

УДК 541.182: 532.517

Долинский А.А., Иваницкий Г.К., Ободович А.Н.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДИВЭ ПРИ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Проведено аналіз механізмів ДІВЕ, що реалізуються в роторно-пульсационних апаратах під час їх роботи. Показано, що механізми вибухового скипання і кавітації, а також механізм зсувних напружень в значній мірі впливають на ефективність цих апаратів в процесі обробки гетерогенних сумішей.

Проведен аналіз механізмів ДИВЭ, которые реализуются при работе роторно-пульсационных аппаратов. Показано, что механизмы взрывного вскипания и кавитации, а также механизм сдвиговых напряжений оказывают существенное влияние на эффективность этих устройств в процессах обработки гетерогенных смесей.

We analyze the DPEI mechanisms, which are realized in the course of operation of rotor-pulse devices. It is shown that the explosive-boiling and cavitation mechanisms as well as the shear stress mechanism affect substantially the efficiency of these devices in the processes of treatment of heterogeneous mixtures.

 $F$  – сила; $G$  – скорость сдвига; $g$  – ускорение; $p$  – давление; $P$  – напряжение; $Q$  – объемный расход; $R$  – радиус; $r$  – радиальная координата; $v$  – скорость; $u_{ac}$  – скорость звука; $\delta$  – ширина зазора; $\mu$  – динамический коэффициент вязкости; $\rho$  – плотность; $\tau$  – время; $\omega$  – угловая скорость;

РПА – роторно-пульсационный аппарат;

СОЖ – смазываемо-охлаждающая жидкость.

**Индексы:** $l$  – жидкость; $r$  – радиальный; $sh$  – сдвиговой; $\varphi$  – тангенциальный.**Введение**

Роторно-пульсационные аппараты находят широкое применение в различных отраслях промышленности, прежде всего при проведении базовых технологических операций измельчения, диспергирования, эмульгирования, связанных с гомогенизацией обрабатываемых многокомпонентных текучих смесей. Особенно перспективным является использование этих устройств с целью обработки продуктов растительного происхождения и сложных биологических систем для нужд пищевой, консервной и фармацевтической индустрии. Накопленный в Институте технической теплофизики НАН Украины многолетний опыт по созданию, совершенствованию и промышленной эксплуатации роторно-пульса-

ционных аппаратов (РПА) различных модификаций доказал многовекторность их практического применения и принципиальную возможность рационального и надежного использования для решения различных технологических задач [1,2].

Высокую эффективность аппараты этого типа показали при проведении операций смешения и гомогенизации высоковязких смесей, например для получения водо-мазутных, водо-топливных эмульсий и СОЖ, а также при обработке вязкопластичных материалов растительного происхождения [3–7]. На основе модифицированной конструкции РПА разработана и внедрена в производство инновационная технология приготовления гомогенизированной соевой пасты для детского питания, которая базируется на термовлажностной и роторно-пульсационной обра-

ботке бобов сои [7–9]. Микроструктурный анализ полученной по данной технологии белковой пасты показал, что в результате роторно-пульсационной обработки происходит разрушение структуры сои до клеточного уровня [7]. Это доказывает чрезвычайно высокий уровень динамических эффектов, создаваемых в аппарате.

Совершенствование технологии приготовления суслу из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением роторно-пульсационной обработки для сверхтонкого измельчения зерна [5,6] позволило при сокращении энергозатрат на 30% добиться существенно более высокой степени дисперсности помола по сравнению с той, которую обеспечивают традиционные измельчающие устройства (молотковые, шаровые, роliko-маятниковые дробилки). Использование РПА в данной технологии позволило создавать силовые воздействия на микроуровне, в результате чего зерна крахмала вследствие разрушения внутренних межклеточных связей приобретают свойства растворимого крахмала. Учитывая, что разрушающие усилия при сдвиговом скалывании крахмалосодержащего эндосперма зерен пшеницы, ячменя, кукурузы (основных видов сырья в данном производстве) измеряются в мегапаскалях, а при продольном сжатии – в десятках мегапаскалей [10], можно количественно оценить уровень силовых воздействий, которые инициируются в РПА.

