

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 676.16.024.61

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-5-94-103

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 5. С. 94–103

РОЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ РАЗМОЛЕ ВОЛОКНИСТЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Ю. Д. Алашкевич, Л. В. Юртаева, Р. А. Марченко, 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: 2052727@mail.ru

Аннотация. В работе представлен анализ гидродинамических воздействий при течении волокнистых суспензий на процесс размола волокнистых растительных полуфабрикатов при использовании ножевых размольных машин.

В рабочем зазоре между ножами ротора и статора процесс размола можно уподобить процессу смазки маслом трущихся металлических поверхностей. При течении волокнистой суспензии в ячейках ротора и статора гарнитуры можно сравнить как течение ньютоновской жидкости по шероховатой поверхности ножевой гарнитуры.

Ключевые слова: размол, волокнистая суспензия, смазка маслом, трущиеся поверхности, вязкость, давление, зазор, ножи ротора и статора, степень помола.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 5, P. 94–103

THE ROLE OF HYDRODYNAMIC EFFECTS IN THE GRINDING OF FIBROUS PLANT POLYMERS

Y. D. Alashkevich, L. V. Yurtaeva, R. A. Marchenko, N. S. Reshetova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: 2052727@mail.ru

Annotation. The paper presents an analysis of the hydrodynamic effects during the flow of fibrous suspensions on the process of grinding fibrous vegetable semi-finished products using knife grinding machines.

In the working gap between the rotor and stator blades, the grinding process can be likened to the process of oiling rubbing metal surfaces. The flow of a fibrous suspension in the cells of the rotor and stator of the headset can be compared as the flow of a Newtonian fluid over the rough surface of a knife headset.

Keywords: grinding, fibrous suspension, oil lubrication, rubbing surfaces, viscosity, pressure, gap, rotor and stator knives, degree of grinding.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс размола представляет собой крупную технико-экономическую проблему целлюлозно-бумажного производства. В связи с этим очевидна актуальность работ, посвященных созданию новых видов размольного оборудования, модернизации существующих машин, выбору и разработке рациональных технологических схем размола. Решение этих проблем связано с глубоким изучением механизма размола массы при течении ее в рабочих органах размольных машин [1; 2].

На целлюлозно-бумажных предприятиях наибольшее распространение в настоящее время получили ножевые размалывающие машины. Однако, не-

смотря на значительный прогресс в технике размола и совершенствовании оборудования, многие явления, происходящие в машинах, остаются недостаточно изученными. До настоящего времени нет единого мнения о механизме процесса размола в ножевых размалывающих машинах, не выявлены качественные и количественные показатели размола, а в связи с этим нет достаточно четкого обоснования конструктивных параметров машин [3]. Объясняется это тем, что при проектировании и конструировании размольных машин в настоящее время, как и прежде, в основном учитываются механические воздействия ножевой гарнитуры. Гидродинамические же явления, происходящие с волокнистой суспензией при перемещении ее

в рабочих органах машин в процессе размола многие исследователи ошибочно считают вредными, и энергия, затрачиваемая при этом, считается полностью потерянной. В результате коэффициент полезного действия размольных машин искусственно занижается.

Создание высокоэффективных размольных машин с оптимальными параметрами работы невозможно без объективной оценки качества помола [4–6]. Имеющиеся отдельные показатели оценки качества помола (степень помола по ШПР, изменение длины волокна, поверхность размола и другие) не дают объективной картины существа процесса. Необходим обобщающий параметр оценки качества помола, который бы объединял в себе отдельные, основные показатели, используемые на практике, в том числе и бумагообразующие свойства волокнистой массы. Необходима также количественная взаимосвязь между свойствами целлюлозы и свойствами готовой бумаги с учетом технологических и конструктивных особенностей размольных машин.

В связи с этим представляют определенный научный и практический интерес теоретические и экспериментальные исследования гидродинамических явлений при разработке волокнистых суспензий в ножевых размольных машинах и получение обобщенного критерия оценки качества помола волокнистой массы. Оценка эффективности воздействия гидродинамических сил на волокно.

Процесс размола волокнистой массы как процесс смазки маслом трущихся металлических поверхностей. Для роллов и тихоходных цилиндрических и конических мельниц основной разрушающей силой в процессе размола, по-видимому, является механическое воздействие на волокно кромок ножей ротора и статора. Так, во всяком случае, утверждают известные исследователи в области размола растительных материалов, среди которых Сигурд Смит, Г. Ягенберг, Н. Гранд, С. Майлн [7].

Основываясь на их воззрениях, правомерными становятся и некоторые расчеты с определением основных технологических характеристик размалывающих машин: «секундная режущая длина», поверхность размола (размалывающая поверхность), «секундная размалывающая способность», производительность размалывающих машин. С точки зрения их взглядов, процесс размола увязывается с практикой определения геометрических параметров гарнитуры. Так, при всех прочих равных условиях качество помола массы в ролле зависит от ширины ножей гарнитуры. С увеличением ширины ножей качество помола повышается. С этих позиций правомерными становятся понятия «коэффициента ужирнения», режущей и гидратирующей способности ролла, показателя барабана, числового коэффициента Майлна, числа гидратации, и другие [8]. Но как только скорость вращения ротора размольной машины превышает определенный предел, то присущие для конических гидрофайнеров и дисковых рафинеров, все вышеназванные закономерности теряют свое значение, становятся недостоверными. Видимо, поэтому, одним из основных фактов, влияющих на качество помола растительных полуфабрикатов, является величина окру-

ной скорости вращения ротора. Не зря ряд исследователей, при рассмотрении процесса размола отдают предпочтение характеру циркуляционных явлений в рабочей зоне гарнитуры ножевых размалывающих машин [7–10].

