

вація 70 % спирту у гідродинамічному кавітаційному модулі забезпечить збільшення ступеню вилучення цільових компонентів від 26,6 до 49,1 % залежно від розміру фракції рослинної сировини, що у вартісному вираженні становить 419,2 тис.грн. додаткового річного прибутку.

#### Література

1. Аксельруд Г.А. Экстрагирование (система «твердое тело – жидкость») / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
2. Вітенько Т.М. Інтенсифікація масообміну в системі капілярно-пористе тіло–рідина / Т.М. Вітенько // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск, 2006. – №3. – С.153-156.
3. Вітенько Т.М. Дифузійні константи процесу екстрагування валеріани при попередній кавітаційній обробці екстрагенту / Т.М. Вітенько // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск, 2007. – №3. – С.147–150.
4. Гулый И.С. Электромембранная обработка водных сред и ее применение в производстве пектина / И.С. Гулый, Л.Д. Бобровник, М.П. Купчик и др. // Пищевая промышленность. – 1993. – №11. – С.19-20.
5. Соснина Н.А. Экстрагирование пектиновых веществ амаранта в суперкавитирующем аппарате роторно-пульсационного типа / Н.А. Соснина, В.Ф. Миронов, А.И. Коновалов и др. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1999. – №6. – С.32-35.
6. Запорожец Е.П. Экстрагирование пектина из растительного сырья механическим способом в кавитационном аппарате / Е.П. Запорожец, А.М. Богус, М.Ю. Яхутль // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 1998. – №1. – С.84-85.
7. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія / Т.М. Вітенько. – Тернопіль: в-во ТНТУ ім. І.Пулюя, 2009. – 224с.
8. Дячок В.В. Математична модель процесу екстрагування із рослинної сировини / В.В.Дячок // Хімічна промисловість України. – 2001. – №4. – С.52-55.
9. Вітенько Т.М. Исследование механизма активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т.М. Вітенько, Я.М. Гумницький // Химия и технология воды. – Киев, 2007. – №5. – С.422–432.
10. T.Vitenko. Kinetic laws of flavonoid extraction from mulberry leaves by extractant cavitation activation / T.Vitenko, Ya. Gumnitsky // Chemistry&Chemical Technology. – Lviv: Polytechnic National University, 2011. – V. 5, № 4, – P. 459-462.

УДК 532.528

## КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ СОЗДАНИЯ КАВИТАЦИИ

Анисимов В.В., аспирант, Ермаков П.П., д.т.н., проф.

Государственное высшее учебное заведение

«Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск

*В статье дано краткое введение в явление кавитации. Представлена классификация способов создания кавитации. Для каждого способа приведены обобщенные конструктивные схемы аппаратов, их ориентировочные технические характеристики. Приведены параметры, которые характеризуют кавитацию, получаемую различными способами.*

*An short introduction into the phenomenon of cavitation is given. A classification for the methods of creation the cavitation is presented. The general constructional schemes and approximate technical characteristics of apparatus for every method is given. The parameters, which characterize obtained in different ways cavitation, are shown.*

**Ключевые слова:** кавитация, способ создания, классификация.

Явление кавитации известно человечеству достаточно давно. Впервые явление кавитации было теоретически предсказано Рейнольдсом [1,2]. На практике же явление кавитации было впервые обнаружено еще в конце IX века при проведении испытаний морских судов [1,3]. Изначально это явление рассматривалось только как сугубо негативное, способствующее разрушению поверхностей гребных винтов судов, шуму и вибрациям. До 40-х годов прошлого века исследование кавитации шло достаточно медленно. Это было связано со сложностью создания в лабораторных условиях больших скоростей движения жидкости, необходимых для возникновения кавитации. И только после 40-х годов началось интенсивное ее иссле-

дование. Причем теперь исследования проводились не только в контексте уменьшения вредного влияния кавитации на работу гребных винтов, гидротурбин, элементов насосов, но и с целью получения некоторых полезных эффектов, возникающих при кавитации.

