

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

---

УДК 676.1

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-4-64-74

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 4. С. 64–74

## ДИНАМИКА КОНТАКТА СТРУИ СУСПЕНЗИИ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ РАЗМОЛЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Ю. Д. Алашкевич, А. В. Ушаков

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

**Аннотация.** Известно, что процесс размола волокнистых полимеров из хвойной и лиственной древесины является очень важным в технологии получения бумаги и картона. Для этой цели используются ножевой и безножевой способы размола. Из практики осуществления этого процесса в технологии получения готового продукта в целлюлозно-бумажном производстве в подавляющем большинстве случаев используют ножевой размол.

При использовании ножевого размола основным воздействием на волокно считают механическое. Вместе с тем, с повышением скорости вращения ротора ножевых мельниц серьезную роль в процессе размола волокнистых полуфабрикатов начинают играть гидродинамические воздействия при течении волокнистых супензий в рабочих зонах ножевых машин. До сих пор не ясно, при каких скоростях движения волокнистых супензий необходимо учитывать воздействие гидродинамических сил на процесс размола.

Для решения поставленной задачи, в работе проведен анализ контакта струи супензии с препятствием при размоле растительных полимеров. Явление контакта супензии при размоле наблюдается как в безножевых, так и в ножевых установках. В ножевых машинах потоки супензии при течении контактируют с внутренними поверхностями ротора и статора, а особенно они ударяются о поверхности рабочих органов мельницы.

В связи с этим, в работе проведен расчет мгновенного удара струи супензии с препятствием.

**Ключевые слова:** размол, гидродинамика, ножевой способ, течение супензии, контакт жидкости с препятствием.

*Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 64–74*

## DYNAMICS OF CONTACT OF THE SUSPENSION JET WITH AN OBSTACLE DURING GRINDING OF PLANT POLYMERS

Yu. D. Alashkevich, A. V. Ushakov

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

**Abstract.** It is known that the process of grinding fibrous polymers from coniferous and deciduous wood is very important in the technology of producing paper and cardboard. Knife and non-knife grinding methods are used for this purpose. From the practice of this process, knife grinding is used in the technology of obtaining the finished product in pulp and paper production in the vast majority of cases.

When using knife grinding, the main effect on the fiber is considered to be mechanical. At the same time, with an increase in the speed of rotation of the rotor of knife mills, hydrodynamic effects during the flow of fibrous suspensions in the working areas of knife machines begin to play a serious role in the process of grinding fibrous semi-finished products. It is still not clear at what speeds of movement of fibrous suspensions it is necessary to take into account the effect of hydrodynamic forces on the grinding process.

To solve this problem, the analysis of the contact of the suspension jet with an obstacle during grinding of plant polymers was carried out. The phenomenon of suspension contact during grinding is observed in both knife-free and knife installations. In knife machines, the slurry flows during the process come into contact with the inner surfaces of the rotor and stator, and especially they hit the surfaces of the working bodies of the mill.

In this regard, the calculation of the instantaneous impact of a suspension jet with an obstacle was carried out.

**Keywords:** grinding, hydrodynamics, knife method, suspension flow, liquid contact with an obstacle.

## ВВЕДЕНИЕ

В ножевых размалывающих машинах считают, что процесс размола растительных полимеров из хвойных и лиственных пород древесины осуществляется в основном за счет механического воздействия ножей гарнитуры на волокно.

Наряду с механическими воздействиями на волокно при размоле волокнистых полуфабрикатов серьезное воздействие начинают оказывать гидродинамические силы, связанные с характером течения волокнистой суспензии в зоне рабочих органов размалывающих машин. И, в частности, при течении волокнистой суспензии потоки её ударяются о рабочие органы гарнитуры и о внутренние поверхности мельницы.

Возникает вопрос, при каких режимах течения волокнистой суспензии необходимо учитывать гидродинамический эффект размола? Для ответа на этот вопрос обратимся к процессам, которые мы наблюдаем в быту.

Частенько капля дождя, падая с крыши, имеющей определенную высоту, разрушает поверхность, на которую эта капля падает. Причем разрушению подвергаются такие материалы как камень, бетон, кирпич, ракушечник и другие. Чем это можно объяснить?

В своей книге «Капля» Я. Е. Гегузин объясняет это просто, и с этим трудно не согласиться [1]. Оказывается, для получения эффекта разрушения материала при падении капли необходимо, чтобы она достигла определенной величины скорости падения. При достижении этой скорости, создаются усилия, позволяющие разрушать материалы, с которыми капля контактирует.

Аналогичная картина наблюдается при течении волокнистой суспензии внутри корпуса ножевой размольной установки. Попадая внутрь мельницы, потоки суспензии ударяются о стенки корпуса и о поверхности рабочих гарнитур, за счет чего и происходит разрушение волокон суспензии.

Для определения скорости течения волокнистой суспензии в размольной установке и величины сил, действующих на волокно при размоле, обратимся к рассмотрению этих зависимостей при ударе струи суспензии о неподвижную преграду в специализированной размольной установке.

В качестве предмета исследования принята установка, разработанная и изготовленная авторами [2]. Имея приоритет, защищенный авторскими свидетельствами и патентами, установка, основанная на безножевом способе размола, позволяет провести теоретические и экспериментальные исследования процесса размола с изучением основных физических и гидродинамических явлений, сопровождающих процесс обработки волокон. К таким физическим явлениям, сопровождающим процесс размола в установке, можно отнести удар волокнистой суспензии о твердую преграду.

## АНАЛИЗ РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ РАЗМАЛЫВАЮЩИХ УСТАНОВОВОК

Отсутствие стройной и хорошо разработанной теории размола размольных машинах заставляет исследователей при изыскании новых, более эффектив-

ных принципов размола целлюлозных материалов в водной среде опираться на сумму опытов, накопленных в течение большого периода времени. В связи с этим в последние годы в литературе описан ряд специальных размалывающих аппаратов, которые пытаются применить в целлюлозно-бумажном производстве.

Специальными размалывающими машинами считаются машины, у которых расположение рабочих органов отличается от обычного ножевого. К числу таких машин можно отнести: центробежно-пульсационные, кавитационные, ультразвуковые аппараты, аппараты типа «струя-преграда», аппараты с использованием ферромагнитных тел.