Проведенные экспериментальные исследования кинетики процесса инверсии сахарозы при производстве глюкозо-фруктозного продукта с использованием роторно-пульсационного аппарата позволило почти в 20 раз сократить продолжительность технологического процесса и за счет этого существенно снизить энерго- и ресурсозатраты при очевидном улучшении биологических и органолептических показателей готового продукта [11]. Полученные в результате исследования данные о том, что основными факторами интенсификации процесса инверсии сахарозы при использовании РПА является температура раствора и величина сдвиговых напряжений, позволяют сделать заключение об основных физических механизмах, реализуемых в аппарате, которые обеспечивают столь высокую степень влияния на скорость протекания химических

процессов. Величина энергии разрыва межмолекулярных связей при инверсии сахарозы (1070 кДж/моль) позволяет судить о количественных величинах энергетических воздействий, который обеспечивается в аппарате при реализации конкретного механизма.

Различные модификации РПА находят широкое применение в технологиях сушки. В процессах сушки обрабатываются самые разнообразные жидкие продукты, например, в фармацевтике, пищевой и химической промышленности. На практике процесс сушки в большинстве случаев является завершающей стадией технологической цепочки. Перед подачей на вход сушильной камеры исходное сырье (зачастую, растительные и животные продукты или продукты микробиологического синтеза) подвергают предварительной обработке с целью его измельчения и увеличения удельной поверхности испарения [12, 13].

Высокая диспергирующая способность роторно-пульсационных аппаратов эффективно используется в процессах абсорбции слабо растворимых газов, прежде всего за счет создания весьма высокой удельной поверхности контакта фаз [14,15]. В качестве основного механизма диспергирования газовой фазы рассматривается дробление газовых пузырьков под действием сдвиговых напряжений в узком зазоре между ротором и статором [15].

Роторно-пульсационные аппараты, используемые преимущественно для интенсификации гидромеханических и массообменных процессов, могут применяться так же и как генераторы тепловой энергии [16]. По расчетам авторов работы коэффициент теплопроизводительности, который определяется отношением суммарного количества теплоты, выделяемой в процессе работы РПА, к затраченной энергии, достигает 1,8. Величина КПД (отношение теплоты, израсходованной на нагрев жидкости в обогревательном контуре, к энергии, поступающей на вход аппарата) составляет 60...70%. Анализируя работу роторно-пульсационного аппарата как генератора тепловой энергии, обеспечивающего экологически безопасную, экономичную, промышленную реализуемость, надежность, простоту эксплуатации, авторы рассматривают в качестве основной причины выработки теплоты механизм кавитации в каналах статора.

Хотя принцип работы аппаратов роторно-пульсационного типа известен уже на протяжении нескольких десятилетий, а теоретические и экспериментальные исследования, направленные на совершенствование его конструкции, проводятся во многих научных центрах, вопрос о природе физических механизмов, обеспечивающих высокую эффективность его работы в различных процессах, пока еще остается открытым. Считается общепризнанным, что в основе работы роторно-пульсационных аппаратов лежит принцип дискретно-импульсного ввода энергии, что обеспечивает многообразие физических механизмов, инициируемых в процессе работы аппарата, и многофакторность их воздействия на обрабатываемый продукт [1,2,16,17].

Целью настоящей статьи является анализ механизмов дискретно-импульсного ввода энергии, которые реализуются в рабочих элементах аппарата в процессе его работы, и оценка эффективности каждого из этих механизмов применительно к решению конкретных технологических задач с применением РПА.

### **Механизмы интенсификации гидромеханических процессов РПА**

Роторно-пульсационные аппараты в качестве гомогенизирующего устройства применяются для обработки дисперсных сред: газ – жидкость, жидкость – жидкость и твердое тело – жидкость. Характерно, что непрерывной средой обрабатываемой гетерогенной смеси всегда является жидкость, что обеспечивает принципиальную возможность реализации в аппарате широкого спектра факторов гидродинамического воздействия, которые в совокупности рассматриваются как базовые механизмы ДИВЭ [18,19]. Применительно к работе роторно-пульсационных аппаратов эти факторы проявляются следующим образом.

1. Силовое воздействие со стороны непрерывной жидкой фазы на дисперсные частицы вследствие резкого торможения или ускорения потока. Это приводит к резкому перепаду давления и возникновению разрушающего продольного напряжения сжатия.

2. Инициирование явления гидродинамического удара.