Интересно и своеобразно рассматривает механизм размола волокнистой массы Же Ле Флох [3]. За основную разрушающую силу при размоле он берет силу вязкостного трения. Же Ле Флох отмечает, что истинная сущность процесса размола целлюлозы до настоящего времени остается неизвестной. Вся техническая литература, относящаяся к этому вопросу, насыщена расплывчатыми терминами. Мнения практиков бумажной промышленности разнообразны и часто противоречивы. Тем не менее, повсеместно принято считать, что этот процесс чисто физический. Видоизменения химического характера целлюлозы происходят лишь после того, как произошло фибриллирование волокон. Для того, чтобы вызвать такую разработку волокон имеющих очень малые размеры (толщина волокон порядка сотой доли миллиметра) необходимо, считает Же Ле Флох, привести в действие силы вязкостного трения

$$\overline{dF} = \mu \frac{dV}{dn} \cdot dS,$$

где μ – коэффициент вязкости; $\frac{dV}{dn}$ – градиент нормальной скорости у стенок канала.

Основываясь на общих понятиях о течении жидкости в каналах, Же Ле Флох дает характеристику коэффициента вязкости μ , при этом он говорит, что μ зависит от температуры массы и ее концентрации. На рис. 1 показано изменение коэффициента вязкости массы μ в зависимости от ее концентрации. Из работы неясно, как найдена зависимость μ от концентрации массы. Он считает, что фибриллированию волокон благоприятствует понижение температуры.

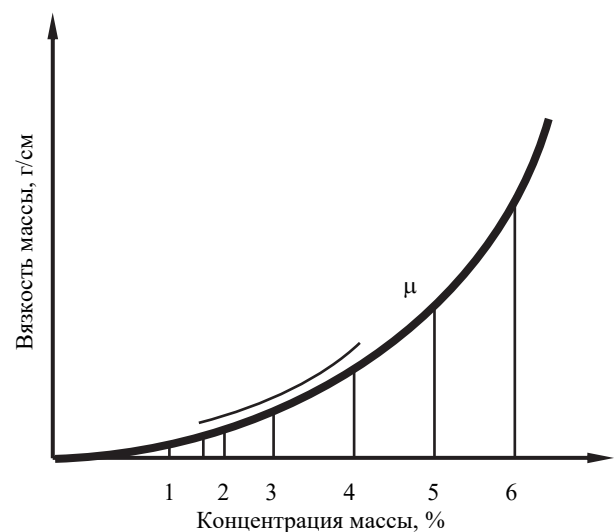


Рис. 1. Изменение коэффициента вязкости массы μ от её концентрации

Часто используемые допущения «о прилипании» частиц вязкой жидкости к стенкам при течении ее

в каналах были применены Же Ле Флох при создании его теории. Причем эти допущения были им проверены для ламинарного и турбулентного режимов. Он пишет: «Если рассматривать вязкую жидкость, движущуюся в канале, то слой жидкости, находящийся в непосредственном контакте со стенкой, можно рассматривать как неподвижный, тогда как два соседних слоя обладают скоростями, возрастающими от нуля до u . Рассматривая влияние движения суспензии у стенок канала, Же Ле Флох указывает, что турбулентный режим вызывает значительные градиенты скоростей, а, следовательно, и возрастание сил вязкостного трения, поэтому Же Ле Флох большое внимание уделяет циркуляции жидкости в роторе, в статоре и в зазоре между ротором и статором. Он считает, что ротор выполняет тройную функцию: перемещает жидкость, создает турбулентное движение в статоре и разрезает волокна.

Траектория движения частицы жидкости в статоре представляет геликоидальное движение, абсолютное значение скорости которого представляет собой геометрическую составляющую скорости циркуляции и скорости, сообщенной ударом частиц на выходе из ротора. Последняя составляющая и создает турбулентное движение в статоре. И, наконец, при движении массы в зазоре между ножами ротора и статора создаются весьма большие силы вязкостного трения, так как зазор очень мал.

Же Ле Флох считает, что его теория, по-видимому, совпадает с данными практики и основана на действии сил вязкостного трения волокон целлюлозы в водной суспензии.

Для объяснения сложных явлений, происходящих в процессе размола, ряд советских исследователей [11; 12] привлекли упруго-вязкие свойства целлюлозы. По их мнению, явления размола волокнистых материалов следует рассматривать с учетом работы размольной машины, процесса механического размельчения упруго-вязкого тела и диспергирования коллоидного капиллярно-пористого вещества.

На основании полученных данных они объясняют процесс размола следующим образом. При размоле целлюлозы в воде процесс фибриллирования волокон является результатом работы их на «усталость»: волокна последовательно подвергаются воздействию сжатия, сдвига, удара и тому подобное.

Способность волокон противостоять указанным воздействиям и не разрушаться будет зависеть не только от давления, но и от соотношения скорости приложения нагрузки и скорости релаксации целлюлозы, попадающей в промежутки между ножами размалывающих органов машины. Доказано [13], что увеличение скорости и частоты приложения напряжения даже при снижении до определенного предела удельного давления при размоле вызывает сокращение продолжительности размола целлюлозы и содействует получению более длиноволокнистой массы и значительному упрочнению бумаги.

Авторы ряда исследований, в том числе Г. Ренс рассматривают размол как процесс смазки маслом трущихся металлических поверхностей [14]. Г. Ренс пишет, что зависимость механики процесса размола

от рода массы, наряду с общими соображениями, уже в довольно ранней стадии навела на мысль – рассматривать размол, главным образом, как процесс смазки, назначение которой состоит в том, чтобы изменить требуемым образом свойства самого смазочного вещества. По мнению автора, это не просто аналогия: масса действительно создает слой смазки между движущимися частями ролла, и стабильность этого слоя, то есть способность выдерживать давление, зависит, по-видимому, от конструкции, несущей этот слой поверхности и каналов, по которым течет смазочное вещество, равно как и от внутренних свойств массы, производящей смазывание.

Как полагает Г. Ренс, его работа впервые создала надлежащий количественный базис опытных данных по этому вопросу. Г. Ренс качественно сравнивает процесс размола массы с процессом смазки металла маслом. При смазке металлов маслом в подшипниках наблюдаются две фазы [15]: жидкостная (гидродинамическая) и граничная. Аналогичную картину обнаружил Г. Ренс при размоле массы. Для наглядного представления этого он сравнивает график зависимости

коэффициента трения μ от значения $\frac{ZN}{P}$ для полнотью закрытой цапфы подшипника (рис. 2) и кривую зависимости μ от z для быстроходного рафинера (рис. 3), где z – вязкость смазочного вещества; N – скорость вращения вала; P – механическое давление.