Существует несколько противоречивых точек зрения на динамику процесса размола массы в этих аппаратах. Особенно хорошо это противоречие прослеживается в центробежно-пульсационных аппаратах (ЦПА) и аппаратах типа пакетного генератора. Автор ЦПА профессор Р. Виллемс [3] считает, что основным фактором, обуславливающим расщепление пучков волокон, является возникновение в потоках обрабатываемой суспензии высокочастотных колебаний, достигающих частоты порядка миллиона герц и выше. Он полагает, что при работе генератора высокочастотных колебаний типа ЦПА все элементы его рабочих органов (щели, их стенки, кольцеобразные зазоры между рядами камер и вентиль, регулирующий давление), с одной стороны, и суспензия, проталкиваемая через ряды щелей и зазоров, с другой стороны, образуют единую «принудительную кинематическую цепь». В этой кинематической цепи рабочие органы генератора играют роль жестких элементов в цепи, а суспензия, движущаяся через щели и зазоры, может рассматриваться как деформируемый элемент. О. Фукс [3] разделяет взгляды Р. Виллемса.

Другие авторы [4; 5], проводившие исследования работы центробежно-пульсационного аппарата, опровергают утверждения Р. Виллемса, и считают, что частота колебаний, возникающих в суспензии, составляет несколько тысяч герц. Следовательно, расщепление пучков волокон обусловлено не высокочастотными колебаниями этой среды, а, в первую очередь, механическим ударным воздействием рабочих органов и гидродинамическими усилиями сдвига, а также пульсациями давления. Причем считается, что процесс механических ударных воздействий играет главную роль в расщеплении пучков волокон.

Исследователи, В. Н. Гончаров, А. А. Гаузе, В. П. Аликин [6] считают, что обработка волокнистых материалов в этих аппаратах обеспечивается совокупностью ряда физических явлений, таких как:

- ударное воздействие быстродвижущихся относительно друг друга волокон и твердых элементов аппарата;
- кавитационное воздействие, которое обусловлено явлениями возникновения пузырьков, их развития и захлопывания при определенных условиях в жидкости и взаимодействия их с волокнистым материалом;
- пульсационное воздействие за счет чередования повышения и понижения гидравлического давления в суспензии;
- действие сил трения.

В кавитационных аппаратах разработка волокнистой суспензии происходит, по мнению авторов [7], за счет захлопывания пузырьков или эрозионного разрушения материалов. А. Д. Перник [8] считает, что явление кавитации заключается в образовании разрывов сплошности в некоторых участках потоков движущейся капельной жидкости. Наступление кавитации характеризуется появлением в непрерывной жидкой сфере мельчайших парогазовых пузырьков, объем которых быстро возрастает по мере снижения давления.

Причиной образования пузырьков является кипение жидкости при нормальной температуре и низком давлении [3; 8; 9].

В понятие кавитации также входит и то воздействие, которое данные пузырьки оказывают на среду и находящийся в ней материал. Размеры полостей возникающих пузырьков колеблются от субмикроскопических до весьма больших. Длительность их существования различна.

А. Ф. Метелкин [10] и М. Г. Сиртюк [11] считают, что температура жидкости оказывает значительное влияние на интенсивность ударных волн и на величину кавитационной эрозии различных материалов. Однако, повышение температуры не сказалось на увеличении скорости размола [34], а, наоборот, привело к ее значительному снижению.

В. Н. Гончаров, А. А. Гаузе и В. П. Аликин [6] не согласны с выводами Д. С. Добровольского [13]. Они отмечают, что размол волокон носит усталостный характер, а ударные волны, возникающие при захлопывании пузырьков, не оказывают существенного влияния на размол. Имеющиеся в работе [13] сведения о влиянии кавитации на размол целлюлозных волокон, по их мнению, преувеличены.

К аппаратам, использующим эффект кавитационных явлений при размоле волокнистой массы можно отнести: кавитационный аппарат Б. С. Петрова и М. И. Леонова [14]. В этом аппарате масса под давлением от 1 до 1,5 МН/м<sup>2</sup> подводится по коллектору к диафрагме с коноидальным отверстием. За счет сужения отверстия в диафрагме и перепада давления до и после диафрагмы скорость массы увеличивается до критической, и масса направляется на поверхность кавитатора. Здесь скорость возрастает и статическое давление массы понижается, в результате чего вода на поверхности кавитатора выкипает, образуется большое количество пузырьков в массе, которые в общем потоке переносятся в полость высокого давления от 0,2 до 0,5 МН/м<sup>2</sup>, где пузырьки интенсивно захлопываются, вызывая местные гидравлические удары. Происходит роспуск макулатуры на отдельные волокна.

Представляет интерес аппарат Э. В. Шемякина [15]. Работа этого аппарата для размола волокнистой массы основана на создании прямого гидравлического удара, за счет чего и осуществляется размол.

Большая работа в области создания аппаратов, основанных на кавитационном эффекте и исследований процессов, происходящих в них при размоле волокнистой массы, проведена Р. А. Солоницыным, Л. А. Горбачевым и др. [16–18].

За основу всех их изобретений принят кавитационный размалывающий аппарат. Волокнистую суспензию концентрацией 3–4 % под давлением от 20 до 40 м водяного столба подавали в сужающееся устройство кавитационной камеры при скорости потока от 20 до 30 м/с. В месте расширения сжатой струи суспензии волокна создавалось гидродинамическое кавитационное поле, которое оказывало размалывающее воздействие на волокно.

В работе [18] авторы совмещают ножевой размол волокнистой суспензии в конических мельницах с кавитационной разработкой ее в аппарате.

Вопросами воздействия на целлюлозу частых гармонических колебательных движений в звуковом и ультразвуковом диапазоне занимался Д. С. Добровольский [13]. Основываясь на работах [19–22], где принцип генерирования колебаний в жидкой среде был использован для суспензирования в воде масел, растворения красителей и других целей, Д. С. Добровольский пытается этот принцип заложить в аппарат, специально созданный им для размола волокнистых суспензий. Он рассматривает общие положения природы колебательных движений в технике и пытается с этой точки зрения объяснить процесс размола волокон [13]. Рассматривая целлюлозные волокна как твердые тела цилиндрической формы, он считает, что на них в водной среде действуют продольные, поперечные и поверхностные звуковые волны [13]. В твердых телах, следовательно, и в целлюлозе, сдвиговая сила вызывает поперечные волны. Скорость волны сдвига составляет ≈ 48 % скорости продольной волны в том же материале. Наиболее ее низкое значение соответствует короткой волне. Величина скорости поверхностных волн составляет около одной десятой величины скорости поперечных волн [13].

Д. С. Добровольский объясняет механизм процесса размола волокон с точки зрения акустических колебаний следующим образом. При колебании твердого тела в упругой среде возникают попеременно области разрежения и сжатия. Колеблющиеся частицы среды оказываются то в области разрежения, то в области сжатия со значительным разрывом давлений. Таким образом, считает автор, при колебаниях тела происходит непрерывный переход энергии из кинетической в потенциальную и обратно. В результате, в аппарате Д. С. Добровольского происходит фибрillирование и расщепление пучков волокон при незначительном укорочении.