3. Гидроакустическое воздействие на дисперсии вследствие периодического развития мелко-масштабных пульсаций давления, явлений взрывного вскипания и кавитации.

4. Чрезвычайно высокие скорости сдвига и, как следствие, сильные сдвиговые напряжения, действующие на дисперсную фазу.

Кроме указанных гидродинамических факторов, высокая степень диспергирования обеспечивается также механическим воздействием на частицы гетерогенной среды, которое заключается в ударных, срезающих и истирающих нагрузках при непосредственном контакте дисперсий с рабочими элементами РПА.

Рассмотрим особенности работы роторно-пульсационного аппарата применительно к решению задач гидромеханической обработки и гомогенизации дисперсных систем и основные факторы, которые используются в аппарате при решении этих задач.

В качестве базовой модели РПА используем конструкцию аппарата цилиндрического типа, состоящую из трех коаксиально размещенных цилиндрических элементов – двух статоров и вращающегося между ними ротора. Между ротором и статором существуют очень узкие кольцевые зазоры. На поверхностях статоров и ротора параллельно оси вращения с равной периодичностью расположены узкие щелевые отверстия одинаковой ширины, которые взаимно перекрываются при вращении ротора. Если внутри аппарата находится жидкость, вращение ротора обеспечивает тангенциальное движение жидкости в кольцевых зазорах и, вследствие действия центробежных сил, ее радиальное перемещение через щелевые отверстия ротора и статоров.

Конструктивные характеристики базовой модели РПА следующие [2]:

Расстояние внутренней поверхности ротора от оси вращения  $R_{r1} = 30 \cdot 10^{-3}$  м.

Расстояние внешней поверхности ротора от оси вращения  $R_{r2} = 34 \cdot 10^{-3}$  м.

Толщина стенок ротора и статоров  $l = 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Ширина щели на поверхности ротора и статоров  $a = 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Высота щели ротора и статоров  $h = 24 \cdot 10^{-3}$  м.

Расстояние между щелями  $b = 3 \cdot 10^{-3}$  м.

Ширина зазора между ротором и статорами  $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м.

Количество щелевых отверстий на поверхности ротора (статора)  $n = 30$ .

Режимные параметры:

Объемный расход обрабатываемой смеси  $Q = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Угловая скорость вращения ротора  $\omega = 47,5 \text{ об/с} = 298 \text{ рад/с}$ .

Тангенциальная скорость внутренней поверхности ротора  $v_{\phi 1} = \omega R_{r1} = 8,95 \text{ м/с}$ .

Тангенциальная скорость внешней поверхности ротора  $v_{\phi 2} = \omega R_{r2} = 9,53 \text{ м/с}$ .

Усредненное значение тангенциальной скорости ротора  $v_{\phi} = (v_{\phi 1} + v_{\phi 2})/2 = 9,54 \text{ м/с}$ .

Конструкции роторно-пульсационных аппаратов, разработанных в ИТТФ НАНУ, их динамические и энергетические характеристики, особенности распределения потоков в аппаратах, диссипативные эффекты при обработке смесей, примеры использования РПА при обработке высоковязких сред и биологических систем детально рассмотрены в работах [1,2]. В данной статье ставится задача проанализировать кратко роль базовых механизмов ДИВЭ, реализуемых в данном аппарате, с целью выбора оптимальных вариантов конструкции и технологических режимов при решении конкретных технологических задач.

Рассмотрим, каким образом указанные выше механизмы ДИВЭ реализуются в рабочих элементах роторно-пульсационного аппарата в процессе его работы.

### **Гидродинамические процессы в каналах внутреннего статора**

Поток обрабатываемой смеси, протекающий через аппарат, многократно прерывается, благодаря взаимному перекрытию отверстий ротора и статора, с периодичностью порядка 2 кГц. При перекрытии щелей статора поверхностью ротора жидкость в щелевых каналах I статора резко тормозится.

Время от начала перекрытия отверстий до полного перекрытия  $\tau_1 = a/v_{\phi} = 0,3 \text{ мс}$ , длительность полного перекрытия  $\tau_2 = (b-a)/v_{\phi} = 0,1 \text{ мс}$ , а время раскрытия отверстий  $\tau_3 = a/v_{\phi} = 0,3 \text{ мс}$ . Такой цикл изменения проходного сечения кана-

ла для движения жидкости в радиальном направлении повторяется каждые 0,7 мс, так что при работе аппарата стадия полного раскрытия канала фактически отсутствует.

