

УДК 66.021.1

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО – РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КАВИТАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

А.С. Цымбалов, В.Н. Блиничев

Ивановский государственный химико-технологический университет

В статье рассматриваются вопросы, посвященные преимуществам использования кавитации (гидродинамической, акустической) при помощи роторно-пульсационного аппарата для интенсификации процесса диспергирования и получения высокодисперсных, устойчивых эмульсий при минимальных затратах энергии. В настоящее время необходимо разрабатывать новые технологии и оборудование для получения устойчивых дисперсных эмульсий. Сейчас эмульсии чаще всего получают в аппаратах периодического действия при длительном механическом воздействии на дисперсные системы. Этот процесс достаточно трудоемок и неэкономичен в связи с низкой производительностью. Поэтому в данной статье ставятся задачи по определению оптимальных режимно – конструктивных параметров роторного аппарата для развития кавитации, которая существенно интенсифицирует процессы диспергирования.

Ключевые слова: диспергирование, эмульсия, гидродинамическая кавитация, акустическая кавитация, роторно-пульсационный аппарат.

В последнее время интенсификация технологических процессов вызывает огромный интерес в качестве одного из возможных средств модернизации процессов, для увеличивающихся потребностей в современных производствах.

Эмульсии – очень распространенный как в природе, так и в промышленности тип гетерогенных дисперсных систем, при которых одна жидкая фаза (внутренняя фаза) распределена в другой жидкой фазе (внешняя фаза). Они, как и другие дисперсные системы широко применяются в различных отраслях промышленности: пищевая, химическая, косметическая, фармацевтическая. Метод диспергирования является одним из наиболее эффективных способов для образования поверхности контакта фаз, которая оказывает огромное влияние на получение устойчивой высокодисперсной эмульсии [1].

В роторно-пульсационных аппаратах для гетерогенных систем наиболее мощным фактором интенсификации химических и физико-химических процессов, включающих в себя метод диспергирования, является кавитация, возникающая при обработке жидких систем [2].

Под кавитацией обычно понимают образование заполненных газом, паром или их смесью полостей или пузырьков при создании разрежения в ограниченной области при давлении жидкости. Образование кавитационных пузырьков возможно как вследствие больших местных скоростей в потоке капельной жидкости (гидродинамическая кавитация), так и вследствие прохождения акустических волн (акустическая кавитация) [3]. Показано, что кавитация существенно повышает многие химико-технологические процессы в жидкостях, например – диспергирования, растворения, получения тонкодисперсных систем в фармацевтической и пищевой промышленности. Кавитация может быть создана разными методами, в зависимости от цели и технико-экономических показателей технологии. Кавитационное воздействие на жидкость позволяет получать высококачественные технологические и пищевые растворы экстракторов, эмульсий и суспензий [4].

Кавитация в жидкости при работе аппаратов роторного типа вызывается несколькими факторами: развитая турбулентность потока жидкости, нестационарность потока жидкости, отрывные те-

чения на входном участке в канал статора.

В промышленности различают кавитацию акустическую, возникающую в жидких средах при прохождении звуковой волны большей интенсивности и гидродинамическую, характеризующую резкое локальное понижение давления в жидкости, вследствие больших скоростей потоков жидкости [2,5,6].

Акустическая кавитация вызывается за счет инерции объема жидкости, проникающей под давлением из канала ротора в канал статора, в момент совмещения канала ротора с каналом статора [7].

При использовании гидродинамических кавитаторов типа роторных импульсных аппаратов, реализуется гидродинамическое и акустическое воздействие в жидкости, за счет развитой турбулентности, пульсаций давления и скорости потока жидкости, интенсивной кавитации, ударных волн.

Для каждой конкретной жидкости существуют свои пороговые значения сдвиговых напряжений, при которых возникает гидродинамическая кавитация. Возможность возникновения ультразвуковой кавитации в аппаратах роторного типа определяется сочетанием соответствующей конструкции РПА и скорости вращения ротора [8]. Для подтверждения возникновения ультразвуковой кавитации в роторно-пульсационном аппарате при заданных диапазонах скоростей проводится эксперимент с применением метода химической дозиметрии. Метод химической дозиметрии основан на звукохимических реакциях, т.е. химических реакциях, которые при данной температуре не идут, в отсутствие акустических волн [9].