Вместе с тем, другие исследователи [6; 8] не согласны с мнением автора [13] о превалирующей роли акустических колебаний в процессе размола. Л. А. Соловьева [23] предполагает, что в акустическом аппарате имеют место ряд факторов, влияющих на процесс размола: механический удар волокон о рабочие органы, ударная волна, ультразвуковые волны, кавитация, которую вызывают ультразвуковые волны и другие.

Авторы [6] считали, что размол в акустических аппаратах происходит за счет возникновения ультразвуковой кавитации, которая является основной причиной обработки материалов в жидкости при их облучении ультразвуком. По их мнению, все другие механизмы акустического воздействия малоэффективны.

Как утверждают Г. Л. Долгий и Л. Е. Аким [24], кавитация в такого рода аппаратах сильно развита лишь в области, прилегающей к поверхности ультразвукового излучателя, вызывая его интенсивную эрозию. С удалением от излучателя, эффект кавитации снижается. Кроме того, эффект кавитации становится менее эффективен с увеличением концентрации массы. Для повышения эффективности работы ультразвуковой установки необходимо супензию разбавлять до концентрации 0,5–0,1 %, а это, в свою очередь, значительно снижает и так достаточно низкий коэффициент полезного действия аппарата.

Ю. П. Лосева [25] также утверждает, что в настоящее время акустический способ не нашел широкого применения в промышленности из-за высоких энергозатрат и значительно низкого коэффициента полезного действия. Вместе с тем автор [25] высказывает мнение о том, что подобные аппараты целесообразно использовать для роспуска волокнистых материалов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Безножевые аппараты «струя-преграда» занимают значительное место при исследованиях оптимальных условий процесса разработки волокнистой супензии для получения качественных видов бумаги. Как считают исследователи [3; 13; 26; 27], в подобных аппаратах получается масса с более разработанными волокнами без значительного их укорочения. Большая работа в этом направлении была проделана нашим соотечественником В. Г. Марковым [27]. Он создал специальную установку для размола волокнистой массы безножевым способом. В этой установке волокнистая масса концентрацией от 1,5 до 1,8 % подавалась через насадку на преграду. Автор [27] при исследовании оптимальных условий размола использовал преграды различной формы и конфигурации.

В результате проведенных исследований В. Г. Марков сделал следующие выводы:

- гидроразмолом можно добиться любой степени помола;
- в результате размола наблюдается незначительное укорочение волокон по длине.

Прочностные характеристики бумаги, полученной из волокнистой массы после разработки ее в аппарате В. Г. Маркова, выше, чем у бумаги, полученной из массы, разработанной на ножевой размольной машине. Расход электроэнергии на порядок выше, чем в роллах. Для повышения эффективности процесса размола необходимо проводить размол массы высокой концентрации. В. Г. Марков [27] считал, что определяющим фактором процесса размола в его установке является обтекание струей внутренней поверхности сопла и поверхности преграды.

В работах В. Г. Маркова [27] и Х. Швальбе [26] анализируются исследования, проводимые различными авторами в этом направлении. В частности, описывается американский аппарат Стоби. В этом аппарате масса концентрацией 2–2,5 % выбрасывалась насосом под давлением 0,5–0,9 МН/м<sup>2</sup> и ударялась

о плиту с бороздками, установленную под углом 45 градусов.

Оригинальным способом размола в этом плане является способ Беккер–Партингтона, описанный в работах [26; 27]. Автор этого способа использовал взаимодействие встречных струй. При этом волокна одной струи обстреливаются волокнами другой, и за счет этого осуществляется размол. Бумага, отлитая из волокон, разработанных этим способом, оказалась значительно прочнее, нежели бумага, полученная из волокон ножевого размола [9].

При всех положительных особенностях такого рода аппаратов все они имели существенный недостаток, не позволивший им найти широкое использование в промышленности. Этим недостатком является большой расход электроэнергии, который на порядок и более превосходил традиционные ножевые способы размола. Основной причиной такого положения дел явилась недостаточная изученность механизма разработки волокон в этих аппаратах и невозможность, в связи с этим, оптимизации процесса. Учитывая, что в этих установках процесс размола зависит от многих факторов, среди которых определяющими являются скорость истечения струи, форма и характер преграды и другие, небезынтересным будет анализ работ, исследующих течение жидкости через сопло для размыва и разрушения горных пород гидромониторами [28–30]. Все струи по величине напора подразделяются на низкие до 1,0 МН/м<sup>2</sup>, средние (от 1,0 до 4,0 МН/м<sup>2</sup>) и высокие (выше 4,0 МН/м<sup>2</sup>).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При изучении истечения жидкости из сопла при различных параметрах [28–31] авторами было установлено, что струю, вытекающую под давлением из сопла можно разбить на три участка (рис. 1).

Первый участок характеризуется высоким удельным давлением и плотностью. При переходе ко второму участку сила удара струи медленно уменьшается, и на третьем участке происходит интенсивное уменьшение силы удара до нуля. По мнению Р. Р. Чугуева [32], струю можно разбить на компактную, частично раздробленную и распыленную. Компактную часть струи во многих источниках [33–35] называют начальным участком струи  $\ell_H$ . В его пределах осевые динамические давления остаются неизменными и равными исходному давлению. Используя расчетную схему (рис. 2) и уравнение количества движения для установившегося потока [32], автор предлагает формулу для определения силы удара горизонтальной струи о преграду

$$P_0 = \gamma \frac{u^2}{g} \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельный вес жидкости, Н/м<sup>3</sup>;  $u$  – скорость истечения струи, м/с;  $d_0$  – диаметр выходного сечения насадки, м;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>.

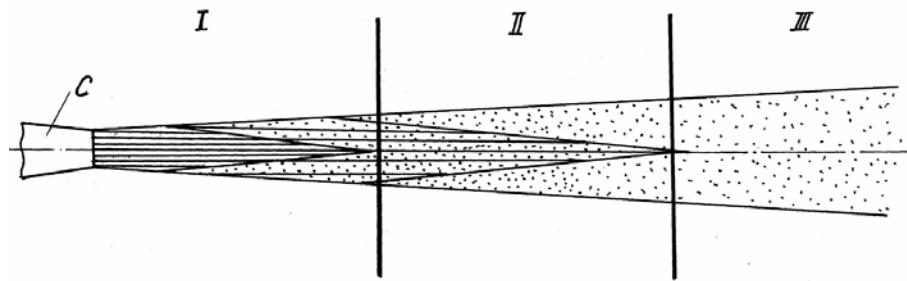


Рис. 1. Схема незатопленной свободной струи:

С – сопло; I – компактная часть; II – частично-раздробленная часть; III – распыленная часть

