)$$

При повторном интегрировании (12) имеем:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} y^2 = \frac{\mu}{2} u - u \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} + c_2. \quad (13)$$

Учитывая, что на линии нулевых расходов в циркуляционной зоне ячейки статора скорость равна нулю, введем граничные условия: если $y = \delta$, то $u = 0$, где δ – толщина пограничного слоя циркуляционной зоны. Тогда из уравнения (13) имеем

$$c_2 = \frac{dP}{2dx} \delta^2. \quad (14)$$

Подставляя c_2 в уравнение (13) и преобразуя его, получим:

$$\frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - \delta^2) = 2u \left(\frac{\mu}{2} - \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} \right). \quad (15)$$

Обозначив $\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\Delta P}{\ell}$ [6] и подставив в уравнение (15) значение $\frac{\partial P}{\partial x}$, получим

$$-\frac{\Delta P}{\ell} (y^2 - \delta^2) = 2u \left(\frac{\mu}{2} - \sum_{k=1}^{n+1} A_k \frac{\alpha_k}{2} \right). \quad (16)$$

Отсюда скорость движения волокнистой суспензии в циркуляционной зоне ячейки статора:

$$u = \frac{\Delta P \delta^2}{\ell \left(\mu - \sum_{k=1}^{n+1} \alpha_k A_k \right)} \left(1 - \frac{y^2}{\delta^2} \right). \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже упоминалось ранее, для волокнистых суспензий низкой концентрации (до 5 %) при достижении определенных значений градиентов скоростей, они будут двигаться аналогично ньютоновской жидкости, и её внутренние напряжения будут характеризоваться только вязкостным трением [1; 14–18].

В связи с этим, реологическое уравнение волокнистой суспензии (2) асимптотически приближается к прямой линии $\tau = \mu_T \gamma$, где γ – градиент скорости; μ_T – коэффициент динамической вязкости диспергированной суспензии.

С учетом этого, для отрывного двухмерного ламинарного потока профиль скорости в циркуляционной зоне ячейки статора можно представить с использованием метода Польгаузена [19]:

$$\frac{u}{u_1} = (2\eta - 3\eta^3 + \eta^4) + \left(\frac{\lambda}{\sigma} \right) (\eta - 3\eta^2 - \eta^4), \quad (18)$$

где u – скорость потока в пограничном слое циркуляционной зоны; u_1 – скорость потока выше границы пограничного слоя циркуляционной зоны.

$$\eta = \frac{y}{\delta} \leq 1, \quad (19)$$

где y – ордината точки в пограничном слое, для которой находится величина скорости; δ – толщина пограничного слоя в отрывном потоке.

Безразмерный параметр λ имеет смысл отношения сил давления к вязким силам, учитывает свойства конкретной жидкости, обтекающей тело

$$\lambda = \frac{\delta^2}{\nu} \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (20)$$

Для отрывных потоков воды величина λ принимается равной (–12) [9; 19]. Подтверждением того, что для диспергированного потока при больших градиентах скоростей волокнистая масса низкой концентрации ведет себя при течении аналогично воде [1], явились наши экспериментальные исследования [20]. При изучении скоростных характеристик течения воды, а также волокнистой массы концентрацией $C = 0,2$ и 2 % оказалось, что величины δ для воды и массы и величины $\frac{\partial u}{\partial x}$ для этих жидкостей равны.

Исходя из этого, можно полагать, что при отрывном характере течения потока величина λ определяется преимущественно вязкостными характеристиками жидкости. Следует подчеркнуть, что формула (18) имеет смысл только для пограничных слоев, ограниченных циркуляционной зоной (пространство $0-y_1-N-y_2-0$) (рис. 1), где прилипание жидкости ко дну ячейки не проявляется.

Профиль скорости в исследуемой зоне рабочей камеры установки (рис. 2) свидетельствует о наличии высоких градиентов скорости внутри этой зоны и, следовательно, значительных касательных напряжениях сдвига, являющихся функцией градиентов скорости

$$\tau = f(\gamma), \quad (21)$$

где τ – касательное напряжение сдвига; γ – градиент скорости потока.

Кроме касательных сдвиговых напряжений, в отрывном потоке имеют место турбулентные касательные напряжения, вызванные поперечными пульсациями скорости относительно осредненной скорости движения потока [8; 9; 19].