Диспергирование капель эмульсий происходит за счет влияния кавитационных пузырьков, образованных в ее области из-за рассеяния ударной волны.

Время диспергирования капли определяется диапазоном, в течение которого в зоне V_b возникает хотя бы один

кавитационный пузырёк. Временной диапазон возникновения пузырьков, приводящих к диспергированию капли, определяется уравнением:

$$t = \frac{T}{nV_b}, \quad (1)$$

где n – концентрация кавитационных пузырьков, m^{-3}

T – период схлопывания пузырьков, с

V_b – объем зоны схлопывания пузырьков, приводящих к распаду капли, m^3

Время диспергирования капли по уравнению (1) позволяет найти зависимость диаметра капли от времени при эмульсии масло в воде. Так, при интенсивности ультразвукового воздействия 2 Вт/см^2 при обработке в течение 10 мин, диаметр капель превышает 30 мкм, что является недостаточным для образования устойчивой эмульсии. Воздействие с интенсивностью 4 Вт/см^2 позволяет в течение 15 мин получать эмульсии с диаметром капель 12 мкм. При этом воздействие с интенсивностью 6 Вт/см^2 и более позволяет получать капли эмульсии диаметром менее 12 мкм уже в течение 10 минут.

В развитой кавитационной области общее количество кавитационных пузырьков во много раз превышает количество зародышей. Внутри кавитационной области происходит непрерывный процесс размножения и коагуляции кавитационных пузырьков. В данный момент характер кавитационной области, в которой образуются кавитационные пузырьки, зависит от множества факторов: коалесценция пузырьков, потоки на границе пузырька и внутри кавитационной области, газосодержание, изменение пульсации пузырька и т.д. В кавитационной области в течение долгого времени накапливается энергия, а затем мгновенно освобождается, из этого следует, что мгновенная мощность в несколько раз выше средней, вводимой в кавитационную область [5-6].

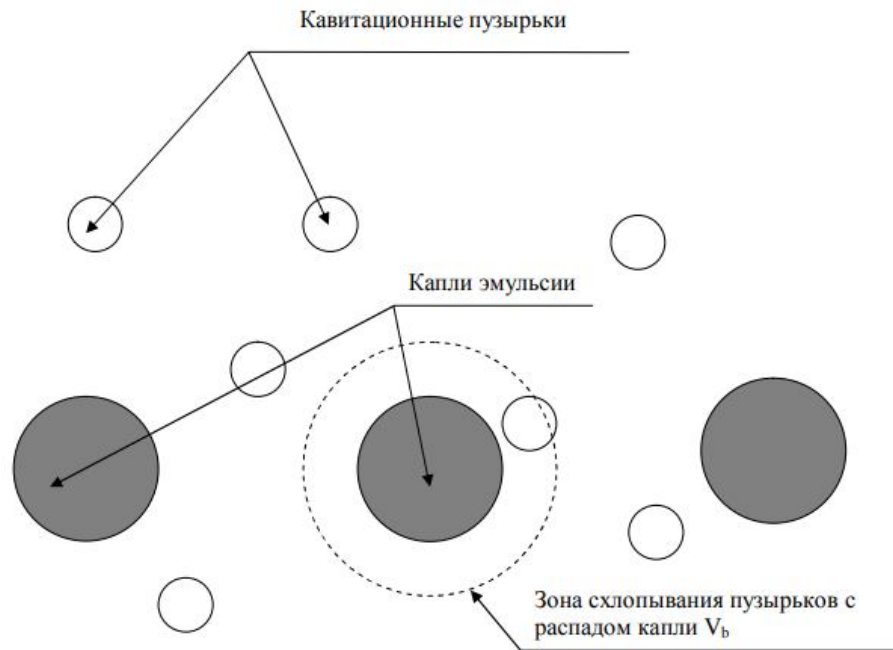


Рис. 1. Схематичное изображение воздействия кавитационных пузырьков на капли эмульсии

С помощью уравнения (2) можно получить величину, характеризующую степень развитости кавитации – индекс кавитации.

$$K = \frac{\Delta v}{v}, \quad (2)$$

где Δv – объем кавитационных пузырьков в фазе их наибольшего расширения, м^3 ;

v – объем, выделенный в кавитационной области, м^3 .