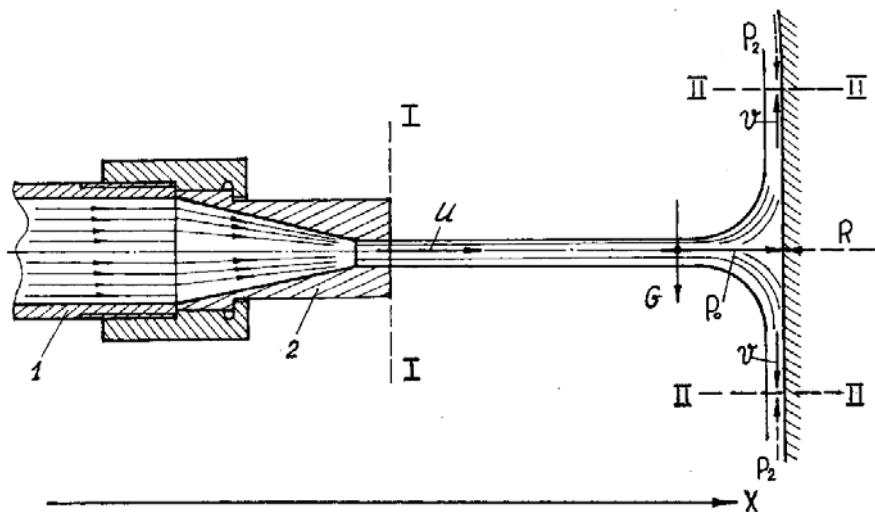


Рис. 2. Расчетная схема определения силы удара горизонтальной струи о препятствие

При  $\ell/d_0$  до 150 сила удара струи практически не меняется [30], т. е.

$$\frac{P_0}{P_{\max}} = 1,$$

где  $\ell$  – расстояние от сопла до препятствия, м;  $P_{\max}$  – максимальная сила удара струи в месте контакта с препятствием.

Для этого случая приемлема формула (1).

Важным параметром при расчетах высоконапорных тонких струй является диаметр места контакта струи с препятствием  $D$ . В соответствии с работами [35] диаметр пятна контакта струи с препятствием может быть определен из выражения

$$\frac{D}{d_0} - 1 = A_l \left( \frac{\ell}{d_0} \right)^k, \quad (2)$$

где  $A_l$  – безразмерный параметр, зависящий от диаметра насадки;  $k$  – величина постоянная, полученная экспериментальным путем [35].

Анализ возможности разработки волокнистой супензии за счет касательных усилий сдвига при радиальном растекании ее по вертикальной препятствию, а также за счет турбулизации потока супензии требует рассмотреть работы в этом направлении. Если для узких каналов (отверстие сопла) при любых практических скоростях жидкости можно использовать

закон Гагена–Пуазеля, то для широких каналов и, в частности, при обтекании жидкостью плоской пластины этот закон не приемлем, так как в данном случае на процесс течения жидкости начинает оказывать существенное влияние турбулентность.

При наличии турбулентности частицы жидкости в потоке, в отличие от ламинарного режима течения, начинают двигаться совершенно неупорядоченно и по самым извилистым траекториям.

По Л. Прандтлю [36] турбулентность в потоке является следствием образования вторичного пограничного слоя в непосредственной близости от стенки при волнообразных колебаниях основного пограничного слоя с большим числом Рейнольдса  $Re$ .

Периодические утолщения и утоньшения вторичного пограничного слоя приводят к образованию поля скоростей перпендикулярных к пластине.

Это поле проникает глубоко внутрь жидкости и вследствие сдвига фаз передает энергию из основного потока в первичный пограничный слой.

Следовательно, турбулентность возникает, как правило, из пограничного слоя. Колебания, возросшие в пограничном слое, приводят к S-образному профилю скоростей, пограничный слой начинает быстро свертываться в вихри. После того, как турбулентность однажды возникла в каком-либо месте потока, она сама собой распространяется дальше, при этом позади первых вихрей, упывающих вниз по течению, образуются все новые и новые вихри.

Перенос количества движения, вызванный пульсациями, создает дополнительные касательные напряжения [36]

$$\tau' = -\rho \bar{u}' \bar{v}', \quad (3)$$

где  $u'$  и  $v'$  – отклонения составляющих  $u$  и  $v$  от их средних по времени значений  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$ .

Произведя ряд математических преобразований [36–38] с учетом необходимых допущений и используя уравнение импульсов в случае турбулентного слоя [60] получим

$$\tau' = \frac{C \cdot f_0 (\rho \cdot u^2)}{2}. \quad (4)$$

Воспользовавшись эмпирическим степенным законом сопротивления [16], связывающим безразмерное трение  $\tau'/(\rho u^2 \infty)$  с местным рейнольдсовым числом  $Re$  и произведя необходимые преобразования, можно получить окончательный вид формулы местного коэффициента трения

$$Cf_0 = 0,0263 Re_x^{-1/7}. \quad (5)$$

Зная местный коэффициент трения  $Cf_0$  можно получить выражение полного коэффициента сопротивления пластины длиной  $L$  [37].

Из работ О. А. Терентьева [39] известно, что при больших градиентах скоростей волокнистая суспензия концентрацией до (4÷5 %) близка по своим характеристикам ньютоновской жидкости.

Основываясь на расчетной схеме (рис. 2), сделаем следующие допущения:

- в движении находится цилиндрический столб водной суспензии с равномерно распределенным в нем волокнистым материалом;
- струя имеет в сечении круг радиусом  $r_0$ ;
- скорость струи перед контактом ее с преградой равна  $u$ .

Условно не будем учитывать следующие параметры:

- силу тяжести;
- вязкость жидкости;
- поверхностное натяжение;
- атмосферное давление.

Существуют две методики расчета силы воздействия струи суспензии на преграду при их контакте и последующем непрерывном истечении струи.

Согласно первой методике, используя расчетную схему (рис. 2) и уравнение количества движения, определим искомую силу согласно выражению (1).

Для подтверждения правильности расчетов по определению силы воздействия на отдельное волокно целлюлозной массы при контакте струи суспензии с преградой, воспользуемся несколько другой методикой расчетов, рассматривая непрерывную горизонтальную струю, контактирующую с неподвижной плоской преградой и растекающуюся во все стороны в виде диска, толщина которого уменьшается от середины к краям, предполагаем, как и в первом случае, что:

- струя имеет в сечении круг радиусом  $r_0$ ;
- скорость струи перед контактом ее с преградой равна  $u$ .