При перекрытии щелевого отверстия и связанного с этим резкого торможения потока в жидкости в каналах первого (внутреннего) статора возникают высокоамплитудные пульсации давления. При этом кинетическая энергия потока периодически трансформируется в потенциальную энергию с инициированием явления гидравлического удара в качестве сопутствующего эффекта. В щелевых каналах второго статора, вследствие резкого сброса давления при закрытии канала и его быстрого последующего восстановления в процессе открытия, периодически создаются быстродействующие мощные эффекты взрывного вскипания и кавитационного схлопывания. Частота и амплитуда этих пульсаций зависит как от скорости вращения ротора, так и от количества щелей и скорости потока внутри аппарата.

Перемещение жидкости в радиальном направлении происходит в пульсирующем режиме, так что линейная скорость движения жидкости в щелевых каналах меняется от максимального значения —  $v_{r \max}$  до минимального —  $v_{r \min} \approx 0$ . Среднее значение радиальной скорости  $\bar{v}_r = Q/nah = 0,463 \text{ м/с}$  существенно меньше тангенциальной скорости потока в зазорах. Максимально достижимая радиальная скорость  $v_{r \max}$  определяется условиями перекрытия канала и равна 1,08 м/с, что на порядок меньше тангенциальной скорости потока у поверхности ротора. Следствием невысоких значений линейной скорости потока является сравнительно низкий уровень развития динамических эффектов, связанных с торможением и ускорением потока и сопутствующих эффектов гидравлического удара.

Величина ускорения в канале I статора, при перекрытии и последующем раскрытии щелевых отверстий, определяется по формуле  $|g_r| = (v_{r \max} - v_{r \min})/\tau_1$  и составляет  $3,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$ . Это намного меньше тех ускорений, которые реализуются в таких аппаратах ДИВЭ, как пульсационный диспергатор с активной диафрагмой или вакуумный эмульгатор [19].

При быстром перекрытии отверстий на выходе из каналов I статора в каждом из этих каналов

возникает эффект гидравлического удара. В момент полного открытия канала жидкость движется в канале длиной  $l$  со скоростью  $v_{r \max} = 1,08$  м/с и к моменту полного перекрытия канала  $\tau_1 = 0,3$  мс тормозится до значения  $v_{r \min} \approx 0$ . Вследствие этого в выходном сечении канала формируется импульс высокого давления  $\Delta p$ , который распространяется навстречу потоку к входному сечению канала со скоростью звука  $u_{ac}$ , которая зависит от свойств обрабатываемой среды. Через промежуток времени  $\tau = 2l/u_{ac}$  (т.н. фаза удара) повышенное давление сменяется разрежением, и в течение времени  $\tau = 2l/u_{ac}$  жидкость находится под низким давлением. Период колебаний давления в канале, связанных с инициированием явления гидравлического удара, определяется величиной  $\tau = 4l/u_{ac}$ .

Если непрерывной жидкой фазой является вода, период колебания давления в канале I статора равен 11,5 мкм, а фаза удара длится 5,7 мкс. За время полного перекрытия отверстия  $\tau_2 = 0,1$  мс в канале успевает произойти около десяти осцилляций давления. Если время перекрытия канала превышает длительность фазы удара, происходит не прямой гидравлический удар, для которого амплитуда импульса давления зависит от соотношения фазы удара ко времени закрытия и определяется по формуле  $\Delta P = 2\rho_l v_{r \max} l / \tau_1$ . Для рассматриваемого аппарата величина амплитуды осцилляций равна 0,028 МПа, а частота затухающих колебаний – около 90 кГц. Характерно, что при непрямом гидравлическом ударе (в отличие от прямого) амплитуда давления не зависит от скорости звука в обрабатываемой среде.

При средней радиальной скорости  $\bar{v}_r = 0,463$  м/с жидкость проходит щелевой канал I статора за время порядка 10 мс, и за этот промежуток времени осуществляется около 15 перекрытий канала и, следовательно, столько же раз каждый элемент обрабатываемой среды успевает подвергнуться действию гидравлического удара. Хотя амплитуды пульсаций давления при гидравлическом ударе сравнительно невелики, непрерывность и высокая частота этих пульсаций несомненно вносят определенный вклад в процесс гидромеханической обработки продукта.

