

УДК 532.528

Аверина Ю.М., Моисеева Н.А., Нырклов Н.П., Шувалов Д.А., Курбатов А.Ю.

СВОЙСТВА И ЭФФЕКТЫ КАВИТАЦИИ

Аверина Юлия Михайловна, кан. тех. наук, доцент кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии, председатель Совета молодых учёных, e-mail: averinajm@mail.ru;

Моисеева Надежда Анатольевна, магистрант кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии, e-mail: nadya5mo@bk.ru;

Нырклов Николай Павлович, магистрант кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии;

Шувалов Дмитрий Александрович, магистрант кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии

Курбатов Андрей Юрьевич, ассистент кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии,

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, Москва, Миусская пл. д. 9

Кавитация нашла своё применение в промышленности и других областях благодаря обнаруженным эффектам кавитации. В статье обращено внимание на понимание процесса кавитации, изучение его параметров и их контроля. Более подробно рассмотрены некоторые из эффектов, происходящих в жидкостях.

Ключевые слова: кавитация, эффекты кавитации, кавитационная каверна, пузырьки

PROPERTIES AND EFFECTS OF CAVITATION

Averina Yu. M., Moiseeva N.A., Nyrkov N.P., Shuvalov D.A., Kurbatov A. Yu.

D. I. Mendeleev University of Chemical Technology

Cavitation has found its application in industry and other fields due to the detected effects of cavitation. The article draws attention to an understanding of the process of cavitation, the study of its parameters and their control. Some of the effects occurring in liquids are discussed in more detail.

Key words: cavitation, effects of cavitation, cavitation cavity, bubble

Эффект кавитации широко распространяется и заменяет некоторые аналоговые процессы в различных областях деятельности человека. Во многом, это объясняется широким кругом различных действий кавитации на обрабатываемые среды, интенсификацию различных процессов. Кроме того кавитационные технологии являются менее дорогими, более безопасными, менее энергозатратными и, главное, отличаются высокой экологичностью их проведения, что является одной из важнейших проблем настоящего времени. Однако кавитация усложнена разработкой технологических комплексов, заключающейся в выборе технологических способов воздействия и определении конструктивно-режимных параметров при обработке конкретного материала. К этому ещё можно добавить возможность возникновения кавитационной коррозии обрабатываемой поверхности, и деталей генераторов кавитации. Но существуют методы защиты от такого процесса коррозии, например, нанесения покрытия или использования специально разработанных марок сплавов, противостоящих данному явлению (40X13, 3Л, 30X10Г10).

В общем случае под кавитацией понимают процесс парообразования, образование кавитационных пузырьков, или каверн (жидких полостей, заполненных газом, паром или их смесью), и последующее схлопывание их, сопровождающееся шумом и гидравлическими ударами. С научной точки зрения, кавитация рассматривается как средство локальной концентрации энергии низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных

пузырьков. При схлопывании пузырьков возникают ударные волны, приводящие к краткосрочному повышению давления порядка 100 МПа и температур до 10000 К [1, 2].

Эффективность кавитации зависит от некоторых параметров, прежде всего это [3]:

- скорость схлопывания;
- давление вблизи пузырьков в момент схлопывания числа пузырьков в кавитационной области;
- числа пузырьков в кавитационной области;
- энергии кавитации.

Фаза схлопывания пузырька полностью характеризует эти параметры, кроме числа пузырьков, вместо которых на практике используют величину индекса кавитации – объёмную концентрацию пузырьков. Зная форму пульсаций можно вычислить скорость схлопывания, оценить давление вблизи пузырька и рассчитать энергию кавитации:

$$K = \frac{\sum V_i}{V_{ж} + \sum V_i} \quad (1)$$

K – индекс кавитации; V_i – средний объём кавитационного пузырька; $V_{ж}$ – объём жидкости.

$$N = \rho V_{ж}, \quad (2)$$

N – число пузырьков; $\rho = \frac{3K}{4\pi R_{cp}^3}$ – концентрация пузырьков; R_{cp}^3 – средний радиус пузырька.

$$E_k \approx P \Delta V, \quad (3)$$

E_k – энергия кавитации; P – гидростатическое давление; ΔV – объём всех пузырьков в фазе из наибольшего расширения.

К методам контроля параметров кавитации относятся:

- методы, основанные на измерении параметров кавитатора;
- методы, основанные на определении интенсивности кавитации по степени проявления какого-либо эффекта кавитации;
- методы, основанные на определении параметров физических процессов, лежащих в основе действия кавитации [3].

Различают *гидродинамическую* и *акустическую* кавитацию. Гидродинамическая возникает вследствие местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твёрдого тела, которое может происходить за счёт увеличения её скорости. Акустическая кавитация образуется при прохождении через жидкость акустической волны большой интенсивности [11, 12].