Не будем учитывать при решении задачи следующие параметры: силу тяжести; вязкость суспензии; поверхностное натяжение суспензии; атмосферное давление, поскольку их влияние на исходный результат незначительно. Струя воды, набегающая на преграду, изменяет свой импульс. Поэтому, прежде всего, определим величину изменения импульса жидкости массы  $m$ , если в течение времени  $\Delta t$  на него действует сила  $P_{\max}$ . Из второго закона Ньютона [39], ускорение тела равно

$$a = \frac{P_{\max}}{m}. \quad (6)$$

Изменение скорости за время  $t$  равно

$$\frac{P_{\max} \Delta t}{m}. \quad (7)$$

Соответствующее изменение импульса

$$\Delta p = m \Delta u = P_{\max} \Delta t. \quad (8)$$

Сила  $P_{\max}$ , с которой преграда действует на струю воды, равна

$$P_{\max} = \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (9)$$

Согласно третьему закону Ньютона, струя воды будет давить на преграду с силой  $P_{\max}$ .

Если считать, что после контакта с плоской преградой во все стороны плоскости растекается одинаковое количество суспензии с одинаковой скоростью, то суммарный импульс растекающейся жидкости после взаимодействия струи с преградой будет равен нулю, так как тогда струя теряет весь свой импульс. Следовательно, изменение импульса за время  $\Delta t$  равно импульсу, который струя переносит за это время, а поскольку скорость ее равна  $u$ , то

$$\Delta p = \Delta m u, \quad (10)$$

где  $\Delta m$  – часть массы суспензии, которая за время  $\Delta t$  вступает в соприкосновение с преградой.

За это время с преградой вступает во взаимодействие жидкость, составляющая часть струи со следующими геометрическими параметрами:

- длина  $l = \Delta t u$ ;
- площадь поперечного сечения  $S = \pi r_0^2$ .

Часть массы струи

$$\Delta m = \rho \pi r_0^2 u \Delta t. \quad (11)$$

Из (10) получаем

$$\Delta p = \rho \pi r_0^2 u^2 \Delta t. \quad (12)$$

Тогда из (9) сила, с которой струя действует на преграду, равна

$$P_{\max} = \rho \pi u^2 r_0^2. \quad (13)$$

Разделив силу на площадь поперечного сечения струи, находим давление в месте контакта струи с преградой

$$P = \rho u^2. \quad (14)$$

Для сравнения количественных зависимостей сил, действующих на волокно рассчитанных по двум

представленным выше методикам, приведем конкретный пример расчета.

Примем по данным эксперимента:

- расстояние от насадки до преграды  $l = 0,1$  м;
- диаметр выходного отверстия насадки  $l_0 = 0,004$  м;
- объем рабочего цилиндра установки  $V = 6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>;
- время истечения суспензии из рабочего цилиндра  $t = 4$  с.

Скорость истечения струи суспензии из сопла определяется из выражения:

$$U = \frac{Q}{F}, \quad (15)$$

где  $Q$  – расход волокнистой суспензии через сечение сопла, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь поперечного сечения сопла, м<sup>2</sup>.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{4} = 1,5 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$F = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,004^2}{4} = 12,57 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

Тогда

$$u = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{12,57 \cdot 10^{-6}} = 119,332 \text{ м/с.}$$

Подставляя значения полученной скорости в выражение (1) получим

$$P_{\max} = 1054 \frac{119,332^2 \cdot 3,14 \cdot 0,004}{4} = 188,61 \text{ Н.}$$

Согласно второй методике расчета для определения силы, действующей на волокно при контакте струи с преградой и последующем непрерывном истечении струи, воспользуемся выражением (13):

$$P_{\max} = 1054 \cdot 3,14 \cdot 119,332^2 \cdot 0,002^2 = 188,61 \text{ Н.}$$

Таким образом, величина усилий, развиваемых в момент контакта струи с преградой, рассчитанная по различным методикам, имеет одинаковые значения. Эти усилия по своей величине недостаточны для разрушения волокна.

При мгновенном контакте с неподвижной преградой налетающей струи, кроме физических явлений, описанных выше, имеет место процесс удара (рис. 2), сопровождающийся явлением, влекущим за собой ударную волну. Она проявляется при условии [1], когда скорость струи

$$u_{\text{уд}} = \frac{\lambda}{\eta}, \quad (16)$$

где  $\lambda$  – коэффициент поверхностного натяжения суспензии;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости суспензии.

При нормальных условиях для воды  $\lambda = 73$  МН/м;  $\eta = 1$  МН·с/м<sup>2</sup>

Тогда, в соответствии с [28] наименьшая скорость струи, при которой в момент контакта с неподвижной преградой в полной мере возникает гидравлический удар, сопровождающей этому явлению ударной волной, равна

$$u_{\text{уд}} = \frac{73}{1} = 73, \text{ м/с.}$$

При  $u_{\text{уд}} < 73$  м/с гидравлического удара в полной мере не происходит, потому что время деформирования струи меньше времени, в течение которого распространяется ударная волна по всей ее длине.

То есть, часть кинетической энергии, выделяющейся в момент удара, расходуется на деформирование (сплющивание) струи. Таким образом, прежние представления об ударе струи о преграду можно назвать условным ударом.

Рассмотрим, что происходит при мгновенном возникновении контакта между фронтом нагнетающей струи и неподвижной преградой. Попробуем вычислить давление на преграду в этом случае, как и в предыдущих примерах, считаем, что:

- струя имеет в сечении круг радиусом  $r_0$ ;
- скорость струи перед ударом о стену равна  $u$ .
- в движении находится цилиндрический столб водной суспензии с равномерно распределенным в нем волокнистым материалом.

При решении задачи не учитываются, следующие параметры: сила тяжести; вязкость жидкости; поверхностное натяжение; атмосферное давление.

В момент удара тонкий слой суспензии, вступающий в контакт с преградой, останавливается. Скорость суспензии в этом слое становится равной нулю, и он препятствует продвижению остальной массы цилиндрического столба суспензии, то есть сам слой суспензии становится препятствием. Об него тормозится следующий слой, также становящийся преградой и так далее. Возникает ударная волна, то есть вдоль цилиндрического столба суспензии от преграды начинает распространяться волна, которая разделяет уже остановившиеся слои от еще неостановившихся слоев. Скорость движения этой волны равна скорости звука в воде, то есть приблизительно  $u_{\text{зв}} = 1500$  м/с [40].

За время  $\Delta t$  скорость той массы, которая находится в цилиндре высотой  $u_{\text{зв}} \Delta t$ , упадет до нуля.

Согласно выражению (1) (только с заменой  $u$  на  $u_{\text{зв}}$ ), получаем формулу для нахождения давления в случае удара струи о преграду

$$P_{\text{уд}} = p u_{\text{зв}} u, \quad (17)$$

где  $p$  – плотность воды;  $u$  – скорость струи;  $u_{\text{зв}}$  – скорость звука в воде.

При использовании уравнения (16), мы говорим об истинном ударе, который подчиняется зависимости (17).

При скоростях струи  $u_{\text{уд}} \leq 73$  м/с гидравлический удар, пусть и не в полной мере, но все же происходит, и часть кинетической энергии трансформируется в ударное воздействие и в ударную волну.

