

УДК 532.528

Математическая модель и критерий подобия кавитации в сонореакторах

С. Д. Шестаков, А. Е. Краснов, П. А. Городищенский

Показано, что кавитационные процессы в жидкостях с одинаковыми физико-химическими свойствами при одинаковых внешних условиях в сонореакторах разных размеров с источниками акустических колебаний разной интенсивности обладают физическим подобием, а мощность кавитации может оцениваться с помощью критерия подобия. Приведено описание этого критерия и эксперимента, подтверждающего его адекватность. Критериальная оценка позволяет выполнять инженерный расчет и прогнозировать технические характеристики сонореакторов для использования их в прикладных целях по результатам практической оптимизации конкретных кавитационных процессов с помощью малогабаритных лабораторных аппаратов.

PACS: 43.35.Zc

Ключевые слова: сонореактор, кавитационные процессы, подобие, критерий, математическая модель, эксперимент.

Введение

Теоретические и прикладные аспекты воздействия акустической кавитации на парогазовую фазу внутри кавитационных пузырьков и конденсированную фазу снаружи их изучает сонохимия, которая возникла на стыке двух наук, что и видно по ее названию, введенному в научную терминологию примерно четверть века назад. В университете Ковентри на протяжении последних 15 лет издается посвященный ее предмету журнал *Ultrasonics Sonochemistry*. О двойственной принадлежности сонохимии говорит, например, тот факт, что по УДК ее относят к химии высоких энергий (544.57 — Сонохимия), а в указателе PACS — к разделу, посвященному физической акустике (43 — Acoustics, 43.35.Vz — Chemical effects of ultrasound). По сути рассматриваемого в статье вопроса об условиях физического подобия основного фактора сонохимических реакций — акустической кавитации — авторы отнесли ее тему к разделу 53 УДК (Физика), а точнее, 532 (Гидромеханика).

Дискуссия, которая развернулась вокруг попыток в 2002—2007 гг. осуществить соносинтез путем возбуждения кавитации в дейтерированном ацетоне [1—7], показала, что познание акустической

кавитации продолжает пока оставаться на стадии феноменологии и эмпиризма. Математические описания явления многопузырьковой кавитации в упругой акустической волне, распространяемой в жидкость либо установленной в ней стационарно в резонаторе, ограничиваются отсылками к дифференциальным уравнениям движения стенки одиночной каверны в жидкости под действием гармонически изменяющегося внешнего давления [6, 7], решение одного из вариантов которых было получено еще в начале прошлого века Рэлеем. Обобщенный, базирующийся на эмпирических данных подход к оценке величины энергии гармонической волны, рассеиваемой на многопузырьковой кавитации, был сформулирован в работах, выполненных под руководством профессора Л. Д. Розенберга (Акустический институт АН СССР) [8]. Формализованные же описания кавитационной области посредством пространственного распределения энергии, трансформируемой ансамблем кавитационных пузырьков, который управляется внешним гармонически изменяющимся давлением, стали появляться лишь совсем недавно [9—14].

В работе [13] задача моделирования энергетического поля кавитационной области решена путем нахождения частного случая распределения плотности энергии кавитации по координатному пространству гармонической стоячей волны в жидкостном резонаторе с твердыми границами, нормальными к лучу волны, колебания которых ее образуют. Это сделано, отталкиваясь от известного факта, что затухание, порождаемое пульсациями пузырька возмущений давления, уменьшается обратно пропорционально расстоянию до него, тогда как кавитационная эрозия ослабевает обрат-

Шестаков Сергей Дмитриевич, профессор.
Краснов Андрей Евгеньевич, профессор.
Московский государственный университет технологий и управления.
Россия, 109004, Москва, Земляной вал, 73.
Тел. 8 (817) 251-73-97. E-mail: sdsh@mail.ru
Городищенский Павел Анатольевич, инженер.
ООО "Ультратехника-СИ".
Россия, 164500, г. Северодвинск, Архангельское шоссе, 26.
E-mail: tech_ultra@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2011 г.