Общепринятым законом динамики кавитационного пузырька принято считать уравнение Рэля-Плессета, которое фактически является модификацией соответствующего уравнения Рэля с учетом давления газа в пузырьке, изменяющегося давления в жидкости, вязкости и поверхностного натяжения [4]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left( P_g - P_0 - P(t) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} \right);$$

где  $R(t)$  — текущий радиус пузырька во времени;

$P_0$  — статическое давление жидкости;

$\rho$  — плотность жидкости;

$P_g$  — давление газовой смеси в пузырьке;

$P(t)$  — внешнее переменное давление;

$\mu$  — коэффициент вязкости жидкости;

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

На сегодняшний день кавитация достаточно широко распространена в промышленности для интенсификации химических процессов, гомогенизации смесей, для дезинтеграции твердых частиц в жидкости, для очистки поверхностей, для обогрева. Также кавитация используется и в медицине, например для уничтожения камней в почках.

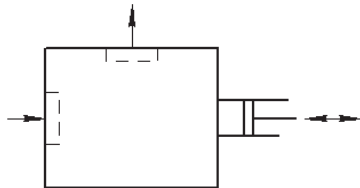
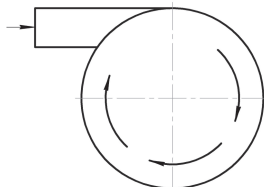

Несмотря на широкое применение кавитации, на данный момент не существует строгой классификации способов создания кавитации и их сравнительного анализа. Это приводит к сложности сопоставления данных, полученных при разных исследованиях, трудностям при подборе аппаратуры для производства, а так же при ее проектировании и вообще сложностям при систематизации имеющихся на сегодняшний день данных про кавитацию.


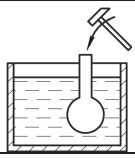
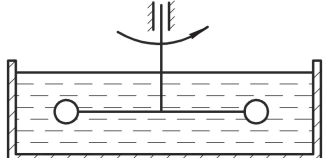
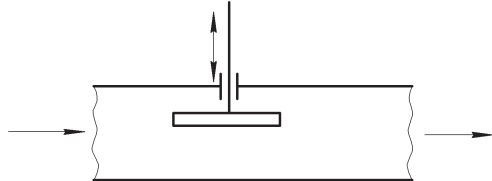
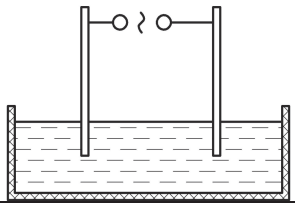
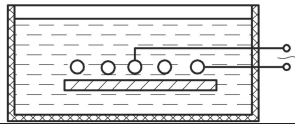
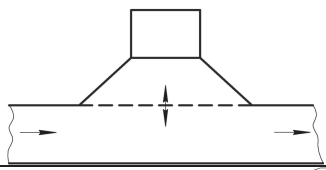

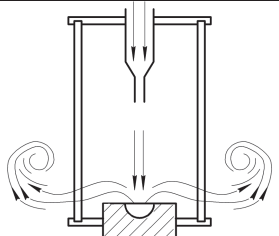
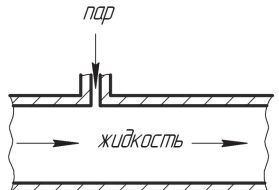
В результате возникает необходимость в создании классификации существующих способов получения кавитации и приведению их к какой-то упорядоченной системе, удобной для анализа и принятия решений.

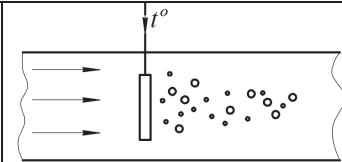
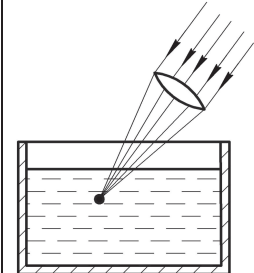
Обычно в литературе кавитацию по способу создания разделяют на гидродинамическую и акустическую [5,6]. Это достаточно общая и неполная классификация, которая не учитывает многих особенностей при создании кавитации и пригодна только для первичного знакомства с данным явлением.

При анализе способов создания кавитации можно выделить пять основных групп способов создания кавитации: механические, электрические, акустические, теплофизические, физические, которые приведены в таблице.