Для подшипника Z и N полагают величинами постоянными, при этом условии возможно сравнение графиков (рис. 2 и 3).

Сходство между двумя графиками примечательно, и хотя, оно неполно, отмечает автор, едва ли позволяет сомневаться в том, что мы имеем дело с процессом смазки, непосредственно сходным с процессом смазки металла маслом. Единственное существенное различие между типичными кривыми смазки массой и маслом в том, что в первом случае коэффициент трения во время кажущейся фазы жидкостной смазки остается постоянным вместо того, чтобы уменьшаться с повышением давления, как это наблюдается в фазе жидкостной смазки маслом. Это различие в кривых Г. Ренс объясняет неправильным определением давления P в процессе размола. Он пишет: «Возможно, однако, что непосредственное определение P в процессе размола в быстроходном рафинере могло бы дать несколько иную картину».

При работе размалывающей машины в условиях жидкостного трения, близких к граничным, то есть в условиях большого давления, производится фибрилляция волокна без значительного его укорочения. Когда зазор при гидродинамической смазке уменьшается до порядка толщины одного волокна, оно не выдерживает увеличения давления и разрушается. Предполагается, что в зависимости от вида волокна (способность к разрушению) наступает режим для граничного или сухого трения. В режиме сухого трения размалывающая машина фактически не обрабатывает волокно, а истирает контактирующие поверхности.

Г. Ренс объясняет некоторые вопросы процесса размола, наблюдаемые в практике с точки зрения своей теории. Он, спрашивает, например, почему кони-

ческая мельница дает большую интенсивность резания волокон по сравнению с быстроходным рафинером и объясняет это так: «Причина, по нашему мнению, состоит в том, что коническая мельница работа-

ла в условиях разрушения слоя смазки, то есть, с таким давлением и окружной скоростью, что при данной конструкции и форме ножей поддержание стабильного слоя смазки было невозможно».

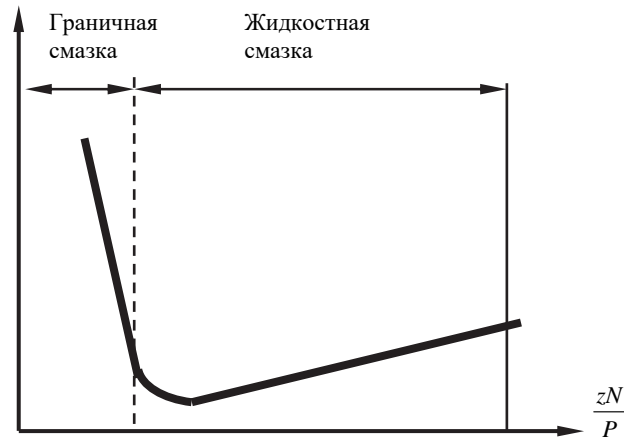


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от давления для трущихся со слоем смазки металлических поверхностей

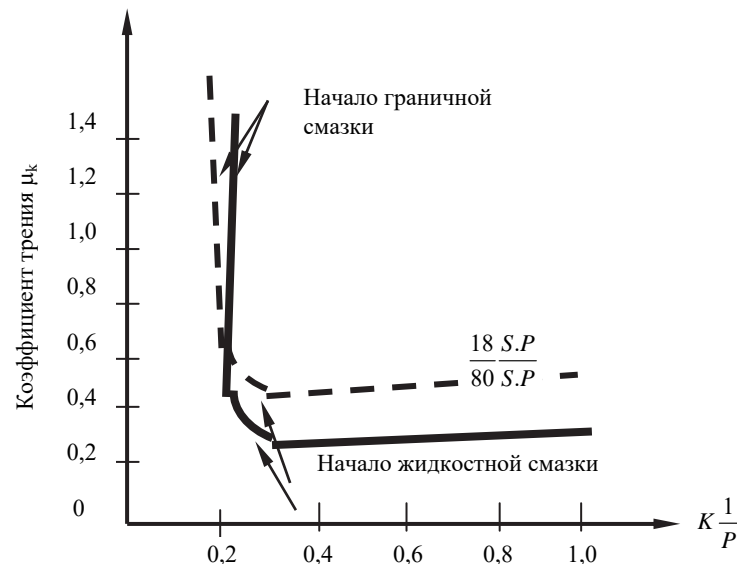


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от давления для быстроходных рафинеров по Г. Ренсу

Касаясь влияния окружной скорости на качество получаемой массы при размоле, Г. Ренс увязывает ее с поддержанием слоя смазки, при этом он ссылается на работы Л. Коттралла [16], который обнаружил зависимость между величиной зазора G и окружной скоростью ротора S , причем полученный результат выражается формулой $G = S^{2,5}$.

Следовательно, Л. Коттралл в своей работе обнаружил всплывание барабана на жидкости за счет создаваемого гидродинамического давления. А эффект всплывания является прямым подтверждением некоторой аналогии гидродинамических явлений, происходящих в зазоре между ножами ротора и статора размольных машин в процессе размола массы с процессом гидродинамической смазки подшипников. Указывая на важность эффекта всплывания трущихся поверхностей при их смазке, А. Н. Зайцев [17] говорит следующее: «Самым главным выводом гидро-

намической теории трения при полной смазке является то, что несущие нагрузку ползун или сегмент, или цапфа должны всплывать на масле.

Только при гидравлическом плавании на масле достигается чисто жидкостное вязкостное трение, обеспечивающее развитие «несущей силы», благодаря росту гидродинамического давления в масляном клиновом зазоре». Н. А. Слезкин [18] по этому поводу пишет: «...Таким образом, основной эффект смазки при переменной толщине слоя заключается в образовании поддерживающей силы, которая по порядку своей величины больше результирующей силы трения».

С точки зрения своей теории Г. Ренс объясняет также энергетические параметры размольных машин.