Численное значение индекса кавитации может изменяться от нуля до еди-

ницы. Значение индекса, равное нулю, означает отсутствие кавитации, а значение индекса кавитации, равное единице, показывает приобретение кавитационными пузырьками максимально возможных размеров, т.е. происходит заполнение пузырьками всего объема кавитационной области.

Из всего объема кавитирующей жидкости можно выделить сферическую область жидкой среды радиусом R_{MAX} в центре которого расположен газовый пузырек радиусом R_0 .

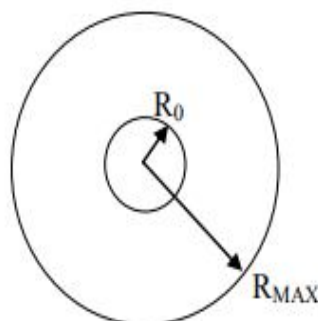


Рис. 2. Область жидкой среды с парогазовым пузырьком внутри

Если принять R_{MAX} за максимальное значение радиуса, к которому стремится пузырек, то в этом случае индекс

$$K = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (R^3 - R_0^3)}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (R_{MAX}^3 - R_0^3)} = \frac{R^3 - R_0^3}{R_{MAX}^3 - R_0^3}, \quad (3)$$

где R – текущий радиус кавитационного пузырька, м;

R_{MAX} – резонансный радиус, м;

R_0 – радиус зародыша, м.

Определение индекса кавитации заключается в нахождении радиуса R кавитационного пузырька, в зависимости от интенсивности и частоты воздействия, и определении R_{MAX} от частоты ультразвукового поля и физических свойств обрабатываемой жидкости.

Гидродинамическая кавитация может образоваться в потоках жидкости, в местах большого разрежения, вблизи и на поверхностях тел разной конструкции, имеющих переменное поле давления [3-4]. Переменное поле давления зависит от множества факторов и создается при помощи различных способов: за счет механических воздействий; от градиента скорости; в результате изменения потока; от величины сдвигового напряжения, которое возникает между элементами ротора и статора; изменение формы элементов конструкции [5].

В последние годы во многих научно-технических публикациях делают акцент на использовании кавитации для интенсификации химико-технологических процессов промышленности. Одним из таких процессов является получение высокодисперсных эмульсий без применения эмульгаторов (поверхностно-активных веществ).

Суперкавитирующие гидродинамические устройства по принципу работы бывают: статические, динамические, струйные, комбинированные [10].

Статические устройства имеют неподвижные рабочие органы, данные кавитационные аппараты снабжены неподвижными кавитаторами, представляющими собой препятствие на пути текущей

жидкости, каверны образуются за пределами рабочих органов. Аппараты этого типа имеют небольшие габариты при значительной производительности. Отличительная особенность этой конструкции – высокая интенсификация, интенсивное кавитационное воздействие, которое позволяет осуществлять высокую степень перемешивания компонентов. Что касается экономической части, то кавитационные аппараты статического типа, за счет незначительных габаритов, обусловлены низкой металлоемкостью, невысокими трудозатратами по ремонту и эксплуатации. Динамические конструкции характеризуются наличием вращающихся рабочих органов. Они обеспечивают изменения направления потока жидкости и поля скоростей за счет вращающихся элементов (лопастей). Каверны образуются на поверхности рабочих органов или за ними. Струйные устройства представляют собой аппарат со струйными кавитаторами. Комбинированные – состоящие из различных комбинаций первых трех типов [2,5,6].

Комбинирование кавитационных генераторов разного типа может увеличить эффект кавитации. Положительно сказывается генерирование колебаний с различными частотами, отличающимися друг от друга на порядок. Это связано с тем, что для активации зародыша кавитации конкретного радиуса необходимо генерировать колебания на определенной частоте. Если размеры зародышей кавитации небольшие, то частота должна быть выше и, следовательно, акустиче-

ское давление должно быть больше для образования кавитации [6].