Таблица

Группа	Способ	Схема
механические	поршневой	
	вихревой	
	высокоскоростное обтекание тел	

	течение жидкости в канале с переменным сечением	
	удар	
	высокоскоростное движение тел	
электрические	электромеханический (магнитострикционный, пьезодинамический)	
	высоковольтный электроразряд	
	магнитоимпульсный	
акустические	звуковой динамик с мембраной	
	свисток-генератор	
	струйный излучатель	
теплофизические	конденсационный	

	кипение	
физические	импульсное облучение сфокусированным лучем	

Каждая из вышеописанных групп объединяет определенное количество способов создания кавитации по виду явления, которое лежит в основе данного способа. Так, механические способы основаны на механическом воздействии на жидкость со стороны некоторого тела, вследствие чего в жидкости образуются зоны пониженного давления, в которых и возникает кавитация.

Конечно, некоторые способы с различных точек зрения можно отнести к разным группам, так, электромеханический способ имеет общие черты со способом удара, а струйный обтекатель – со способами высокоскоростного обтекания и переменного сечения. В таких случаях для принятия решения об отнесении способа в ту или иную группу использовались предполагаемые конструктивные признаки установок для реализации этих способов.

Кроме того, в рамках некоторых групп есть способы, которые на первый взгляд очень близки и должны быть объединены в один обобщенный способ. Такие способы были разделены опять же вследствие значительного конструктивного различия установок, необходимого для реализации этих способов. Так, высокоскоростное обтекание и высокоскоростное движение тел из механической группы действительно довольно похожи: в обоих случаях кавитация образуется за счет высоких скоростей относительного движения жидкости и тела. Различие только в том, что в случае обтекания жидкость движется относительно неподвижного тела, а в случае высокоскоростного движения тело движется относительно жидкости. Но это небольшое на первый взгляд отличие влечет принципиальные изменения конструкции и принципа действия установки. Для высокоскоростного обтекания необходимо создание проточного трубопровода с закрепленными в нем телами, а движение жидкости создавать при помощи насоса. В то же время для реализации способа высокоскоростного движения тел необходимо вращательное движение тел от привода и емкость с жидкостью, а трубопровода, насоса не требуется. Таким образом эти две конструкции имеют существенное различие.

Рассмотрим каждый способ создания кавитации отдельно.

Поршневой способ основывается на создании пониженного давления в жидкости при ходе поршня вверх. В данном случае кавитация может создаваться во всем объеме жидкости. Амплитуда движения поршня в таких устройствах достаточно мала, например, в устройстве [7] амплитуда составляет 2-3 мм.

Вихревой способ основывается на закручивании потока жидкости и образовании в центре закручивания зоны пониженного давления и кавитации, действующей на поток.

Способ высокоскоростного обтекания основывается на создании зоны пониженного давления за обтекаемым телом, в которой и возникает кавитация. Для его реализации необходимо создание достаточной скорости потока жидкости, в среднем 15-20 м/с [8].

Способ переменного сечения основывается на ускорении потока жидкости в малом сечении и создании зон кавитации за ним. Характеризуется необходимостью создания высокого давления и скорости в потоке жидкости, порядка 20 атм [9]. При этом достигается скорость жидкости 30-50 м/с. Наиболее типичными устройствами такого типа являются сопла Вентури, но существует большое количество других устройств с более сложным соплом, которые позволяют создать необходимое давление и усилить кавитацию [10,11].

Способ удара основывается на создании зон повышенного и пониженного давления в жидкости за счет прохождения волн, излучаемых телом, которое подверглось удару.

При способе высокоскоростного движения тел за движущимся телом образуется зона кавитации, подобная той, что в способе высокоскоростного обтекания. Этот способ достаточно прост в исполнении, по некоторым сведениям, кавитация начинается уже при скорости движения тела 15 м/с [12,13].

Электромеханический способ основывается на создании вибраций рабочего элемента при помощи электрического привода, вследствие чего вокруг рабочего элемента создается зона кавитации. В данном случае под электрическим приводом следует понимать магнитострикционный или пьезодинамический привод. Промышленностью выпускаются магнитострикционные излучатели мощностью от 1,6 до 4 кВт, рабочей частотой 16 – 18 кГц [14]. Преимущественно они работают при напряжении 440 В, хотя есть маломощные модели, рассчитанные на 220 В. Пьезодинамические преобразователи работают при гораздо меньшей мощности, до нескольких сотен Ватт и примерно при том же напряжении (200 – 400 В).