но пропорционально квадрату этого расстояния [9], и от применимости принципа суперпозиции к возмущениям давления в точке пространства от пульсации множества пузырьков. Полагая кавитационный процесс эргодическим и рассматривая исходящий от пузырька импульс давления $\int \tilde{p} dt$ как фазовую функцию, средние по геометрическому пространству кавитационной области характеристики процесса можно заменить средними по безразмерному времени. Такой подход позволяет использовать для описания суммарного возмущения давления от кавитации в каждом периоде гармонической волны обобщенные функции с производной по времени, имеющей вид δ -функции Дирака, что значительно упрощает используемые математические выражения. Полученная модель дает возможность объяснить, например, установленный в работах [5, 15] факт зависимости величины давления, достигаемого при схлопывании отдельно взятого пузырька, от того, сколько пульсирующих вместе с ним пузырьков его окружают, т. е. от размеров кавитационной области. На базе этой модели были созданы программы для построения функций распределения кавитационной мощности в пространстве, вызывающей кавитацию гармонической волны в жидкости [16, 17]. Пример работы одной из них [18] показан на рис. 1.

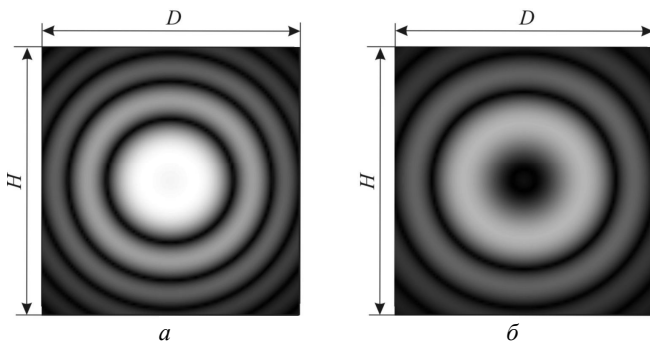


Рис. 1. Двухмерное распределение средней за период плотности потенциальной энергии кавитации в насыщенном растворе NaCl при +20 °C для случая плоско-упругой стоячей волны с диаметром фронта $D = 136$ мм и длиной отрезка луча $H = 131$ мм:
 а — при частоте колебаний 180 кГц; б — при частоте колебаний 130 кГц. Белый цвет соответствует наибольшему значению, черный — наименьшему

В развитие теории академика РАН Р. И. Нигматулина о влиянии размеров и плотности кавитационной области (пузырькового кластера) на мощность кавитации [5] была выдвинута гипотеза о возможности ее непараметрического усиления, если считать исследуемую закономерность детерминированной составляющей "суперпозиционной" модели процесса, а построенный на ее основе способ — способом повышения вероятности автоусиления. Поскольку кавитационный шум не когерент-

тен, а обладает определенным спектром, то и наложение друг на друга импульсов сжатия в конкретной точке пространства является отчасти случайным явлением, имеющим детерминированную и стохастическую составляющие. Это было теоретически обосновано и экспериментально подтверждено в предыдущих работах авторов [19, 20].

На рис. 2 приведены не вошедшие в эти работы результаты эксперимента по разрушению кавитацией металла (метода оценки мощности кавитации, предложенного Р. Кнэппом более полувека назад, но часто используемого и в современных исследованиях [21]). Эксперимент проводился в реакторе с тремя резонаторами упругих волн одинаковой частоты. Результат эрозии алюминиевой фольги, устанавливаемой в плоскости пучности звукового давления экспериментальной установки, наглядно подтверждает факт взаимного влияния друг на друга кавитационных областей в когерентных, но не взаимодействующих друг с другом акустических волнах и доказывает адекватность модели, теоретически предсказывающей это.

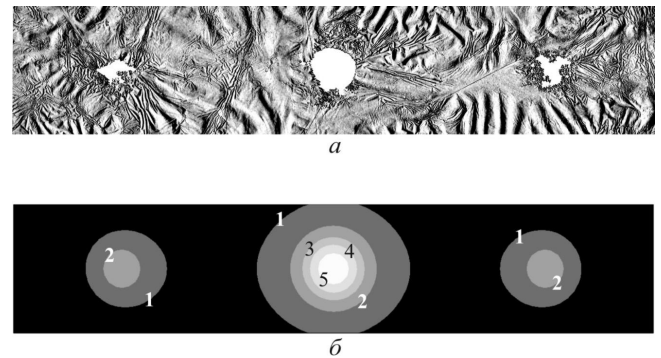


Рис. 2. Демонстрация непараметрического усиления кавитации в области центрального резонатора плоско-упругой гармонической волны в экспериментальной установке с тремя когерентными акустическими резонаторами одинаковой мощности [20]:

а — образец алюминиевой фольги после помещения в жидкость перпендикулярно лучу волн в резонаторах;
 б — двухмерное распределение объемной плотности мощности кавитации в плоскости фольги, построенное с использованием рассматриваемой математической модели. Цифрами показано отношение объемной плотности мощности кавитационного воздействия к ее среднему по площади фольги значению

Однако сделанные выводы в отношении использования модели с целью количественной оценки кавитационной мощности справедливы лишь для резонаторов, в которых действует стоячая волна в жидкости, обеспечивающая одинаковые условия рассеяния энергии на кавитации в ней. В таких условиях критерием для сравнения кавитационных процессов может служить, например, средняя по объему sonoreактора мощность кавитации, которая вычисляется из плотности потенциальной энергии кавитации, выделяемой в

нем за период гармонических упругих колебаний жидкости в стоячей волне. С ее помощью можно сравнивать сонореакторы, оснащенные резонаторами, содержащими равное число полуволн на луче волны. При равенстве параметров уравнения состояния жидкости в двух реакторах разного объема и разной частоты ультразвука, если интенсивность последнего не ниже той, начиная с которой потенциальная составляющая энергии кавитации остается постоянной [8, 13], этот критерий позволит сравнивать такие сонореакторы, например, по производительности осуществляемых в них процессов. Но если сравниваемые сонореакторы имеют не только излучатели разной частоты и интенсивности, но и произвольные размеры отрезков лучей действующих в них волн, как чаще всего и бывает на практике, такое сравнение не будет корректным.

Задача данной работы — сформулировать и обосновать критерий подобия, обобщающий любые конструкции сонореакторов, которые могут быть использованы для возбуждения кавитации в какой-либо конкретной жидкости с какой-то прикладной целью.

Теория

Следует заметить, что ультразвуковые аппараты, работающие с интенсивностями излучения, не вызывающими кавитации и предназначенные, например, для процессов сепарирования [22], не являются по сути сонохимическими аппаратами. В них часто используются четвертьволновые резонаторы, что в сонореакторах не допустимо, так как кавитационная область образуется вблизи пучности звукового давления, но при этом не должна располагаться в резонаторе около твердой стенки. В противном случае это приведет к ее постепенному разрушению и загрязнению обрабатываемой жидкости продуктами эрозии. Поэтому сонореакторы имеют размер по лучу ультразвуковой волны приблизительно кратный половине длины этой волны. Приблизительность объясняется тем, что создатели сонореакторов стремятся сделать универсальные аппараты, охватывающие как можно более широкий диапазон физических свойств обрабатываемых жидкостей, и поэтому они рассчитывают реактор на середину этого диапазона.

В частном случае плоско-упругой стоячей полуволны величина среднего за произвольно взятый ее период суммарного возмущения давления, генерируемого всеми находящимися в занимаемом полуволной объеме неподвижной жидкости в режиме установившейся кавитации пузырьками,

распределена в пространстве в соответствии с данными [19, 20] по следующему закону:

$$\overline{\Delta_T p} = p_0 \frac{N\lambda r_0}{m_h m_a} \sqrt{\left\{\frac{m_a}{\lambda}\right\} - \left\{\frac{m_a}{\lambda}\right\}^2}, \quad (1)$$

где p_0 — давление покоя в зародыше кавитационного пузырька среднестатистического радиуса r_0 (радиус покоя);

N — число пузырьков в объеме волны, где амплитуда звукового давления превышает кавитационный порог;

λ — средняя длина пробега возмущения давления от пульсирующего кавитационного пузырька за период гармонической волны;

m_h, m_a — скалярные функции координат (метрики пространства) [23, 24], а именно, среднее гармоническое и среднее арифметическое расстояния от произвольной точки пространства сонореактора до всех пульсирующих в нем пузырьков;

$\{\dots\}$ — дробная часть числа.