Важными факторами при получении кавитации является форма исполнения кавитатора. Его устройство и величина давления в пузырьковой камере оказывают влияние на эффект кавитации и эффективность обработки. Значительной экономичностью обладают те кавитационные генераторы, у которых есть сопла типа Вентури или сопла Лавалья [4]. Так как в данных соплах процесс проходит в нестационарном режиме, то повышается диспергирующая способность. Для создания кавитационного воздействия, сопла должны обладать определенными геометрическими параметрами: угол раскрытия конфузора, диаметр горловины сопла, длина горловины сопла, угол раскрытия диффузора, число кавитации. В период начального образования кавитации, при движении эмульсии со значительными скоростями и постоянным давлением на входе в сопло, давление и ско-

рость потока в диапазоне кавитационной зоны резко изменяются, а потом остаются постоянными. Если пропустить эмульсию через канал сначала через сужение, а потом расширение, в потоке возникает кавитация. Все эти условия способствуют качественному диспергированию и гомогенизации.

В пульсационном аппарате роторного типа чаще всего возникает импульсная акустическая кавитация. Акустическая кавитация – эффективный механизм концентрации энергии, в котором низкая плотность энергии звукового поля преобразуется в высокую плотность энергии [2]. За счет малых объемов концентрации энергии повышается пригодность использования акустической кавитации для различной интенсификации процессов химической технологии. Важным критерием данной кавитации является акустическая мощность. Она напрямую зависит от градиента скорости сдвига.

Таблица 1

Зависимость акустической мощности от градиента скорости сдвига в механически активированной эмульсии М/В

Градиент скорости сдвига, $\gamma \cdot 10^{-4}$ (c^{-1})	0	0,5	1	2	3	4	5	6
Акустическая мощность, W (Вт)	1,1	1,8	40,1	43,2	44,2	44,6	44,8	44,8

Как видим из таблицы, при всех исследованных градиентах скорости сдвига выше $1 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ значения акустической мощности близки.

Поскольку акустическая кавитация напрямую зависит от геометрических параметров и размеров аппарата, сдвиговых напряжений и градиента скорости сдвига, необходимо правильно подобрать конструкцию роторно-пульсационного аппарата для эффективного диспергирования эмульсий [8].

Аппараты роторного типа нашли применение для интенсификации различ-

ных процессов при обработке дисперсных жидких и пастообразных систем в пищевой промышленности. Установки РПА отличаются оптимальным соотношением сдвиговой акустической и кавитационной составляющей, механическим воздействием, это применительно к гетерогенным системам, что позволит достигать высокие значения степени диспергирования капель эмульсий при однократном пропускании дисперсии через установку [7].

Диспергирование капель эмульсий достигается при прохождении эмульсии

через радиальные зазоры между элементами ротора и статора, за счет действия высокоскоростных сдвиговых нагрузок.

Также следует отметить, что энергию, затрачиваемую на образование кавитационного пузырька можно получить из уравнения (4):

$$E_0 = 4\pi R^2 \sigma + \frac{4}{3} \pi R^3 (P_0 + P_{II}) \quad (4)$$

где R – радиус пузырька, м;

σ – поверхностное натяжение, Н/м;

P_{II} – давление насыщенного пара при данной температуре, Па;

P_0 – статическое давление в жидкости, Па.

Энергия сжатия кавитационного пузырька определяется по формуле:

$$E_c = \frac{4}{3} \pi P R_{max}^3 \quad (5)$$

При получении критерия акустической кавитации $\chi_{a \max}$, необходимо учитывать объемное газосодержание α .

Зависимость критерия акустической кавитации, при которой будет достигнута

максимальная интенсивность акустической кавитации, от содержания свободного газа в газожидкостной среде определяется выражением (6):

$$\chi_{a \max} = 0,205 + 0,0075 \lg \alpha_0 + 0,0075 (\lg \alpha_0)^2 \quad (6)$$

где α_0 – содержания свободного газа в газожидкостной среде.

Зависимость $\chi_{a \max}$ от α_0 определяет условия, при которых кавитационное воздействие на обрабатываемую среду будет наибольшим [11].

Также при изменении статического давления в среде при постоянном свободном содержании газа, можно приобрести наилучшие условия для увеличения кавитационного воздействия на обрабатываемую среду.