### **Гидродинамические процессы в каналах внешнего статора**

Качественно иные явления наблюдаются при периодическом перекрытии отверстий в канале II статора. В момент совмещения щелевых отверстий ротора и статора в канале внешнего статора скорость жидкости максимальна. При перекрытии отверстий поступление жидкости в канал статора замедляется, а затем фактически прекращается, так как ее незначительное поступление происходит только за счет транзитного течения из радиального зазора между ротором и статором. Жидкость, находящаяся в канале, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают в ней растягивающие напряжения. По мере опорожнения канала давление быстро снижается от нормального до давления насыщенного пара при температуре среды, что вызывает взрывное вскипание жидкости внутри канала. В течение времени  $\tau_1 + \tau_2 = 0,4$  мс происходит интенсивный рост пузырьков, причем в начальной стадии скорость роста достигает 1000 м/с. При открытии отверстия в канал I статора поступает импульс высокого давления, что приводит к интенсивному схлопыванию большой совокупности пузырьков с выделением высокоамплитудного импульса давления. В результате за короткое время давление возрастает до нескольких атмосфер к моменту последующего перекрытия отверстий. Таким образом, внутри канала II статора постоянно с частотой порядка 2 кГц происходят высокоамплитудные колебания давлений, вследствие чего возникает мощный гидроакустический эффект. Кавитационные явления, происходящие в канале статора, и сопутствующие им фазовые превращения можно рассматривать как акустическую кавитацию, которая является одним из наиболее жестких механизмов ДИВЭ и которая широко используется с целью интенсификации массообменных и гидромеханических процессов в дисперсных средах [17,19,21]. Тождественность кавитационных процессов, протекающих во внешнем статоре РПА, и явления акустической кавитации подтверждают экспериментальные данные. В работе [17] приведены фотографии кавитационного кластера, образованного над ультразвуковым магнестрикционным излучателем

при статическом давлении 0,2 МПа, и фотографии кавитационного кластера в канале статора роторно-импульсного аппарата. Сходство формы и структуры обоих кластеров дает основания предполагать о тождественности механизмов их формирования и стабилизации.

### Сдвиговое течение в межцилиндровых зазорах РПА

Мощные пульсационные эффекты являются одним из основных факторов, обеспечивающих высокую эффективность РПА в процессах гомогенизации и измельчения различных продуктов, прежде всего структурированных продуктов растительного и биологического происхождения. Не менее важный вклад, особенно при дроблении твердых частиц и эмульсий, вносит механизм сдвиговых напряжений в узких зазорах между ротором и статором. Величина линейной скорости обрабатываемой жидкости в зазорах изменяется от нуля на границе с поверхностью статора до значения тангенциальной скорости вращения ротора на границе с его поверхностью. В этой зоне аппарата происходит наибольшая диссипация энергии, но именно в ней происходит наиболее сильное разрушающее воздействие на дисперсные частицы.

Использование напряжений сдвига в сдвиговых течениях является одним из базовых механизмов ДИВЭ, обеспечивающих жесткое воздействие на дисперсные частицы [18]. Сила взаимодействия частицы с жидкостью пропорциональна градиенту  $dv_{\varphi}/dr$ . Возможность разрушения дисперсии зависит от того, насколько быстро изменяется величина тангенциальной скорости потока в зазоре вдоль координаты  $r$ . В отличие от других механизмов ДИВЭ в этом случае трансформация энергии происходит не во

временных, а в пространственных координатах [19]. Энергетическим показателем эффективности этого механизма является “скорость” изменения плотности кинетической энергии потока  $\varepsilon_k$  в радиальном направлении оси, т.е. величина  $d\varepsilon_k/dr$ .

Величина сдвиговой скорости, достигаемая в зазорах РПА, зависит только от технических характеристик аппарата и определяется формулой  $G = R_1\omega/\delta$ . Для рассматриваемого здесь образца аппарата  $G \approx 600000 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует стандартным значениям этого параметра в современных промышленных аппаратах ( $10^4 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$ ) [4,17]. В соответствии с законом Гука, величина действующего на частицу растягивающего напряжения  $P_{sh} = F_{\zeta}/0,5S_m$ , где  $S_m$  – площадь миделева сечения частицы плоскостью, перпендикулярной потоку, а  $F_{\zeta} \propto \zeta\rho_l S_m^2 G^2$  – растягивающая сила. Коэффициент гидродинамического сопротивления  $\zeta$  можно оценить по формуле  $\zeta = 2,25(16/Re + 2,2/Re^{0,5} + 0,6)$ , а число Рейнольдса для сдвиговых течений определяется соотношением  $Re = \rho_l G R^2 / \mu_l$ .