Основываясь на работах Г. Ренса, Д. Далзелла и М. Халмэ, В. Г. Марков [19] в результате своих экспериментов заметил, что при вылегчивании барабана

между рабочими поверхностями ножей барабана и пленки образуются зазоры различных размеров. При этом величине зазора по дуге охвата барабана планкой можно придать разный характер (рис. 4). Он обнаружил, что характер зазора оказывает большое влияние на результат размола.

Эти выводы В. Г. Маркова также подтверждают взгляды ряда исследователей [14–16], что гидродинамические явления, возникающие в процессе размола массы в размольных машинах, можно сравнить с процессом гидродинамической смазки подшипников. Объясняется это следующим. С изменением формы зазора меняется угол наклона между рабочими поверхностями ножей, барабана и планки.

В то же время из гидродинамической теории смазки известно, что угол наклона между трущимися поверхностями оказывает существенное влияние как на величину гидродинамического давления, возникающего между этими поверхностями, так и на поддерживающую силу [18].

Исследование течения суспензии в зазоре между вращающимися и неподвижными дисками мельницы и его влияние на осевые силы выполнены в работах [17–19]. Авторы теоретически проанализировали распределение гидродинамических давлений в зазоре между дисками на основе теории пограничного слоя и сравнили результаты с экспериментальными данными. В результате получена достаточно удовлетворительная сходимость.

Гидродинамические явления при течении волокнистой суспензии в ячейках гарнитуры. Как уже упоминалось ранее в работах [9; 14], исследователи связывают производительность ножевой размольной машины и качество размола массы со скоростью циркуляции волокнистой суспензии в рабочих органах машин. Причем высказывается мысль, что эта скорость оказывает положительное воздействие не только в зоне зазора между ножами ротора и статора, но и в промежутках между ножами, то есть в ячейке и на статоре, и на роторе [7; 9; 10; 13]. Следовательно, представляет интерес анализ работ, посвященных исследованию гидродинамических явлений, имеющих место при течении жидкости в ячейках гарнитуры.

Многие исследователи [7; 20–23], рассматривая процесс размола волокон в ножевых размалывающих машинах, справедливо указывают, что разمول за счет прямого силового воздействия ножевой гарнитуры имеет место при зазорах, сравнимых с толщиной волокна. При больших зазорах в действие вступают силы, отличные от сил механического воздействия ножей гарнитуры.

Как указывал Д. Баркас [21] «вода при попадании в захват между ножами быстро получает ускорение, а при выходе из него – замедление. В результате в жидкой среде появляются напряжения, которые в свою очередь передаются каждому волокну, находящемуся в суспензии. Силы, действующие на волокно во время размола, изменяются в широком диапазоне от самых слабых, когда скорость или градиент ускорения воды вокруг волокна мал, до более значительных, в областях турбулентного или вихревого течения».

Интересное предложение о гидродинамическом воздействии на волокно в размалывающих ножевых машинах высказал Я. Пав [20]. Он считал, что при относительно больших зазорах между ножами ротора и статора часть массы интенсивно обрабатывается в зазоре. Рассматривая силы, действующие в зазоре между ножами на частичку массы, Я. Пав приходит к выводу, что поток в зазоре подчиняется закону завихрения, то есть циркуляции. В этом случае, когда в процессе работы масса полностью или частично покрывает сечение зазора, между ножами возникает эффект пульсации.

Важным фактором работы размольного органа, считает Н. Гранд [21], является «транспортирующий поток». Однако не вся масса образует этот «транспортирующий поток». Большая часть находится между ножами барабана. Эта часть массы и является средой, в которой возникает центробежная сила, способствующая размолу. Масса, заключенная между ножами барабана, удерживается выступами, препятствующими ее выходу. В этой массе возникает сильное турбулентное движение, волокна энергично трутся друг о друга (авторабота), в результате чего разделяются пучки волокон и фибриллируются отдельные волокна. Это происходит независимо от резания.

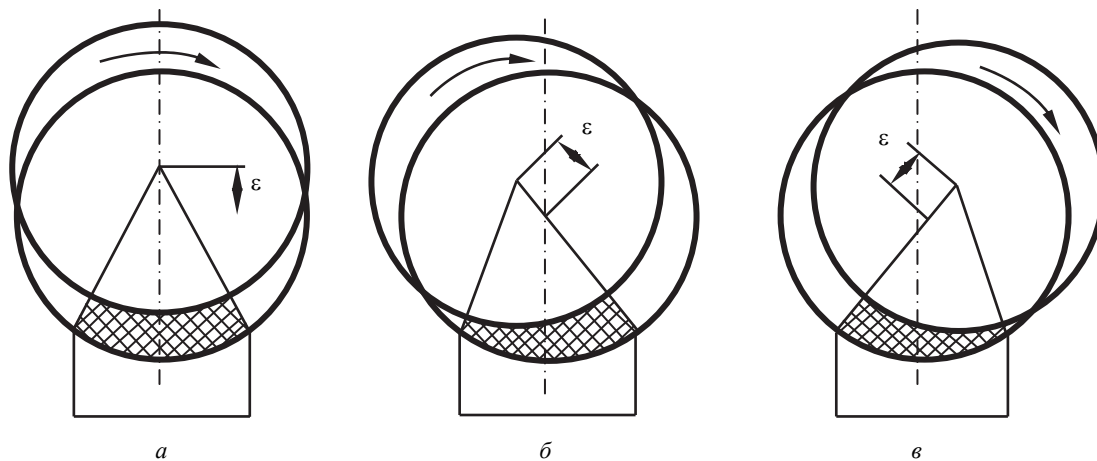


Рис. 4. Образование различных форм зазоров в роллах:

а – симметричный; *б* – серповидный, с максимальным значением на входе и с минимальным на выходе массы; *в* – серповидный, с минимальным значением на входе и максимальным на выходе

Чем плотнее масса, тем сильнее выражен эффект «автороботы», так как волокна тесно прижимаются друг к другу. Если выступы ножей становятся меньше определенного значения, промежутки между ножами целиком заполняются массой, пульсирующего потока возникать не будет, центробежная сила становится постоянной и размол в промежутке между ножами не происходит. Н. Гранд указывает, что наиболее благоприятные условия для гидродинамических воздействий на волокно возникают при высоте ножа не менее 2,5 мм.