Выводы. Анализ проведенных исследовательских работ показывает, что на интенсивность кавитационного воздействия оказывает огромное влияние выбор конструктивно – режимных параметров. В ходе исследований приведены различные характеристики, влияющие на гидродинамическую и акустическую кавитацию. Получены зависимости акустической мощности от градиента скорости сдвига в механически активированной эмульсии М/В. Наибольшее развитие кавитационного воздействия на обрабатываемую среду для интенсификации химических и физико-химических процессов,

включающих в себя метод диспергирования, было получено в роторных аппаратах.

Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях (получение, использование, утилизация. Киев: Наукова думка, 2005. 264 с.
2. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение-1, 2001. 260 с.
3. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. Киев. : Вища школа, 1984. 68 с.
4. Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II. Киев : ОКО, 2000. 898 с.
5. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества : учеб. пособие. М. : Машиностроение-1, 2004. 136 с.
6. Промтов М.А., Акулин В.В. Механизмы генерирования тепла в роторном импульсном аппарате // Вестник. Тамбовского государственного

ного технического университета. 2006. Т. 12. № 2А. С. 364–369.

7. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 192 с.

8. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.

9. Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.

10. Кулагин В.А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2000. 107 с.

11. Червяков В.М., Воробьев Ю.В. Основы теории и расчета деталей роторного аппарата: учебное пособие. Министерство образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет". Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2008. 111 с.

Рукопись поступила в редакцию 22.10.2018

THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE - REGIME PARAMETERS ON CAVITATIONAL IMPACT

A. Tsymbalov, V. Blinichev

In article the questions devoted to advantages of use cavitation (hydrodynamic, acoustic) are considered with the help of rotary pulsation apparatus for a process intensification of dispersing and receptions highly dispersed steady emulsions at the minimum expenses of energy. Today it is necessary to develop new technologies and equipment to obtain steady dispersed emulsions. Now emulsions receive in apparatuses of periodic action at long mechanical influence on disperse systems more often. This process is quite laborious and uneconomical due to low productivity. Therefore in given article problems by definition optimum regime-constructive parameters of rotary apparatus for development of cavitation, which essentially intensifies processes of dispersion are put.

Key words: dispersion, emulsion, hydrodynamic cavitation, acoustic cavitation, rotary pulsation apparatus.

References

1. Dolinskij A.A., Pavlenko A.M., Basok B.I. Teplofizicheskie processy v ehmul'siyah (poluchenie, ispol'zovanie, utilizaciya). Kiev: Naukova dumka, 2005. 264 s.

2. Promtov M.A. Pul'sacionnye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika. M.: Mashinostroenie-1, 2001. 260 s.

3. Fedotkin I.M., Nemchin A.F. Ispol'zovanie kavitacii v tekhnologicheskikh processah. Kiev.: Vishcha shkola, 1984. 68 s.

4. Fedotkin I.M., Gulyj I.S. Kavitiaciya, kavitacionnaya tekhnika i tekhnologiya, ih ispol'zovanie v promyshlennosti. CH. II. Kiev: OKO, 2000. 898 s.

5. Promtov M.A. Mashiny i apparaty s impul'snymi ehnergeticheskimi vozdeystviyami na obrabatyvaemye veshchestva: ucheb. posobie. M.: Mashinostroenie-1, 2004. 136 s.

6. Promtov M.A., Akulin V.V. Mekhanizmy generirovaniya tepla v rotornom impul'snom apparate. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. Т. 12. № 2А. С. 364–369.

7. Novickij B.G. Primenenie akusticheskikh kolebanij v himiko-tekhnologicheskikh processah. М.: Himiya, 1983. 192 s.

8. Balabudkin M.A. Rotorno-pul'sacionnye apparaty v himiko-farmaceuticheskoj promyshlennosti. М.: Medicina, 1983. 160 s.

9. Balabyshko A.M., YUdaev V.F. Rotornye apparaty s modulyaciej potoka i ih primenenie v promyshlennosti. М.: Nedra, 1992. 176 s.

10. Kulagin V.A. Superkavitaciya v ehnergetike i gidrotekhnike. Krasnoyarsk: IPC KGTU, 2000. 107 s.

11. CHervyakov V.M., Vorob'ev YU.V. Osnovy teorii i rascheta detalej rotornogo apparata: uchebnoe posobie. Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, GOU VPO "Tambovskij gosudarstven-nyj. tekhnicheskij universitet". Tambov: Izd-vo TGTU, 2008. 111 s.