Таким образом, величина растягивающего напряжения  $P_{sh}$  в сдвиговых течениях в зазорах РПА зависит главным образом от числа  $Re$ , и в соответствии с этим вязкость обрабатываемой жидкой смеси должна оказывать определяющее влияние на степень динамического действия.

Оценка величины сдвигового напряжения, действующего на частицу в зазорах РПА, проведена при  $G = 60000 \text{ с}^{-1}$  для частиц с диаметром  $d$  в интервале от 1 до 1000 мкм при различных значениях динамической вязкости в интервале от 0,001 до 15 Па·с.

Результаты расчета представлены в табл. 1 для различных значений вязкости потока в указанном интервале значений  $d$  и  $\mu_c$ .

Табл. 1. Растягивающие напряжения (в МПа), действующие в зазоре РПА на частицы различного размера при разных значениях вязкости несущей жидкости  $\mu_c$

$d$ , мкм	Вязкость жидкой фазы $\mu_l$ , Па·с							
	0,001	0,01	1	2,5	5	7,5	10	15
1	0,0015	0,020	0,049	0,092	0,140	0,182	0,222	0,36
10	0,0065	0,022	0,052	0,103	0,145	0,190	0,226	0,37
100	0,022	0,030	0,105	0,105	0,150	0,205	0,280	0,375
1000	0,08	0,122	0,165	0,230	0,290	0,349	0,400	0,680

При всех заданных значениях вязкости потока  $\mu_c$  величина растягивающих напряжений  $P$  в интервале  $1 \text{ мкм} < d < 100 \text{ мкм}$  слабо зависят от размера частиц. Для более крупных частиц величина напряжений заметно возрастает с увеличением диаметра частицы. Значения сдвиговых напряжений оказываются достаточно высокими даже для малых частиц и заметно возрастают по мере увеличения вязкости несущей фазы потока.

Для оценки размера дисперсий, разрушаемых под действием сдвиговых напряжений в промышленных РПА, необходима информация о природе разрушаемых связей и усилиях, которые необходимо приложить для разрыва этих связей в каждом конкретном случае.

Возможность разрушения твердых частиц в зазоре аппарата роторного типа исключительно под действием сдвиговых напряжений показана в работе [22], где приведены результаты экспериментальных исследований разрушения агрегатов малого размера, образованных из частиц измельченного цемента, и приводятся данные по величине связей между частицами агрегатов различного размера.

Объектом исследования выбрана суспензия измельченного цементного порошка в водо-глицириновом растворе с вязкостью в интервале от 2 до 5 Па·с. Содержание дисперсной фазы в суспензии – 2 г/л. Исследуемая смесь пропусклась через узкий зазор между двумя цилиндрами, внешний из которых с диаметром 108 мм вращался с высокой скоростью. Ширина зазора составляла 2 мм. Стенки цилиндров сплошные без целевых отверстий. Частота вращения внешнего цилиндра в эксперименте изменяется от 50 до  $120 \text{ с}^{-1}$ , что для указанной ширины зазора соответствует изменению величины сдвиговой скорости в интервале от 5200 до  $13000 \text{ с}^{-1}$ .

Испытания проводились с фракцией частиц с диаметрами в интервале 40...63 мкм, среди которых лишь 32% составляли агрегаты, которые потенциально могли быть разрушены с помощью исследуемого метода. Заметное разрушение агрегатов начиналось при частоте вращения ротора  $60 \text{ с}^{-1}$ . При частоте вращения  $75 \text{ с}^{-1}$  эффект заметно возрастал – при таком режиме в суспензии появилось свыше 10% частиц с диаметром менее 20 мкм, которых не было в исходной суспензии.

Автор отмечает, что при указанных режимах обработки материала число Рейнольдса находилось в пределах 10...20, так что режим обтекания близок к стоксовскому.