В соответствии с работами О. А. Терентьева [24] известно, что волокнистая суспензия при наращивании скоростей движения, начиная от состояния покоя, проходит через несколько стадий внутреннего структурообразования. В состоянии покоя волокнистая суспензия образует пространственную сетчатую структуру. При этом сцепление между волокнами осуществляется, в основном, за счет механических сил трения.

При малых скоростях движения переплетенные волокна образуют структурированный слой (стержень), который движется внутри потока. И наконец, при дальнейшем увеличении скорости потока стержень разрушается полностью, поток становится диспергированным.

В диспергированном потоке будут действовать силы вязкостного трения, характерные для ньютоновской жидкости [24]. Учитывая это, можно предположить, что процесс течения волокнистой суспензии по гарнитуре ножевых размольных машин можно уподобить движению жидкости по поверхности с сильно развитой шероховатостью или движению потока в канале за плохо обтекаемым телом. Тогда можно объяснить, за счет чего осуществляется размол волокнистой суспензии при тчении ее в ячейках ротора и статора.

Как указывал Л. Прандтль [25], внутри элементов шероховатой поверхности интенсивность турбулентного перемешивания во много раз превосходит интенсивность турбулентного перемешивания набегающего потока и зависит в первую очередь от соотношения высоты элемента шероховатости и расстояния между эти элементами.

Один из изучаемых видов препятствия (рис. 5), который исследовали В. Е. Накоряков и Э. Я. Кернерман [26], сходен по конфигурации и геометрическим размерам с ячейками дисковой мельницы. При изучении структурных характеристик жидкости за препятствиями различной формы и различных чисел Рейнольдса они наблюдали отрывное течение и образование вихрей. При $Re_x \approx 5$ течение над препятствием носит ярко выраженный ползущий характер и только у острой кромки препятствия наблюдается некоторый отрыв потока. При увеличении Re_x до 150 течение потока носит вихреобразный характер, и имеет место возвратное течение. Первоначально образовавшиеся два симметричных вихря вытягиваются и занимают всю область за препятствием. При $Re_x > 150$ вихри теряют свою устойчивость, смещаются относительно друг друга и за препятствием наблюдается вихревое движение с выраженной дорожкой кармана.

Основные положения теории о взаимодействии потока жидкости с препятствием высказанные А. Я. Миловичем [27] заключаются в следующем. Силовое взаимодействие между телом и жидкостью всегда связано с появлением вихрей. Для зарождения и развития вихря необходима остановка поступательного движения жидкости, вызываемая наличием преграды этому движению. Замкнутый вихрь является носителем силы. Эти положения подтверждены рядом работ [7; 16; 17; 28].

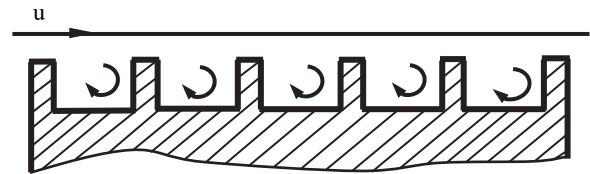


Рис. 5. Течение жидкости через ряд последовательных уступов по Э. Я. Кернерману

М. А. Гольдштик и Б. А. Силантьев [29, 30] определили характер течения жидкости за уступом, длину зоны отрыва и стабилизирующую способность поверхности обтекаемого тела. Они подтвердили отрывной характер течения и получили теоретическое решение для завихренности в зоне отрыва. При $5 \cdot 10^3 < Re_x < 5 \cdot 10^5$, по их мнению, длина зоны отрыва не зависит от скорости набегающего потока, а определяется в основном загромаждением канала $I = \frac{h}{H}$,

где h и H – соответственно – размер плохо обтекаемого тела и высота канала. Для значений $0,68 < I < 1$ длина зоны отрыва не зависит от I [27].

В. П. Солнцевым, Б. Е. Лужанским и В. Н. Крюковым [31] исследовано обтекание потоком жидкости уступа (рис. 6). Установлено, что как до него, так и после уступа течение носит вихревой характер с наличием ряда циркуляционных зон. При этом на самом уступе также образуется циркуляционная зона, занимающая большую часть ширины порога. Влияние геометрических параметров препятствия на интенсивность завихренности за телом исследована в работах [32–35]. Наибольшая интенсивность завихренности наблюдалась при соотношении $L \div 3,5$ (L – расстояние между препятствиями, h – высота препятствия), что вызвано переходом, по мнению Л.В. Смирнова [32] от режима квазиламинарного течения жидкости, характерного для соотношения $\frac{L}{h} < 2$, при ко-

тором между препятствиями образуются циркуляционные зоны, не затрагивающие поверхности раздела, к режиму «струйной интерференции», при котором зоны сплошной завихренности в ячейках интенсивно перемешиваются, усиливая турбулизацию потока. Анализ фотоснимков движения жидкости в ячейках при изменении соотношения $\frac{L}{h}$ от 0,5 до 5 показал,

что при $\frac{L}{h} \approx 0,5$ в ячейке существуют два вихря. При $0,5 < \frac{L}{h} < 1,3$ наблюдается один вихрь, но более сильный

и вытянутый по ширине ячейки. При $1,3 \ll 3$ единичный вихрь пропал, и на его месте наблюдалось движение сплошного вихревого слоя с микроскопическими геометрическими размерами вихрей. Анализ приведенных работ позволяет считать: течение жидкости между элементами шероховатости носит отрывной характер с наличием ряда циркуляционных зон.

Существует несколько расчетных схем, описывающих поведение потока при наличии таких зон: схема Фешля (рис. 7), схема Вулиса, схемы с использованием теории пограничного слоя, схема отрывного обтекания М. А. Лаврентьева. Общим для всех этих схем является отрывное обтекание препятствия и вихревое движение за ним. При отрывном обтекании препятствия основными характеристиками турбулентного пограничного слоя является интенсивность смешения в циркуляционной зоне, осредненная интенсивность вихря, геометрические параметры вихрей [30].