В литературе приведены примеры наиболее частого практического применения акустической кавитации, так как она возникает под действием распространяемых в жидкости колебаний ультразвуковой частоты и строго заданной амплитуды давления, источником которых является ультразвуковой генератор. Но существуют неудобства использования таких генераторов: предварительный подбор параметров работы устройства и прокачиваемой жидкости, иначе кавитационные явления могут не развиваться. К ним относятся: звуковое давление, частота волн, внешнее давление, температура, плотность жидкости, вязкость, поверхностное натяжение, давление насыщенного пара жидкости, растворимость в ней газа. С этой точки зрения более удобными в применении рассматриваются гидродинамический способ инициирования кавитации. Гидродинамической кавитации добиваются помещением в поток устройства (решётку с цилиндрическими отверстиями), обеспечивающего локальный разгон потока до скорости снижения давления. Кавитационные пузырьки зарождаются и при дальнейшем разгоне потока растут и, при попадании в область больших давлений, схлопываются [4, 5].

Каверны возникают из зародышей кавитации, которыми могут являться пузырьки газа в жидкости или микрочастицы примесей. Рост пузырька приходится в фазе разряжения звукового поля, происходит испарение жидкости внутрь пузырька и диффузия в пузырёк растворённых в жидкости газов [2, 6]. При малых амплитудах ультразвуковой волны пузырёк может долгое время существовать и не схлопываться, а при больших амплитудах, соответствующих порогу кавитации, пузырьки схлопываются и появляются снова.

В кавитационную каверну могут проникать пары жидкости, растворённые в ней газы, вещества с высокой упругостью пара, и не могут проникать молекулы и ионы растворённых нелетучих веществ.

При схлопывании каверны выделяется достаточное количество энергии для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов внутри кавитационной каверны [1].

Эффектами кавитации являются очистка поверхностей от отложений, эрозия материалов, капиллярный эффект, увеличение поверхности диффузии, диспергирование, эмульгирование, дегазация, звукохимические реакции и сонолюминесценция, тиксотропный эффект, усиление проницаемости мембран, активизация ферментативной активности и др.

К характерным проявлениям кавитации относят ударные волны и кумулятивные струйки. Ударные волны различают двух типов: ударные волны в жидкости, направленные в сторону от пузырька, и ударные волны в пузырьке, направленные к его центру. При схлопывании пузырька происходит образование кумулятивных струй, направленных к поверхности. Эти струи носят характер разрушения поверхности твёрдого тела. Это способствует протеканию коррозии поверхностей металлов, так как из-за микроударов разрушается защитная плёнка металла, образуются химические соединения, и продукты коррозии отслаиваются, оставляя незащищённым металл, что ускоряет процесс коррозии [3, 6].

При проведении кавитационных процессов на практике часто наблюдалось явление *сонолюминесценции*, т.е. свечение жидкости. Существуют две теории возникновения этого свечения: тепловая и электрическая [7, 8]. Согласно теории электризации кавитационных пузырьков, электрические эффекты возникают в результате образования ДЭС на поверхности пузырьков, диффузионный слой которого смывается акустическими потоками, и образуется нескомпенсированный заряд. По тепловой теории свечение возникает из-за повышения температуры пузырька до 10000 К, излучение которого является термическим излучением чёрного тела.

В кавитационной области возможно поглощение света самой жидкостью или же воздушными пузырьками [9]. Поглощение в жидкости происходит молекулами воды и примесей и носит постоянный и независимый от параметров процесса характер.

$$T_{ж} = \frac{I_1}{I_0} = \exp(-\beta_{ж} z), \quad (4)$$

$T_{ж}$ – коэффициент пропускания;

I_0, I_1 – интенсивности падающей и прошедшей волны;

$\beta_{ж}$ – коэффициент поглощения излучения жидкостью;

z – расстояние вдоль оптической оси.

Поглощение кавитационными пузырьками характеризуется поглощением в парогазовой фазе, однако, вклад принимают незначительным, в виду малого поглощения воздуха и пара.

Рассеяние света в жидкости так же вносит постоянный вклад при условиях, что размер

рассеивающей частицы мал по сравнению с длинной волны, их концентрация и размер остаются постоянными. Даже если размер частиц сопоставим с величиной длины волны, то механизм рассеяния вносит так же в постоянную составляющую рассеянного сигнала, благодаря тому, что размеры и свойства рассеивателей не зависят от УЗ колебаний.

При прохождении света через жидкость может наблюдаться изменение показателя преломления жидкости. Это связано с явлением, связанным с изменением давления в жидкости и изменением её плотности.

В промышленности используются гидродинамические, электродинамические, пьезоэлектрические, магнитострикционные и механические генераторы кавитации [1].

На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки для кавитационного измельчения, активации и дезинфекции вещества [10].