Полученные в этой работе результаты доказывают возможность разрушения частиц в аппаратах роторного типа только за счет сдвиговых напряжений в зазоре без необходимости дополнительного учета каких-либо других механизмов. Кроме того, в этой работе указана природа связей частиц в агрегатах и приводятся численные значения напряжений, которые необходимы для разрушения цементных агрегаций за счет разрыва частиц. Испытания показали, что в проведенных экспериментах при указанных режимах разрушить удается только агрегаты, частицы которых связаны силами Ван-дер-Ваальса. Если частицы в агрегатах спеклись или подверглись брикетированию, силы сцепления между частицами на два порядка выше и такие образования не поддаются разрушению при условиях опыта.

В работе [22] представлена таблица, в которой по данным эксперимента показано, какие напряжения необходимо создать, чтобы разорвать связи между частицами в агрегатах различного размера и разрушить эти агрегаты. К этой таблице нами добавлены колонки, в которых по результатам проведенного нами расчета показано, какая величина сдвиговых напряжений достигается в условиях указанного эксперимента при необходимости разрушить агрегаты определенного размера (см. табл. 2).

### **Заключение**

Проведенный анализ показал, что в аппаратах РПА рассмотренной модификации в полной мере реализуются механизмы взрывного вскипания и гидроакустической кавитации (в каналах внешнего статора) и механизм сдвиговых напряжений (в межцилиндровом зазоре). В меньшей степени используются механизмы ускорения потока и гидравлического удара (в каналах внутреннего статора). Вместе с тем трудно сделать однозначное заключение о том, какой именно механизм превалирует в каждом конкретном случае при использовании промышленных РПА для решения

Табл. 2. Анализ разрушения агрегатов цемента в аппаратах роторного типа по данным [22]

Данные работы [22]		Расчетные результаты по модели			
Исходный размер частиц, мм	Напряжение разрыва связей Ван-дер-Ваальса, кПа	Сдвиговое напряжение, кПа			
		$G = 5200 \text{ с}^{-1}$		$G = 13000 \text{ с}^{-1}$	
		$\mu_c = 2 \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\mu_c = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\mu_c = 2 \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\mu_c = 5 \text{ Па}\cdot\text{с}$
100	<1	32,1	80,1	82,3	201,6
10	1... 10	31,5	78,2	78,3	195,4
1	100... 300	31,2	78,0	78,1	195,2

конкретных технологических задач [4 – 16]. Так, в работе [5] показано, что роторно-пульсационный аппарат может быть успешно использован в качестве диспергатора на стадии сверхтонкого измельчения зерна (пшеницы, ячменя, кукурузы) в спиртовом производстве. Отмечено, что крахмал, содержащийся в эндосперме зерна, при обработке в РПА теряет свойственную ему морфологическую структуру и в результате нарушения внутренних межклеточных связей приобретает свойства растворимого крахмала, что является основной задачей этой операции. Известно, что разрушающее усилие при сжатии мучнистого эндосперма пшеницы для освобождения зерен крахмала составляет 1,7 МПа, а при сдвиговом скалывании – 0,4...0,6 МПа [10]. Для зерен кукурузы эти показатели выше. Как следует из табл. 1, достижение таких показателей при использовании механизма сдвиговых напряжений возможно лишь при предельно высоких значениях вязкости среды ( $\mu_c > 10 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ). По-видимому, в данном случае существенный вклад вносит механизм кавитации, при котором реализуются сильные ударные воздействия и высокие значения напряжений сжатия и сдвига на микроуровне. В работе [10], в частности, приводится пример успешного силового воздействия на семена различных зерновых культур путем резкого сброса давления в камере от 0,12...0,17 МПа до 0,1 МПа. Такой перепад давления вызывает резкое изменение структуры зерна. Растительные клетки разрываются, а крахмальные зерна набухают. Возможно, что аналогичные явления должны возникать в каналах внешнего статора РПА на стадии разрежения и взрывного вскипания жидкости.