Физическая модель турбулентности Тейлора дает зависимость турбулентных касательных напряжений $\tau_{\text{турб}}$ от интенсивности смешения в циркуляционной зоне. Зависимость касательных напряжений от турбулентности потока определяли также Д. Дейли и Д. Харлеман [34]. Они рассматривали течение со сдвигом (рис. 8).

Одна из первых попыток определения зависимости вихревых образований в потоке от геометрических

параметров вихрей принадлежит В. К. Мигаю [33]. Он обнаружил, что при $Re > 10^4$ размеры вихрей не превышают $0,2 \div 0,3$ мм, а с уменьшением Re несколько увеличиваются.

По его мнению, относительный начальный радиус ядра вихря $\frac{\alpha_0}{R_0}$ в зависимости от Re меняется в пре-

делах $\frac{1}{6} \div \frac{1}{12}$. В. Ф. Якушев и В. Ф. Тарасов, а также Б. И. Бузуков по многочисленным экспериментальным данным, установили, что размеры вихрей не постоянны, а увеличиваются в движении по линейному закону

$$R = R_0 + \alpha \cdot L,$$

где R_0 – начальный размер вихря при его образовании; $\alpha = 10^{-2} - 10^{-3}$ – постоянная, зависящая от условий образования вихревого потока; L – расстояние, пройденное вихрем.

При скорости движения вихревого слоя 10 м/с начальный радиус вихря составляет 0,2 см. При изучении гидродинамических закономерностей пленочного течения жидкости по шероховатой поверхности Н. А. Николаев и В. Ф. Харин [35] нашли, что интенсивность вихря, по теории свободной турбулентности, имеет следующую зависимость:

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{d\bar{u}}{dy} - \frac{d\bar{v}}{dx} \right).$$

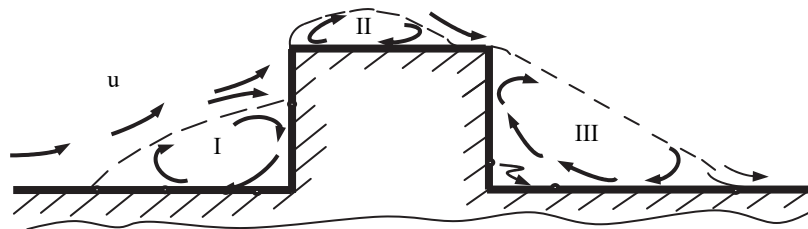


Рис. 6. Схема течения жидкости в окрестности уступа по В. П. Солнцеву:
I, II, III – циркуляционные зоны с вихревым течением

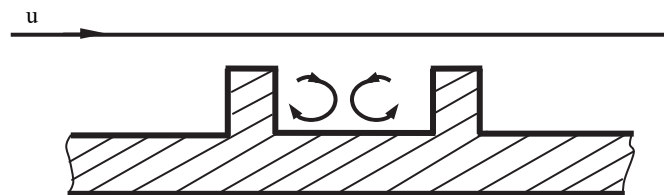


Рис. 7. Схема обтекания препятствия потоком жидкости по Фешлю

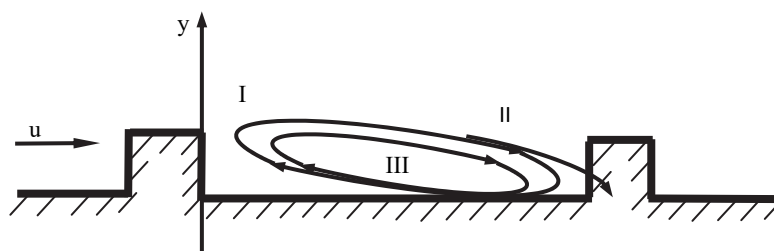


Рис. 8. Схема течения жидкости во впадине по Г. Н. Абрамовичу:
I – невозмущенный поток; II – зона турбулентного смешения; III – циркуляционная зона

При совпадении начального направления струи с осью абсцисс величина $\frac{d\bar{u}}{dx}$ ничтожно мала по сравнению с величиной $\frac{d\bar{u}}{dy}$ и тогда можно считать:

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{d\bar{u}}{dy}.$$

Количественные обнаружил В. В. Орлов. Он установил, что

$$d = 1,46\delta + 0,0167x,$$

где d – диаметр вихря; δ – высота слоя жидкости над обтекаемой поверхностью; x – длина пути вихря.

ВЫВОДЫ

В процессе обработки волокнистых суспензий в ножевых размольных машинах наряду с механическим воздействием на волокно ножевой гарнитуры возникают также гидродинамические воздействия в потоке, оценка которых позволяет судить о способности их оказывать влияние на размол волокна. В числе упомянутых – обработка волокнистого полуфабриката в зазоре между рабочими поверхностями ножей ротора и статора, где размол можно уподобить процессу смазки маслом трущихся металлических поверхностей. В диспергированном потоке действуют силы вязкостного трения для ньютоновской жидкости. Учитывая это, можно предположить, что процесс течения волокнистой суспензии по гарнитуре ножевых размольных машин можно уподобить движению жидкости по шероховатой поверхности или движению потока жидкости в канале за плохо обтекаемым телом. Это позволяет объяснить, за счет чего осуществляется обработка волокнистой суспензии при тении её в ячейках ротора и статора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Влияние ножевого способа размола волокнистой массы на процесс получения готовой продукции / Д. Ю. Васильева, Д. Е. Зырянов, Н. С. Решетова, Л. В. Юртаева // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. актуальные задачи и перспективные решения : материалы II Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП. Санкт-Петербург, 2020. С. 16–20.
2. Ушаков А. В. Размол волокнистых полуфабрикатов высокой концентрации в целлюлозно-бумажном производстве : диссертация ... кандидата технических наук : 05.21.03 ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2022. 173 с.
3. Voronin I. A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 467, issue 1. Pp. 86. DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012003.
4. 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. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131
5. Investigation of the influence of the pattern of a disc mill set on the process of obtaining powdered pulp /

D. Yu. Vasilyeva, L. V. Yurtaeva, R. A. Marchenko, E. V. Kaplyov, D. E. Zyryanov, N. S. Reshetova // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2021. С. 42050. DOI 10.1088/1742-6596/2094/4/042050

6. Пожаркова С. А., Юртаева Л. В. Влияние рисунка размалывающей гарнитуры на процесс получения микрокристаллической целлюлозы // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). Красноярск, 2024. С. 180–182.