Давление в месте контакта струи с преградой, при ударе и при истечении, были вычислены в диапазоне скоростей от 1 м/с до сверхзвуковых.

На основе полученных данных (табл. 1) был построен график зависимости давления от скорости истечения струи (рис. 3).

Полученные расчетные данные позволяют провести сопоставительный и при истечении струи в месте ее сопряжения с подвижной преградой, анализ силовых факторов для процессов, происходящих при ударе.

Рассматривая зависимость величины давления, развивающегося при взаимодействии непрерывно истекающей струи (второй этап) с неподвижной преградой, можно сделать вывод, что при значениях скоростей струи, ниже до 75 м/с, интенсификации гидродинамического воздействия на волокно, распределен-

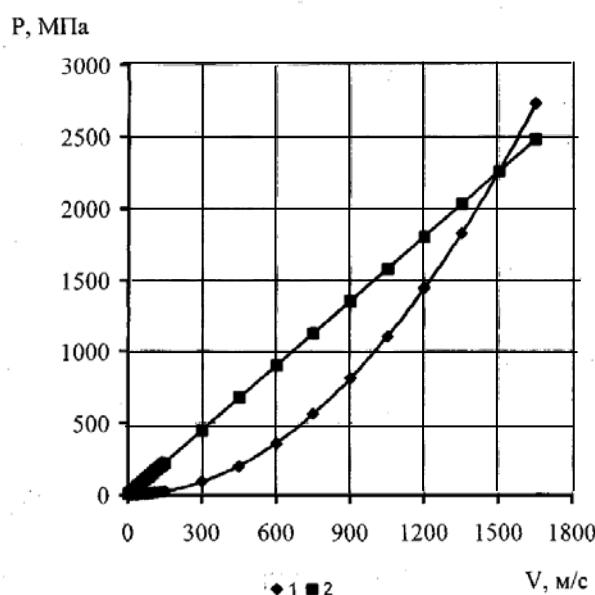
ное в струе, не происходит, то есть для разработки волокон данных величин давления недостаточно.

При ударе о преграду, при таких же скоростях струи, воздействие на волокно существенно увеличивается и величины давления уже, превышают предел прочности волокна, что приводит к локальным нарушениям его структуры.

**Таблица 1**

Значения расчетных давлений при различных скоростях истечения струи

Истечение		Удар		Отношение
$u, \text{ м/с}$	$P, \text{ МПа}$	$u, \text{ м/с}$	$P_{уд}, \text{ МПа}$	$P_{уд}/P$
1	0,001	1	1,5	1500,00
5	0,025	5	7,5	300,00
10	0,1	10	15	150,00
15	0,225	15	22,5	100,00
20	0,4	20	30	75,00
30	0,9	30	45	50,00
40	1,6	40	60	37,50
50	2,5	50	75	30,00
60	3,6	60	90	25,00
70	4,9	70	105	21,43
80	6,4	80	120	18,75
90	8,1	90	135	16,67
100	10	100	150	15,00
110	12,1	110	165	13,64
120	14,4	120	180	12,50
130	16,9	130	195	11,54
140	19,6	140	210	10,71
150	22,5	150	225	10,00
300	90	300	450	5,00
450	202,5	450	675	3,33
600	360	600	900	2,50
750	562,5	750	1125	2,00
900	810	900	1350	1,67
1050	1102,5	1050	1575	1,43
1200	1440	1200	1800	1,25
1350	1822,5	1350	2025	1,11
1500	2250	1500	2250	1,00
1650	2722,5	1650	2475	0,91



**Рис. 3. Зависимость давления от скорости истечения:**

1 – давление струи при ударе; 2 – давление струи при истечении

Сравним работу струи по потере импульса силы, при контакте с преградой. Если при непрерывном истечении струя суспензии за время  $\Delta t$  теряет импульс в цилиндре высотой  $h = u \Delta t$ , то при внезапном ударе о стенку, за время  $\Delta t$  теряется импульс в цилиндре высотой  $H = u_{3B} \Delta t$ , то есть в значительно большей массе суспензии.

Следовательно, развиваемое давление в месте контакта струи с преградой при ударе будет значительно выше, чем при истечении.

Это давление больше давления непрерывно истекающей струи, имеющей ту же скорость, на величину, равную

$$\frac{P_{уд}}{P} = \frac{u_{3B}}{u}. \quad (27)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, оценка силовых факторов, возникающих в месте контакта струи с преградой показала, что при внезапном ударе струи за единицу времени теряется значительно больший импульс, нежели при непрерывном истечении, т.е. в значительно большей массе суспензии. Соответственно и развивающее давление, и плотность энергии (энергия единицы объема жидкости) в первом случае должны быть так же значительно выше [36].

Однако время, в течение которого на волокно действует импульсная нагрузка при ударе струи о преграду, ничтожно мало по сравнению с временем истечения. Этим объясняется незначительное действие на волокно сил, возникающих в месте контакта струи с преградой, хотя, как отмечалось выше, фибрillation все же имела место за счет наличия кавитационного эффекта.

Исследования, проведенные на установке для измельчения волокнистого материала, показали, что уже при сравнительно не высоких скоростях струи, в момент удара ее о преграду, в стенках волокон появляется напряжение, превышающее предел его прочности.

Однако наличие опасных напряжений в том или ином месте стенки означает лишь то, что разрушения структуры возможны именно в этих локальных точках, но не гарантированы по всей длине волокон. [36].

Глубокая же степень разработки, в конечном счете, зависит от энергии удара, т.е. от скорости струи и числа ее соударений о преграду. Повышение скорости струи обычными способами связано со значительными энергозатратами и конструктивными усложнениями.

Вышеуказанные гидродинамические воздействия на волокнистую суспензию при размоле можно объяснить не только для установок безножевого размола, но они также правомерны для ножевых размольных машин, поскольку в них наблюдаются ударные воздействия волокнистой суспензии на рабочие органы ножевых гарнитур и на внутренние поверхности статора и ротора.

Более предпочтительным представляется возможность трансформирования малоскоростной струи в высокоскоростную, при малых энергозатратах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выяснено, что при размоле волокнистых полуфабрикатов в технологии производства продукции ЦБП серьезную роль играет гидродинамическое воздействие в зоне размола, независимо от конструкции размольных установок, использующих ножевой и безножевой способы.

Одним из важных элементов гидродинамического воздействия на волокно при размоле волокнистых полуфабрикатов является удар волокнистой суспензии о неподвижную преграду при течении её струи в зоне размола.