При анализе работы РПА, используемых для решения конкретных технологических задач в различных отраслях промышленности, необходимо учитывать и количественно оценивать вклад каждого механизма ДИВЭ в интенсификацию данного процесса. Это обеспечивает возможность выбора наиболее подходящей модификации аппарата и оптимальных режимных параметров с целью успешного решения поставленных задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях. – К.: Наукова думка, 2005. – 263 с.
2. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и теплоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках – К.: Наукова думка, 2001. – 345 с.
3. Басок Б.И., Гартвиц А.П., Коба А.Р., Горячев О.А. Оборудование для обработки и получения высоковязких дисперсных сред // Пром. теплотехника. – 1996. – Т.18, №1. – С.50–56.
4. Ободович А.Н. Розробка різновидів роторно-імпульсних апаратів для реалізації процесів дискретно-імпульсного вводу енергії в рідинних дисперсних середовищах // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 6/5. – С. 48–50.
5. Ободович А.Н., Грабова Т.Л., Коба А.Р., Горячев О.А. Совершенствование технологии приготовления суслу из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №4. – С.59–63.

6. *Басок Б.И., Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р.* Дискретно-импульсный ввод энергии в технологии бродильного производства //Пром. теплотехника. –2003. –Т.25, №4. – С.94–96.
7. *Басок Б.И., Пироженко И.А., Булавка Д.В.* Дисперсный анализ соевой пасты, полученной при роторно-пульсационной гомогенизации //Пром. теплотехника. –2003. – Т.25, №4. – С.88–92.
8. *Грищенко А.В., Терлецкая Я.Т., Шаркова Н.А., Жукотский Э.К.* Разработка высокобелковых композиций на соевой основе для лечебно-профилактического питания //Пром. теплотехника. – 2003. – Т.25, №4. – С.115–116.
9. *Шаркова Н.О., Жукотский Е.К., Грищенко Г.В.* Особливості технології виробництва соєвих продуктів //Пром. теплотехника. – 2004. – Т.26, №6. – С. 93–96.
10. *Маринченко В.А., Цыганков П.С., Швеиц В.Н. и др.* Интенсификация спиртового производства. – К.: Техніка, 1983. – 127 с.
11. *Басок Б.И., Ободович А.Н., Давыденко Б.В.,* Экспериментальное исследование массообмена при обработке углеводосодержащих сред //В кн. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. –Миколаїв: НУК, – 2007. – №5. –С.88–94.
12. *Басок Б.И., Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р.* Энергосберегающая безотходная технология гомогенизации плодоовощного и цитрусового сырья //Пром. теплотехника. –2003. –Т.25, №4. –С.90–93.
13. *Переяславцева Е.А., Грабова Т.Л., Турчина Т.Я., Карповец А.А.* Особенности гидродинамической обработки и распылительной сушки в технологии получения новых бактериальных препаратов // Труды II Международной научно-практ. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы)” СЭТТ–2005.–М.:–МЭИ.–Т.2. –С.287–290.
14. *Долинский А.А., Басок Б.И., Шетанков О.К., Чайка А.И.* Энергосберегающие абсорбционные технологии в производстве газированных напитков //Пром. теплотехника. – 2001. –Т.23, №4–5. – С.137–140.
15. *Корнюшенко Д.А., Блиничев В.И., Бондарева Т.И.* Адсорбция диоксида углерода водой при импульсном высокоэнергетическом воздействии //Изв. ВУЗов, Химия и химическая технология. – 2003. –Т.46, вып.5. – С.14–16.
16. *Промтов М.А., Акулин В.В.* Механизмы генерирования тепла в роторном импульсном аппарате //Вестник Тамбовского гос. техн. университета. – 2006. – Т.12, №2А. – С.363–369.
17. *Промтов М.А.* Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. – М.: Машиностроение, 2004. –136 с.
18. *Долинский А.А., Иваницкий Г.К.* Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька //Пром. теплотехника. – 1995. – Т.17, №5. – С.3–28.
19. *Долинский А.А., Иваницкий Г.К.* Принципы разработки новых энергоресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии //Пром. теплотехника. – 1997. – Т.19, №4–5. – С.24.
20. *Иваницкий Г.К.* Исследование механизма деформирования и разрушения капель в сдвиговых потоках //Материалы XX науч. конф. стран СНГ “Дисперсные системы”.–Одесса: Астропринт, 2002. – С.114–115.
21. *Кардашев Г.А.* Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Химия, 1990. – 206 с.
22. *Scheibe W.* Formation and dispersion of agglomerates during dry fine-grindings //ZKG International. – 1991. – N2. – P.57–62.

Получено 14.07.2008 г.