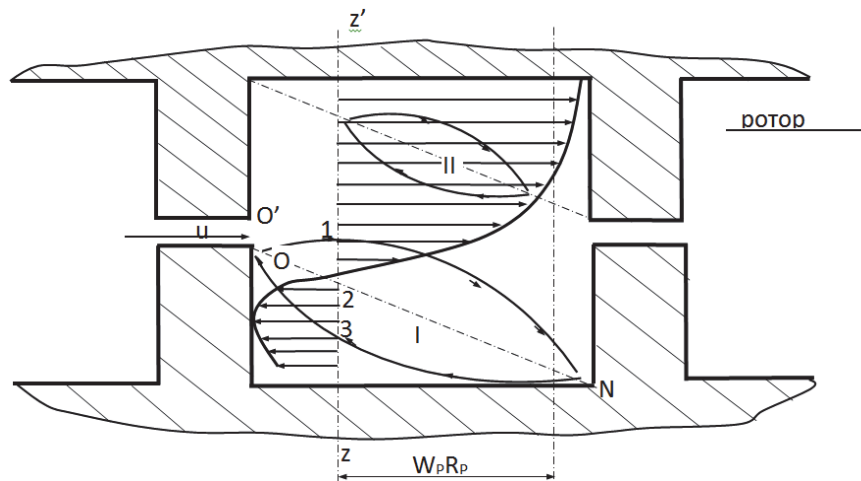


Рис. 2. Модель течения потока в рабочей камере установки:

1 – циркуляционная зона в ячейке статора; 2 – циркуляционная зона в ячейке ротора

Величины напряжений в потоке с интенсивным перемешиванием могут быть определены из выражения [1]

$$\tau_{\text{турб}} = (T + \mu)\gamma, \quad (22)$$

где T – динамический коэффициент турбулентного перемешивания потока, который согласно [8] оценивается величиной обратной скорости потока и во много раз превосходит величину μ .

Исходя из проведенных нами экспериментальных исследований, величина γ для воды и волокнистой массы $c = 0,2$ и 2% отличается незначительно, как и максимальные обратные скорости потока.

Отсюда можно заключить, что $\tau_{\text{турб}}$ для волокнистых масс в исследованном нами диапазоне концентраций ($c = 0,2 \div 2\%$) можно оценивать по величине $\tau_{\text{турб}}$ для воды.

Для расчета $\tau_{\text{турб}}$ в отрывной расширяющейся струе воспользуемся методом, предложенным Бруссиным [19] по аналогии с ньютоновским законом трения в ламинарном потоке:

$$\tau_{\text{турб}} = \rho \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (23)$$

где ε – коэффициент кинематической вязкости потока.

Согласно теории отрывных потоков, предложенной Прандтлем [9] величина ε определяется из уравнения

$$\varepsilon = xb(u_m - u_n), \quad (24)$$

где b – толщина циркуляционной зоны, определяемая из выражения $b = (y_1 - y_2)$ (рис. 1); u_m – величина скорости потока на границе пограничного слоя; u_n – величина обратной скорости потока в циркуляционной зоне; x – эмпирическая постоянная, взятая из теории Прандтля [8], равная $0,0088$.

Для зоны смешения при определении $\tau_{\text{турб}}$ необходимо получить величину E , эквивалентную коэффициенту кинематической вязкости и называемую коэффициентом турбулентной вязкости E [9].

$$E = 1,25 \cdot 10^{-3} \frac{(u_1 - u_2)^2}{u_1 - u_2} x, \quad (25)$$

где x – координата по длине зоны смешения.

Тогда

$$\tau_{\text{турб}} = \rho E \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (26)$$

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА В ЯЧЕЙКАХ РОТОРА УСТАНОВКИ

Сделаем следующие предположения:

1. Течение жидкости в ячейках ротора, как и в ячейках статора, имеет диспергированный характер в связи с высоким градиентом скорости потока. Возможные модели течения потока в ячейках ротора представлены на рис. 2.

2. Скорость вращения ротора v_p значительно выше осредненной скорости течения потока волокнистой массы в межножевом зазоре u_1 .

При этом в ячейке ротора за счет срыва потока с ножа будет иметь место циркуляционная зона, направление вращения которой будет противоположно направлению осредненной скорости потока u_1 . Интенсивность смешения в этой зоне определяется величиной $\Delta u = (v_p - u_1)$.

Предполагаемый профиль скорости потока в ячейке ротора для рассматриваемого случая представлен на рис. 2. При этом максимальное гидродинамическое воздействие на волокно оказывается в ячейках ротора и статора, градиент скорости потока в межножевом зазоре будет значительно ниже вследствие того, что вихрь в ячейке ротора вращается в сторону, противоположную направлению скорости в межножевом зазоре.