7. Гидродинамические явления при размоле волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах : монография / Ю. Д. Алашкевич, Н. С. Решетова, В. П. Барановский, Л. В. Кутовая ; Сиб. гос. технол. ун-т. Красноярск, 2003. 174 с.

8. Алашкевич Ю. Д., Решетова Н. С. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли : учеб. пособие / Сиб. гос. технологич. ун-т. Красноярск, 2015. 317 с.

9. De Flauch Z. Dea considerations sur le moulage des fibres de cellulose // La Papeterie. 1953. P. 26–33.

10. Шуркина В. И., Марченко Р. А., Алашкевич Ю. Д. Совершенствование ножевого размола волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве : монография ; СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. 178 с.

11. Солечник Н. Я., Антонович Л. Н. Теория размола в свете новых фактов // Техническая информация по науч. исслед. работам ЛТА им. С. М. Кирова. Л., 1956. Вып. 4, № 39-40. 33 с.

12. Перекальский Н. П. Современное представление о механических явлениях при размоле // Тр. ЛТИ ЦБП им. Молотова. М. ; Л. : Гослесбумиздат, 1961. Вып. 8. С. 5–18.

13. Аликин В. П. Вопросы реологии и размола целлюлозных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1960. 21 с.

14. Rance G. The beating process as a problem of lubrication and lubricant behavior // Worlds Paper Trade Review. 1951. T. 136, № 3. P. 177–180; 185–186.

15. Пенкин Н. С., Пенкин А. Н., Сербин В. М. Основы трибологии и триботехники : учеб. пособие. 3-е изд., стереотип. М. : Машиностроение, 2021. 208 с.

16. Kontral L. Using Laboratory Methods for Beating Investigation // Svensk Pappers Tidning. 1938. № 41. P. 175–183.

17. Зайцев А. К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Ч. I. М. : Машгиз, 1947. 347 с.

18. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М., 1955. 520 с.

19. Марков В. Г. Образование зазоров между ножами барабана и планки ролла // Бум. пром-сть. 1954. № 7. С. 7–9.

20. Pav Ia. Design of a New Beating Apparatus // Zellulose und Papier. 1962. № 5. S. 17–22.

21. Хлебников А. А., Пашинский В. Ф. Исследование механизма размола массы в мельницах // Тр. ЛТИ ЦБП. 1967. Вып. 20. С. 115–118.

22. Гаузе А. А., Гончаров В. Н. Оборудование для подготовки бумажной массы. М. : Лесная промышленность, 1991. 256 с.

23. Вихарев С. Н. Теория и конструкция машин для размолва волокнистых полуфабрикатов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2014. 31 с.

24. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М., 1980. 248 с.

25. Прандтль Л. Гидромеханика. М. : Иностран. лит., 1951. 575 с.

26. Кернерман Э. Я., Накоряков В. Е. Течение и теплообмен в щелевых каналах с препятствиями // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1971. № 1. С. 115–118.

27. Милович А. Я. Теория динамического взаимодействия тел и жидкостей. М. : Физматгиз, 1959. 310 с.

28. Method for Intensive Gas-Liquid Dispersion in a Stirred Tank / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatko, D. A. Zemtov, O. P. Zhukova // Chem. Eng. 2023. Vol. 7. № 2. P. 30. DOI: 10.3390/chemengineering7020030

29. Гольдштвик М. А. Одно парадоксальное решение уравнения Навье-Стокса // Прикл. математика и механика. 1969. Т. 24, вып. 4. С. 610–622.

30. Баженова В. В., Силантьев Б. А. Экспериментальная проверка гипотезы постоянства завихренности в зоне отрыва // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1966. № 1. С. 120–122.

31. Крюков В. Н., Солнцев В. П. Исследование теплообмена на шероховатой пластине // Тепло и массоперенос : сб. Минск, 1972. Т. 1, ч. 1. С. 57–61.

32. Смирнов Л. В. Характеристика пульсаций давления в зоне отрывного напорного потока // Тр. НИИ «Гидропроект». 1972. Сб. 23. С. 84–93.

33. Мигай В. К. // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1969. № 4. С. 171–175.

34. Дейли Дж., Хорлеман Д. Механика жидкости. М. : Энергия, 1971. 480 с.

35. Николаев Н. А., Харин В. Ф. Гидродинамические закономерности пленочного течения жидкости по шероховатой поверхности // Теорет. основы хим. технологии. 1974. Т. 8, № 5. С. 712–719.

REFERENCES

1. Vliyanie nozhevoego sposoba razmola voloknistoj massy na process polucheniya gotovoj produkcii / D. Yu. Vasileva, D. E. Zyryanov, N. S. Reshetova, L. V. Yurtaeva // Sovremennaya cellyulozno-bumazhnaya promyshlennost. aktualnye zadachi i perspektivnye resheniya : materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchyonyh i specialistov CBP. Sankt-Peterburg, 2020. S. 16–20.

2. Ushakov A. V. Razmol voloknistykh polufabrikatov vysokoj koncentracii v cellyulozno-bumazhnom proizvodstve : dissertaciya ... kandidata technicheskikh nauk : 05.21.03. Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tehnologij imeni akademika M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2022. 173 s.

3. Voronin I. A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 467, issue 1. Pp. 86. DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012003.

4. Teoreticheskoe issledovanie processa izmelcheniya materiala v rabochej kamere diskovoj melnicy / I. A. Semikopenko, V. P. Voronov, D. A. Belyaev, E. A. Borozdin // Vestnik BGUTU im. V. G. Shuhova. 2020. № 11. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131.

5. Investigation of the influence of the pattern of a disc mill set on the process of obtaining powdered pulp / D. Yu. Vasilyeva, L. V. Yurtaeva, R. A. Marchenko, E. V. Kaplyov, D. E. Zyryanov, N. S. Reshetova // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2021. S. 42050. DOI 10.1088/1742-6596/2094/4/042050.