Способ электрического разряда заключается в пропускании мощного импульсного разряда между электродами, помещенными в жидкость (электрогидравлический эффект Юткина [15]). Чем круче фронт электрического импульса, чем менее сжатая жидкость, тем выше ударное давление. Электрогидравлический удар применяется при холодной обработке металлов, при разрушении горных пород, при интенсификации химических реакций и т.д.

При магнитоимпульсном способе индуктором создается магнитное импульсное поле, которое толкает электропроводящий диск с огромной скоростью. Перед диском создается повышенное давление, а за диском создаются вихри. Оба последних метода имеют недостаток в том, что требуют повышенных мер безопасности в связи с использованием больших электрических напряжений.

В способе создания кавитации с помощью звукового динамика с мембраной кавитация создается за счет колебаний мембраны динамика. Данный способ чем-то подобен поршневому, но использует для создания колебаний мембраны звуковые волны, как следствие колебания происходят на других частотах (на звуковых частотах).

Способ использования свистков-генераторов основан на возникновении колебаний свистка при набегании на него потока жидкости. Колебания свистка приводят к возникновению кавитации в зоне свистка. Наиболее интенсивная кавитация – на кончике свистка [5]. Жидкостные свистки работают в диапазоне от нескольких сотен до 20 – 30 кГц и обладает полезной мощностью в несколько десятков Ватт. Работа свистков слабо эффективна, вместе с кавитацией они производят шум. Кроме того, острие свистка подвержено интенсивной кавитационной эрозии.

Струйный излучатель основывается на образовании кавитации при завихрении отраженной от резонатора струи [5]. Кавитация образуется в объеме жидкости на некотором расстоянии от резонатора. Он значительно более эффективен, по сравнению с жидкостными свистками.

Конденсационный способ основан на непосредственном введении пара в жидкость. Пузырьки газа в жидкости охлаждаются и схлопываются. Технологическим недостатком данного метода есть то, что кавитационные пузырьки довольно большие и не создают качественных кумулятивных струек при схлопывании.

Способ кипения основан на разогреве жидкости до температуры кипения, вследствие чего за нагревателем образуются пузырьки пара, которые схлопываются при понижении температуры после прохождения зоны нагрева. Как и в предыдущем способе, пузырьки слишком большие и не создают нужных кумулятивных струек.

Способ импульсного облучения сфокусированным лучом основан на фокусировании энергии луча в объеме жидкости, вследствие чего жидкость в нем вскипает. Так, для СО<sub>2</sub>-лазера при мощности излучения 1 – 5 кВт луч проникает в жидкость (воду) на глубину 10 – 50 мм [16]. Этот способ малоэффективен, т.к. создает кавитацию в очень малом объеме. Кроме того, он требует оборудования для создания высокоэнергетического луча и его фокусировки.

Таким образом, существует множество способов создания кавитации, отличающихся видом подводимой энергии, физическим явлением в основе, объемом кавитационной зоны, размерами создаваемых пузырьков, периодичностью или непрерывностью процесса. Все эти параметры важны при выборе конкретного способа для решения определенной задачи. При этом предлагаемая классификация дает возможность взглянуть на целостную картину способов создания кавитации и выбрать конструктивный вариант оптимального способа исходя из поставленных целей и задач.

### Литература

1. Пирсол И. Кавитация [Текст] / И. Пирсол. - М. : Мир, 1975. – 95 с.
2. Reynolds O. The causes of racing of the engines of screw steamers, investigated theoretically and by the experiment [Text] / O. Reynolds. - Tr. Inst. Naval Arch. V14 Sc. Papers, 1, 56-57, 1873.
3. Рождественский В. В. Кавитация [Текст] / В. В. Рождественский. – Л. : «Судостроение», 1977 г. - 247 с.
4. Смородов Е. А. Физика и химия кавитации. [Текст] / Е. А. Смородов, Р. Н. Галиахметов, М. А. Ильгамов. - М. : Наука, 2008. - 228 с.

5. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция [Текст] / М. А. Маргулис. - М. : Химия, 1986, - 288с .
6. Birkhoff G. Jets, wakes and cavities [Text] / G. Birkhoff, E. N. Zarantonello. – New York: Academic press, 1957, 466 p.
7. Пат. 25775 Україна, МПК В01F 5/00. Кавітаційний пристрій для обробки води / Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Гордєєв О.А., Третько В.В., Урбанюк Є.А. – № u200702555; Заявл. 12.03.2007; Опубл. 27.08.2007. Бюл. № 13. – 2 с.
8. Пат. 13941 А Україна, МПК В01F 3/08, В01F 5/00. Кавітаційний реактор / Шаповалюк М. І., Шаповалюк В. М., Боровський В. В., Федоткін І. М. - № 95114877; Заявл. 15.11.1995; Опубл. 25.04.1997. Бюл. № 2.
9. Пат. 4624 Україна, МПК В06В 1/20. Спосіб отримання коливань тиску та пристрій для його здійснення / Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Манько І. К., Северін В. П., Томчаков М. Л. - № 4738607/SU; Заявл. 19.09.1989; Опубл. 28.12.1994, бюл. № 7.
10. Пат. 2123957 Российская Федерация, МПК В63В59/08, В08В3/02. Способ подводной гидродинамической очистки корпусов судов и устройство для его осуществления / Макитрук А.А., Шильников С.Н., Жудин Ю.Г., Мухтаров Р.И., Клоков И.А., Кийко М.Ю. – № 98111015/28; Заявл. 18.06.1998; Опубл. 27.12.1998.
11. Пат. 2001666 Российская Федерация, МПК В01F5/00. Гидродинамический кавитационный эмульгатор / Кузеев И.Р., Хафизов Ф.Ш., Хуснияров М.Х., Абызильдин Ю.М, Дегтярев Н.С., Шуверов В.М. – № 4892602; Заявл. 22.10.1990; Опубл. 30.10.1993.
12. Витенько Т. Н. Экстрагирование из капиллярно-пористых тел с использованием предварительной кавитационной обработки экстрагента [Текст] / Т. М. Витенько // Энерготехнологии и ресурсосбережение.- 2008. - №5.- с. 77-79.
13. Витенько Т. Н. Особенности кинетики обеззараживания воды, содержащей E.coli в условиях гидродинамической кавитации [Текст] / О. Р. Гашин, Т. Н. Витенько // Химия и технология воды.- 2008, т.30, №5.
14. Новиций Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах [Текст] /М. А. Маргулис.- М. : Химия, 1983.- 192 с.
15. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности [Текст] / Л. А. Юткин.- Л. : Машиностроение, 1986.- 253 с.
16. Голубев В. С. Гидродинамические аспекты формирования каверны при глубоком проникновении излучения СО2-лазера в жидкости [Текст] / В. С. Голубев // Письма в ЖТФ, 2003.- том 29, вып. 5.

УДК 621.929:664.7

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЖИДКОСТЬЮ

**Ловкис З.В.,** член-корр. Нац. академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор,  
**Садовская А.В.,** аспирант  
РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»,  
г. Минск

*С целью интенсификации производства, снижения энергопотребления, улучшения качества процессов смешивания, а также на основании теоретического анализа разработан экспериментальный образец установки-смеситель для приготовления смеси, рабочими органами которого являются эллипсные диски. В результате теоретического исследования установлены факторы, влияющие на процесс смешивания зернового материала с жидкостью, зависящие от геометрических и кинематических параметров разработанного смесителя: частота вращения вала смесителя, количество дисков, угол наклона дисков. Для исследования влияния факторов по степени их влияния выполнено планирование эксперимента и проведены экспериментальные исследования процесса смешивания. На основании полученных данных установлены оптимальные параметры смешивания.*

*For the purpose of an intensification of production, decrease of power consumption, improvement of mixing processes quality and also on the basis of the theoretical analysis the experimental model of installation (mixer) with ellipse working bodies is developed for the mixture preparation. In the issue of theoretical research the factors, that influence on the process of grain materials mixing with a liquid, depending from geometrical and*