3. Величина v_p незначительно выше скорости u_1 . При этом в ячейке ротора будет существовать циркуляционная зона слабой интенсивности, либо ее не будет совсем. Характер течения потока в ячейке ротора будет определяться скоростью вращения ротора, и эпюра скоростей в рассматриваемой зоне будет иметь вид, представленный на рис. 2. Гидродинамическое воздействие на волокно осуществляется в ячейках статора и межножевом зазоре установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Течение волокнистой суспензии в ячейках статора представляет собой отрывное обтекание шероховатой поверхности с образованием циркуляционных зон интенсивного смешения. В ячейках ротора циркуляционные зоны характеризуются слабой интенсивностью.

2. На основании теоретического анализа течения волокнистой суспензии в циркуляционных зонах ячеек статора и ротора, определены скоростные характеристики и возникающие при этом касательные напряжения, которые могут оказать определенное воздействие на разработку волокна.

3. Первоначально сделанные предположения о возможном механизме разрушения волокон за счет гидродинамических сил, возникающих при течении волокнистой суспензии в рабочих органах ножевых машин, дополнительно подтверждаются проведенным теоретическим анализом скоростных и силовых характеристик при течении волокнистой суспензии в ячейках между ножами гарнитуры дисковой мельницы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М. : Лесная пром-сть, 1980. 248 с.
2. Непенин Ю. Н. Технология целлюлозы. В 3 т. Т. 2. Производство сульфатной целлюлозы : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. М. : Лесная пром-сть, 1990. 600 с.
3. Гаузе А. А., Гончаров В. Н., Кугушев И. Д. Оборудование для подготовки бумажной массы : учебник для вузов. Москва : Экология, 1992. 352 с.
4. Пузырев С. С., Коростелев С. А., Ковалева О. П. Размол при низкой концентрации // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. № 5. С. 54–58.
5. Фляте Д. М. Свойства бумаги. СПб. : Лань, 2012. 384 с.
6. Крюков В. Н., Солнцев В. П. Исследование теплообмена на шероховатой пластине // Тепло- и массоперенос : сб. тр. Минск, 1972. Т. 1, ч. 1. С. 57–61.
7. Смирнов Л. В. Характеристика пульсаций давления в зоне отрывного напорного потока // Труды НИИ Гидропроект. 1972. Сб. 23. С. 84–93.
8. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960. 715 с.
9. Николаев Н. А., Харин В. Ф. Гидродинамические закономерности пленочного течения жидкости по шероховатой поверхности // Теоретические основы химической технологии. 1974. Т. 8, № 5. С. 712–719.
10. Островский Г. М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб. : Наука, 2000. 359 с.
11. Войнов Н. А., Фролов А. С., Жукова О. П. Анализ параметров обратных токов и газосодержания в жидкости за выступом шероховатости // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53, № 2. С. 160–167.
12. Method for Intensive Gas-Liquid Dispersion in a Stirred Tank / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova [et al.] // ChemEngineering. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 30. DOI: 10.3390/chemengineering7020030.

13. Bill F., Stiwens K. Theorie und Praxis des Mahlens // Wochenblatt fur Papierfabrikation. Berlin, 1911. S. 47–48.

14. Алашкевич Ю. Д., Кугушев И. Д. К вопросу об исследовании процесса размола бумажной массы на ножевых размалывающих машинах // Краткие сообщения / ЛТИ им. Ленсовета. Секция инженерной химической техники. Ленинград, 1970. С. 13–15.

15. Алашкевич Ю. Д., Селедчик В. В., Кугушев И. Д. Гидродинамика процесса размола на ножевых размалывающих машинах // Сб. тр. ЦНИИБ. 1971. Вып. 6. С. 181–188.

16. Теоретическое исследование процесса измельчения материала в рабочей камере дисковой мельницы / И. А. Семикопенко, В. П. Воронов, Д. А. Беляев, Е. А. Бороздин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 11. С. 125–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131

17. Алашкевич Ю. Д., Решетова Н. С. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли : учеб. пособие. Красноярск : СибГТУ, 2015. 317 с.

18. Петрова А. А., Алашкевич Ю. Д., Воронин И. А. Влияние рисунка комбинированной гарнитуры дисковой мельницы на отдельные бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов и физико-механические характеристики готового продукта // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 429–435. DOI: 10.14258/jcprm.20230412552

19. Чжен П. Отрывные течения. В 3 т. / пер. с англ. под ред. А. Ю. Ишлинского. Москва : Мир, 1972. Т. 1–2. 552 с.

20. Гидродинамические явления при размолке волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах : монография / Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова, В. П. Барановский, Л. В. Кутовая. Красноярск : СибГТУ, 2003. 176 с.