Произведен анализ и получены расчеты скорости течения волокнистой суспензии и величины силы удара её струи о неподвижную преграду.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гегузин Я. Е. Капля. М. : Наука, 1977. С. 54–58.
2. А.с. 1694748 ССР. Гидродинамический способ размола волокнистых материалов / Ю. Д. Алашкевич, Н. А. Войнов, А. Г. Лахно, Е. К. Тихонович. Бюл. 1992. № 44.
3. Корда И., Либнар З., Прокоп И. Аппараты, в которых гидродинамические пульсации давления создаются при помощи концентрических выступов (зубьев) // Размол бумажной массы. М. : Лесн. промст., 1967. С. 256–260.
4. Iaymc G. Neue Beitrage zur Theorie der Entstehung der Blattfestigkeit // Das Papier. 1961. № 100. S. 581–600.
5. Brecht W., Mikleu G. Eignungsuntersuchung einer Maschine zur Entstippung von Halbstoffen // Das Papier. 1960. № 2. S. 52–57; № 3. S. 91–96.
6. Гончаров В. Н., Гаузе А. А., Аликин В. П. Машины для распуска и бежножевого размола бумажной массы : учебное пособие. Л., 1979. 78 с.
7. Овсеенко Ю. Г. О движении вязкой жидкости между двумя вращающимися сферами // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1974. № 3. С. 179–180.
8. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л. : Судостроение, 1966. 439 с.
9. Пашинский В. Ф. Машины для размола волокнистой массы. М., 1972. 160 с.
10. Метелкин А. Ф., Матюшин Л. Ю. Влияние температуры на интенсивность процесса ультразвуковой очистки в жидкой среде // Ультразвуковая техника. М. : НИИМаш, 1968. Вып. 3. С. 48–55.
11. Сиротюк М. Г. Ультразвуковая кавитация // Акустический журнал. 1962. Вып. 3. С. 255–272.
12. Шемякин Э. В., Гончаров В. Н. Роль парогазовых пузырьков в размоле целлюлозных волокон // Тр. ЛТИ ЦБП. Л., 1970. Вып. 27. С. 138–141.
13. Добропольский Д. С. Акустический способ размола. Красноярск, 1961. 45 с.
14. А.с. 283823 ССР. Кавитационный аппарат для размола массы / Б. С. Петров, М. И. Леонидов. Бюл. 1970. № 31.
15. А.с. 421726 ССР. Устройство для размола волокнистой массы / Э. В. Шемякин. Бюл. 1974. № 12.
16. А.с. 268162 ССР. Способ размола волокнистых материалов / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев. Бюл. 1970. № 13.

17. А.с. 393382 СССР. Устройство для обработки волокнистой массы / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев, Ю. В. Козулин, Н. П. Зотин, Г. А. Воробьев и А. В. Ефимов. Бюл. 1973. № 33.
18. А.с. 572545 СССР. Установка для размола волокнистых материалов / Р. А. Солоницын, Л. А. Горбачев, Ю. В. Козулин, Н. П. Зотин. Бюл. 1977. № 34.
19. Janowski W. Pahlman R. Schall-und Ultraschall-erzeugung in Flussigkeiten fur industrielle Zwecke // Zeitschrift an der Physik. 1948. Heft 1. S. 222–228.
20. Hartmann J. Construction Performance and Design of the Acoustic Air-jet Generator // Journal Sci Instr., 1933.-Vol. 16. – P. 116–121.
21. Hagedorn H. Hydroulisches Beschallungsgerat fur Schall-Ultraschallwindung Filgew Maschinenbau // Veb. verlag Technik. 1954. Haft 4. S 122–128.
22. Jagoda M. a Slavik J. Modifikace Hartmanove zwukoveho generatoru Mat-fis // Casopic. 1957. Rocnik 7. № 1. S. 63–66.
23. Серова Л. А. Влияние ультразвука на процесс размола волокнистых материалов // Оборудование для размола. М. : ЦНИИТЭИспром, 1965. С. 21–30.
24. Долгин Г. Л., Аким Л. Е. К вопросу о размоле сульфитной вискозной целлюлозы ультразвуком // Тр. ЛТИ ЦБП. 1965. Вып. 17. С. 59–61.
25. Лосева Ю. П. Использование электрогидравлического эффекта в бумажной промышленности // Бум. пром-сть. 1957. № 9. С. 8–9.
26. Швальбе Х. Приготовление бумажной массы. М. : Гослесбумиздат, 1935. С. 76–77.
27. Марков В. Г. Исследование гидравлического размола массы : дис. ...канд. техн. наук. Л. : ЛТА, 1949. 213 с.
28. Верещагин А. Ф., Семерчан А. А., Филлер Ф. М. Некоторые исследования струи воды, вытекающей из сопла под давлением до 2000 атм // Изв. АН СССР. ОТТИ. 1957. № 1. С. 57–61.
29. Лышевский А. С. Определение силы удара гидромониторной струи о препятствия // Изв. вузов. Горн. журн. 1963. № 7. С. 29–37.
30. Нурук Г. А. Гидромеханизация открытых горных разработок. М. : Недра, 1970. 584 с.
31. Гавырин Г. П. Исследование гидромониторных струй // Изв. АН СССР. ОТН. 1939. № 7. С. 25–44.
32. Чугуев Р. Р. Гидравлика. Л. : Энергия, 1982. 672 с.
33. Штукатуров К. М., Куилин И. С. Влияние начального диаметра и напора струи на ее качество // Тр. ин-та горного дела АН СССР. Уральский фил. 1963. Вып. 3. С. 83–86.
34. Асатур К. Г. Гидравлический расчет гидроотбойки горных пород // Изв. вузов. Горн. журн. 1963. № 7. С. 23–28.
35. Никонов Г. П., Шавловский С. С., Хныкин В. Ф. Исследование динамики и структуры тонких струй воды давлением до 500 атм / ИГД им. Скочинского. М., 1969. 38 с.
36. Прандтль Л. Гидромеханика. М. : Иностр. лит., 1951. 575 с.
37. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1970. 898 с.
38. Falkner V.M. The resistance of a smooth plate with turbulent boundary layer // Aircraft Engineering. 1943. № 15. P. 65–72.
39. Терентьев О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М. : Лесн. пром-сть, 1980. 248 с.
40. Хилькевич С. С. Физика вокруг нас. М. : Hayka, 1985. С. 83–87.