6. Pozharkova S. A., Yurtaeva L. V. Vliyanie risunka razmalyvayushej garnitury na process polucheniya mikrokristallicheskoj cellyulozy // Molodye uchenye v reshenii aktualnykh problem nauki : sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh (s mezhdunarodnym uchastiem). Krasnoyarsk, 2024. S. 180–182.

7. Gidrodinamicheskie yavleniya pri razmole voloknistykh polufabrikatov v nozhevyykh razmalyvayushih mashinakh : monografiya / Yu. D. Alashkevich, N. S. Reshetova, V. P. Baranovskij, L. V. Kutovaya ; Sib. gos. tehnol. un-t. Krasnoyarsk, 2003. 174 s.

8. Alashkevich Yu. D., Reshetova N. S. Teoriya i konstrukciya mashin i oborudovaniya otrasli : ucheb. posobie / Sib. gos. tehnologich. un-t. Krasnoyarsk, 2015. 317 s.

9. De Flauch Z. Dea considerations sur le moulage des fibres de cellulose // La Papeterie. 1953. P. 26–33.

10. Shurkina V. I., Marchenko R. A., Alashkevich Yu. D. Sovershenstvovanie nozhevoego razmola voloknistykh rastitelnykh polimerov v cellyulozno-bumazhnom proizvodstve : monografiya ; SibGU im. M. F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2020. 178 s.

11. Solechnik N. Ya., Antonovich L. N. Teoriya razmola v svete novykh faktov // Tehnicheskaya informaciya po nauch. issled. rabotam LTA im. S. M. Kirova. L., 1956. Vyp. 4, № 39-40. 33 s.

12. Perekalskij N. P. Sovremennoe predstavlenie o mehanicheskikh yavleniyah pri razmole // Tr. LTI CBP im. Molotova. M. ; L. : Goslesbumizdat, 1961. Vyp. 8. S. 5–18.

13. Alikin V. P. Voprosy reologii i razmola cellyuloznykh materialov : avtoref. dis. ...kand. tehn. nauk. L., 1960. 21 s.

14. Rance G. The beating process as a problem of lubrication and lubricant behavior // Worlds Paper Trade Review. 1951. Vol. 136, № 3. P. 177–180; 185–186.

15. Penkin N. S., Penkin A. N., Serbin V. M. Osnovy tribologii i tribotekhniki : uchebnoe posobie. 3-e izd., stereotip. Moskva : Mashinostroenie, 2021. 208 s.

16. Konttral L. Using Laboratory Methods for Beating Investigation // Svensk Pappers Tidning. 1938. № 41. P. 175–183.

17. Zajcev A. K. Osnovy ucheniya o trenii, iznose i smazke mashin. Ch. I. M. : Mashgiz, 1947. 347 s.

18. Slezkin N. A. Dinamika vyazkoj neszhimaemoj zhidkosti. M., 1955. 520 s.

19. Markov V. G. Obrazovanie zazorov mezhdu nozhami barabana i planki rolla // Bum. prom-st. 1954. № 7. S. 7–9.

20. Pav Ia. Design of a New Beating Apparatus // *Zellulose und Papier*. 1962. № 5. S. 17–22.
21. Hlebnikov A. A., Pashinskij V. F. Issledovanie mehanizma razmola massy v melnicah // *Tr. LTI CBP*. 1967. Vyp. 20. C. 115–118.
22. Gauze A. A., Goncharov V. N. Oborudovanie dlya podgotovki bumazhnoj massy. M. : Lesnaya promyshlennost, 1991. 256 s.
23. Viharev S. N. Teoriya i konstrukciya mashin dlya razmola voloknistyh polufabrikatov. Ekaterinburg : UGLTU, 2014. 31 s.
24. Terentev O. A. Gidrodinamika voloknistyh suspenzij v cellyulozno-bumazhnom proizvodstve. M., 1980. 248 s.
25. Prandtl L. Gidromehanika. M. : Inostr.lit., 1951. 575 s.
26. Kernerman E. Ya., Nakoryakov V. E. Tечение i teploobmen v shelevyh kanalah s prepyatstviyami // *Zhurn. prikl. mehaniki i tehn. fiziki*. 1971. № 1. C. 115–118.
27. Milovich A. Ya. Teoriya dinamicheskogo vzaimodejstviya tel i zhidkostej. M. : Fizmatgiz, 1959. 310 s.
28. Method for Intensive Gas–Liquid Dispersion in a Stirred Tank / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov, O. P. Zhukova // *Chem. Eng.* 2023. V. 7. № 2. P. 30. DOI: 10.3390/chemengineering7020030
29. Goldshtvik M. A. Odno paradoksalnoe reshenie uravneniya Nave-Stoksa // *Prikl. matematika i mehanika*. 1969. T. 24, vyp.4. S. 610–622.
30. Bazhenova V. V., Silantev B. A. Eksperimentalnaya proverka gi-potezy postoyanstva zavihrennosti v zone otryva // *Zhurn.prikl. mehaniki i tehn.fiziki*. 1966. № 1. S. 120–122.
31. Kryukov V. N., Solncev V. P. Issledovanie teploobmena na sherohovatoj plastine // *Teplo i massoperenos* : Sb. Minsk, 1972. T. 1, ch. 1. C. 57–61.
32. Smirnov L. V. Harakteristika pulsacij davleniya v zone otryvnogo napornogo potoka // *Tr. NII Gidroproekt*. 1972. Sb. 23. S. 84–93.
33. Migaj V. K. // *Izv. AN SSSR. OTN. Mehanika i mashinostroenie*. 1969. № 4. C. 171–175.
34. Dejli Dzh., Horleman D. *Mehanika zhidkosti*. M. : Energiya, 1971. 480 s.
35. Nikolaev N. A., Harin V. F. Gidrodinamicheskie zakonomernosti plenochного tечения zhidkosti po sherohovatoj poverhnosti // *Teoret.osnovy him.tehnologii*. 1974. T. 8, № 5. C. 712–719.

© Алашкевич Ю. Д., Юртаева Л. В.,
Марченко Р. А., Решетова Н. С., 2025

Поступила в редакцию 19.05.2025

Принята к печати 20.10.2025