REFERENCES

1. Terent'ev, O. A. Gidrodinamika voloknisty'x suspenzij v cellyulozno-bumazhnom proizvodstve. M. : Lesnaya prom-st', 1980. 248 s.
2. Nepenin Yu. N. Tekhnologiya cellyulozy'. V 3 t. T. 2. Proizvodstvo sul'fatnoj cellyulozy' : ucheb. posobie dlya vuzov. 2-e izd., pererab. M. : Lesnaya prom-st', 1990. 600 s.
3. Gauze A. A., Goncharov V. N., Kugushev I. D. Oborudovanie dlya podgotovki bumazhnoj massy' : uchebnik dlya vuzov. M. : E'kologiya, 1992. 352 s.
4. Puzy'rev S. S., Korostelev S. A., Kovaleva O. P. Razmol pri nizkoj koncentracii // Cellyuloza. Bumaga. Karton. 2006. № 5. S. 54–58.
5. Flyate D. M. Svoystva bumagi. SPb. : Lan', 2012. 384 s.
6. Kryukov V. N., Solncev V. P. Issledovanie teploobmena na sheroxovatoj plastine // Teplo- i massopereenos : sb. tr. Minsk, 1972. T. 1, ch. 1. S. 57–61.
7. Smirnov L. V. Karakteristika pul'sacij davleniya v zone otr'yvnogo napornogo potoka // Trudy' NII Gidroproekt. 1972. Sb. 23. S. 84–93.
8. Abramovich G. N. Teoriya turbulentny'x struj. M. : Fizmatgiz, 1960. 715 s.
9. Nikolaev N. A., Xarin V. F. Gidrodinamicheskie zakonomernosti plenochного techeniya zhidkosti po

sheroxovatoj poverxnosti // Teoreticheskie osnovy` ximicheskoy texnologii. 1974. T. 8, № 5. S. 712–719.

10. Ostrovskij G. M. Prikladnaya mexanika neodnorodny`x sred. SPb. : Nauka, 2000. 359 s.

11. Vojnov N. A., Frolov A. S., Zhukova O. P. Analiz parametrov obratny`x tokov i gazosoderzhaniya v zhidkosti za vy`stupom sheroxovatosti // Teoreticheskie osnovy` ximicheskoy texnologii. 2019. T. 53, № 2. S. 160–167.

12. Method for Intensive Gas–Liquid Dispersion in a Stirred Tank / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova [et al.] // ChemEngineering. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 30. DOI: 10.3390/chemengineering7020030

13. Bill F., Stiwen K. Theorie und Praxis des Mahlens // Wochenblatt fur Papierfabrikation. Berlin, 1911. S. 47–48.

14. Alashkevich Yu. D., Kugushev I. D. K voprosu ob issledovanii processa razmola bumazhnoj massy` na nozhevy`x razmaly`vayushhix mashinax // Kratkie soobshheniya / LTI im. Lensoвета. Sekciya inzhenernoj ximicheskoy texniki. Leningrad, 1970. S. 13–15.

15. Alashkevich Yu. D., Seledchik V. V., Kugushev I. D. Gidrodinamika processa razmola na nozhevy`x razmaly`vayushhix mashinax // Sb. tr. CzNIIB. 1971. Vy`p. 6. S. 181–188.

16. Teoreticheskoe issledovanie processa izmel`cheniya materiala v rabochej kamere diskovoj mel`nicy / I. A. Semikopenko, V. P. Voronov, D. A. Belyaev, E. A. Borozdin // Vestnik BGTU im. V. G. Shuxova. 2020. № 11. S. 125–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131.

17. Alashkevich Yu. D., Reshetova N. S. Teoriya i konstrukciya mashin i oborudovaniya otrasli : ucheb. Posobie. Krasnoyarsk : SibGTU, 2015. 317 s.

18. Petrova A. A., Alashkevich Yu. D., Voronin I. A. Vliyanie risunka kombinirovannoj garnitury` diskovoj mel`nicy na otdel`ny`e bumagoobrazuyushhie svoystva voloknisty`x polufabrikatov i fiziko-mexanicheskie xarakteristiki gotovogo produkta // Ximiya rastitel`nogo sy`r`ya. 2023. № 4. S. 429–435. DOI: 10.14258/jcprm.20230412552

19. Chzhen P. Otry`vny`e techeniya. V 3 t. / per. s angl. pod red. A. Yu. Ishlinskogo. M. : Mir, 1972. T. 1–2. 552 s.

20. Gidrodinamicheskie yavleniya pri razmole voloknisty`x polufabrikatov v nozhevy`x razmaly`vayushhix mashinax : monografiya / Yu. D. Alashkevich, N. S. Reshetova, V. P. Baranovskij, L. V. Kutovaya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 176 s.

© Алашкевич Ю. Д., Решетова Н. С., 2026

Поступила в редакцию 01.04.2026

Принята к печати 26.06.2026