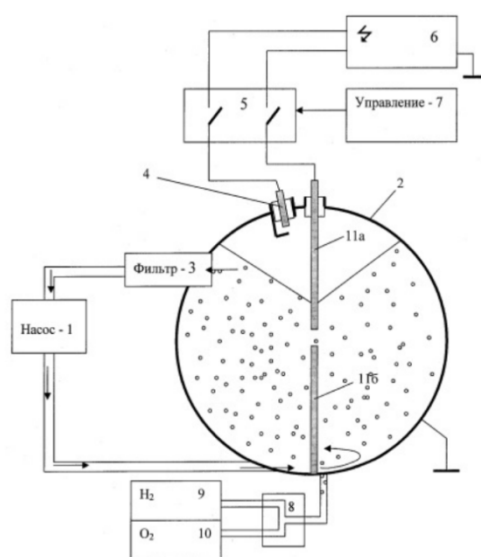


Рисунок 1. Устройство для кавитационного измельчения, активации, дезинфекции вещества

1 – насос с приводом; 2 – кавитационная камера; 3 – фильтр, препятствующий выносу пузырьков газа из кавитационной камеры; 4 – свеча зажигания, заимствованная у двигателей внутреннего сгорания; 5 – коммутатор высокого напряжения; 6 – блок создания высокого напряжения; 7 – блок управления, задающий время зажигания; 8 – смеситель подводимых газов; 9 – источник газа-топлива; 10 – источник газа-окислителя; 11 – дополнительные электроды (а – изолированный, б – заземлённый электрод).

Работа установки происходит так: из источников 9 и 10 по соответствующим трубопроводам поступают газы в смеситель 8, который смешивает газы в соотношении 2:1, достигая тем самым образования гремучего газа. Гремучий газ поступает в камеру 2, часть которого смешивается с пульпой воды и песка, а другая поднимается в верхнюю часть кавитационной камеры, образуя газовый конус. Фильтр 3 препятствует прохождению пузырьков газа в насос 1. При достижении требуемого объёма газового конуса блок управления 7 подаёт напряжение на свечу зажигания 4 через коммутатор 5 от блока высокого напряжения 6. Высокое напряжения

вызывает появления искр на электродах и происходит воспламенение газового конуса, взрыв вызывает скачок давления в камере 2. Этим достигается образование газовых пузырьков в пульпе и эффект кавитационного измельчения песка до нескольких микрон. Процесс повторяется несколько раз до достижения необходимого размера частиц.

Список литературы

1. М.А. Промтов, “Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации ХТП”, Вестник ТГТУ. 2008. Том 14. № 4.
2. М. А. Промтов, А. В. Алешин, М. М. Колесникова, Д. С. Карпов, “Обеззараживание сточных вод кавитационной обработкой”, Вестник ТГТУ. 2015. Том 21. № 1.
3. С.В Капустин, О.Н. Красуля, “Применение ультразвуковой кавитации в пищевой промышленности”, Interactive science р.2, 2016.
4. Д.А. Ярмаркин, Л.С. Прохаско, А.Н. Мазаев, “Кавитационные технологии в пищевой промышленности”, Молодой ученый Ежемесячный научный журнал, № 8 (67) / 2014.
5. Muthupandian Ashokkumar, Raul Rink, Sergey Shestakov, “Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing”, Electronic Journal «Technical Acoustics» 2011, 9.
6. М.Л. Линдеров, Д.Л. Мерсон, “Влияние кавитации на деструкция поверхности конструкционных сталей”, Вектор науки ТГУ. № 3(13), 2010.
7. М. А Маргулис, И.М. Маргулис, “О механизме свечения при акустической и лазерной кавитации”, Акустический журнал, 2006, том 52, №3, с.340-350.
8. Pavel Rudolf1,a, Martin Hudec1, Milan Gríger1 and David Štefan1, “Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations”, EPJ Web of Conferences 67, 02101 (2014).
9. Скворцов С. П., “Модель светорассеяния в ультразвуковой кавитационной области”. Наука и образования МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электрон. журн. 2015. №03. С. 102-119.
10. RU 2326296 С2, «Способ повышения энергоэффективности гидродинамического теплогенератора», F24J 3/00, опубликовано 10.06.2008. Бюл.№16, автор Бритвин Л.Н., приоритет от 22.02.2006, патентообладатель ООО «НПФ ТГМ» (RU).
11. Гидродинамическая обработка природной воды / Ю. М. Аверина, А. Ю. Курбатов, И. С. Джессу Лубо, М. А. Ветрова // Успехи в химии и химической технологии. — 2018. — Т. 32, № 1. — С. 43–45.
12. Безопасный и эффективный метод обработки природной воды / Ю. М. Аверина, А. Ю. Курбатов, М. А. Ветрова, Г. Е. Калякина // Успехи в химии и химической технологии. — 2018. — Т. 32, № 1. — С. 54–56.