## REFERENCES

1. Geguzin Ya. E. Kaplya. M. : Nauka, 1977. S. 54–58.
2. A.s. 1694748 СССР. Gidrodinamicheskij sposob razmola voloknistykh materialov / Yu. D. Alashkevich, N. A. Vojnov, A. G. Lahno, E. K. Tihonovich. Byul. 1992. № 44.
3. Korda I., Libnar Z., Prokop I. Apparaty, v kotoryh gidrodinamicheskie pul'sacii davleniya sozdavayutsya pri pomoshchi koncentricheskikh vystupov (zub'ev) // Razmol bumazhnoj massy. M. : Lesn. prom-st', 1967. S. 256–260.
4. Laymc G. Neue Beitrage zur Theorie der Entstehung der Blattfestigkeit // Das Papier. 1961. № 100. S. 581–600.
5. Brecht W., Mikleu G. Eignungsuntersuchng eine Maschine zur Entstippung von Halbstoffen // Das Papier. 1960. № 2. S 52–57; № 3. S. 91–96.
6. Goncharov V. N., Gauze A. A., Alikin V. P. Mashiny dlya rouspaska i bezhnozhevogo razmola bumazhnoj massy : uchebnoe posobie. L., 1979. 78 s.
7. Ovseenko Yu. G. O dvizhenii vyazkoj zhidkosti mezhdu dvumya vrashchayushchimisa sferami // Zhurn. prikl. mekhaniki i tekhn. fiziki. 1974. № 3. S. 179–180.
8. Pernik A. D. Problemy kavitacii. L. : Sudostroenie, 1966. 439 s.
9. Pashinskij V. F. Mashiny dlya razmola voloknistoj massy. M., 1972. 160 s.
10. Metelkin A. F., Matyushin L. Yu. Vliyanie temperatury na intensivnost' processa ul'trazvukovoj ochistki v zhidkoj srede // Ul'trazvukovaya tekhnika. M. : NIIMash, 1968. Vyp. 3. S. 48–55.
11. Sirotyuk M. G. Ul'trazvukovaya kavitaciya // Akusticheskij zhurn. 1962. Vyp. 3. S. 255–272.
12. Shemyakin E. V., Goncharov V. N. Rol' parogazovyh puzyr'kov v razmole cellyuloznyh volokon // Tr. LTI CBP. L., 1970. Vyp. 27. S. 138–141.
13. Dobrovolskij D. S. Akusticheskij sposob razmola. Krasnoyarsk, 1961. 45 s.
14. A.s. 283823 СССР. Kavitacionnyj apparat dlya razmola massy / B. S. Petrov, M. I. Leonidov. Byul. 1970. № 31.
15. A.s. 421726 СССР. Ustrojstvo dlya razmola voloknistoj massy / E. V. Shemyakin. Byul. 1974. № 12.
16. A.s. 268162 СССР. Sposob razmola voloknistykh materialov / R. A. Solonicyn, L. A. Gorbachev. Byul. 1970. № 13.
17. A.s. 393382 СССР. Ustrojstvo dlya obrabotki voloknistoj massy / R. A. Solonicyn, L. A. Gorbachev, Yu. V. Kozulin, N. P. Zotin, G. A. Vorob'ev i A. V. Efimov. Byul. 1973. № 33.
18. A.s. 572545 СССР. Ustanovka dlya razmola voloknistykh materialov / R. A. Solonicyn, L. A. Gorbachev, Yu. V. Kozulin, N. P. Zotin. Byul. 1977. № 34.

19. Janowski W. Pahlman R. Schall-und Ultraschall-erzeugung in Flussigkeiten fur industrielle Zwecke // Zeitschrift an der Physik. 1948. Heft 1. S. 222–228.
20. Hartmann J. Construction Performance and Design of the Acoustic Air-jet Generator // Journal Sci Instr., 1933. Vol. 16. P. 116–121.
21. Hagedorn H. Hydraulisches Beschallungsgerat fur Schall-Ultraschallwindung Filgew Maschinenbau // Veb. verlag Technik. 1954. Haft 4. S 122–128.
22. Jagoda M. a Slavik J. Modifikace Hartmanove zwukoveho generatoru Mat-fis // Casopic. 1957. Rocnik 7. № 1. S. 63–66.
23. Serova L. A. Vliyanie ul'trazvuka na process razmola voloknistyh materialov // Oborudovanie dlya razmola. M. : CNIITEllesprom, 1965. S. 21–30.
24. Dolgin G. L., Akim L. E. K voprosu o razmole sul'fitnoj viskoznoj cellyulozy ul'trazvukom // Tr. LTI CBP. 1965. Vyp. 17. S. 59–61.
25. Loseva Yu. P. Ispol'zovanie elektrogidravlicheskogo effekta v bumazhnoj promyshlennosti // Bum. prom-st'. 1957. № 9. S. 8–9.
26. Shval'be H. Prigotovlenie bumazhnoj massy. M. : Goslesbumizdat, 1935. S. 76–77.
27. Markov V. G. Issledovanie gidravlicheskogo razmola massy : dis. ... kand. tekhn. nauk. L. : LTA, 1949. 213 s.
28. Vereshchagin A. F., Semerchan A. A., Filler F. M. Nekotorye issledovaniya strui vody, vystekayushchej iz sopla pod davleniem do 2000 atm // Izv. AN SSSR. OTTI. 1957. № 1. S. 57–61.
29. Lyshevskij A. S. Opredelenie sily udara gidromonitornoj strui o prepyatstviya // Izv. vuzov. Gorn. zhurn. 1963. № 7. S. 29–37.
30. Nurok G. A. Gidromekhanizaciya otkrytyh gornyh razrabotok. M. : Nedra, 1970. 584 s.
31. Gavyrin G. P. Issledovanie gidromonitornyh struj // Izv. AN SSSR. OTN. 1939. № 7. S. 25–44.
32. Chuguev R. R. Gidravlika. L. : Energiya, 1982. 672 s.
33. Shtukaturov K. M., Kuilin I. S. Vliyanie nachal'nogo diametra i napora strui na ee kachestvo // Tr. in-ta gornogo dela AN SSSR. Ural'skij fil. 1963. Vyp. 3. S. 83–86.
34. Asatur K. G. Gidravlicheskiy raschet gidrootbojki gornyh porod // Izv. vuzov. Gorn. zhurn. 1963. № 7. S. 23–28.
35. Nikonorov G. P., Shavlovskij S. S., Hnykin V. F. Issledovanie dinamiki i struktury tonkih struj vody davleniem do 500 atm / IGD im. Skochinskogo. M., 1969. 38 s.
36. Prandtl' L. Gidromekhanika. M. : Inostr. lit., 1951. 575 s.
37. Lojcanskij L. G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M. : Nauka, 1970. 898 s.
38. Falkner V. M. The resistance of a smooth plate with turbulent boundary layer // Aireract Engineering. 1943. № 15. P. 65–72.
39. Terent'ev O. A. Gidrodinamika voloknistyh suspenzij v cellyulozno-bumazhnym proizvodstve. M. : Lesn. prom-st', 1980. 248 s.
40. Hil'kevich S. S. Fizika vokrug nas. M. : Nauka, 1985. S. 83–87.

© Алашкевич Ю. Д., Ушаков А. В., 2025

---

Поступила в редакцию 19.05.2025  
Принята к печати 04.08.2025