Среднюю плотность потенциальной энергии кавитации, пропорциональную выражению (1), можно определить в следующем виде:

$$\bar{w} = w_0 \left(\frac{N\lambda r_0}{m_h m_a}\right)^2 \left(\left\{\frac{m_a}{\lambda}\right\} - \left\{\frac{m_a}{\lambda}\right\}^2\right), \quad (2)$$

где w_0 — плотность потенциальной энергии парогазовой смеси в зародыше кавитационного пузырька, сжатого гидростатическим давлением в жидкости и ее поверхностным натяжением на стенке зародыша до p_0 (плотность энергии покоя).

Для сонореактора с размером луча гармонической волны, кратным n полуволн, в случае непрерывно протекающей жидкости, другими словами, когда равномерно распределенные в объеме зародыши не успевают мигрировать под действием порождающих акустические течения и действующих на них самих сил Рэлея, Бернулли, Бьеркнеса, выражение (2) можно записать в континуумизированном виде [24]:

$$\bar{w} = \frac{1}{6} w_0 r_0^2 D^2 \frac{\Sigma^2 v_i}{m_h^2} \left(\frac{m_a}{\lambda} + \frac{1}{2n} \left[\frac{n}{2}\right]\right)^{-2} = \frac{1}{6} w_0 r_0^2 D^2 G, \quad (3)$$

где D — объемная плотность зародышей в жидкости, м⁻³;

n — число полуволн в пространстве сонореактора, в которых амплитуда звукового давления превышает кавитационный порог;

$\Sigma^2 v_i$ ($i = 1, \dots, n$) — суммарный объем кавитационных областей в них;

G — функция линейных размеров в выбранной системе координат, м⁴;

$[\dots]$ — целая часть числа.

Уравнения (1)–(3) из-за представляющей собой линейную комбинацию тройных и двойных

определенных интегралов функции G , как правило, решаются численно и справедливы, когда скорость распространения упругой деформации от пульсирующего пузырька, определяющая параметр λ , равна скорости звука в жидкости. Это обстоятельство, несмотря на имеющиеся подтверждения адекватности модели, может вызывать некоторые сомнения. Источниками этих сомнений являются известное приближение Кирквуда—Бете, используемое в решении задач распространения ударной волны от подводного взрыва, а также изменение плотностей жидкости внутри и газа снаружи стенки пузырька при его пульсации.

На рис. 3 показан результат использования алгоритма Айвени—Хэммита для решения дифференциального уравнения Хиклинга—Плессета [25] в случае движения стенки газовой полости в тяжелой воде под воздействием внешнего гармонического давления. Данный результат получен при точности вычислительных процедур 10^{-15} и дискретности интегрирования 10^5 шагов. Видно, что отклонение абсолютной скорости звука в D_2O у поверхности пузырька от номинального значения чрезвычайно кратковременно, так же как и продолжительность существования условий для образования ударной волны в газе внутри пузырька, с наличием которой академик Нигматулин связывает возможность сжатия плазмы в нем до температур термоядерного синтеза. Так как период пульсации превышает рассмотренный временной отрезок почти на три порядка, то средняя за весь период пульсации скорость распространения в жидкости импульсов давления от кавитационных пузырьков, складывающаяся из скорости звука и скорости движения стенки, остается равной номинальной скорости звука в ней. Другими словами, можно считать, что вызванное пульсацией пузырька возмущение давления за период гармонической волны будет проходить расстояние, равное длине этой волны, а импульс давления $\int \tilde{p} dt$ на этапе сжатия содержимого пузырька равен импульсу давления на этапе разрежения. В противном случае будет нарушен закон сохранения импульса, и давление в системе будет неограниченно расти либо неограниченно падать. Это привело бы к самопроизвольному прекращению процесса кавитации из-за полного схлопывания пузырьков или полной дегазации жидкости путем их вытеснения из нее, чего в реальности не наблюдается. Наоборот, все говорит о том, что кавитационный процесс обладает свойством самоорганизации, заключающейся в установлении равновесия, свойственного любой реальной жидкости для любого значения амплитуды гармонического давления, и в целом среднее за бесконечное время значение переменной составляющей давления на поверхности пузырька равно нулю [9, 24].

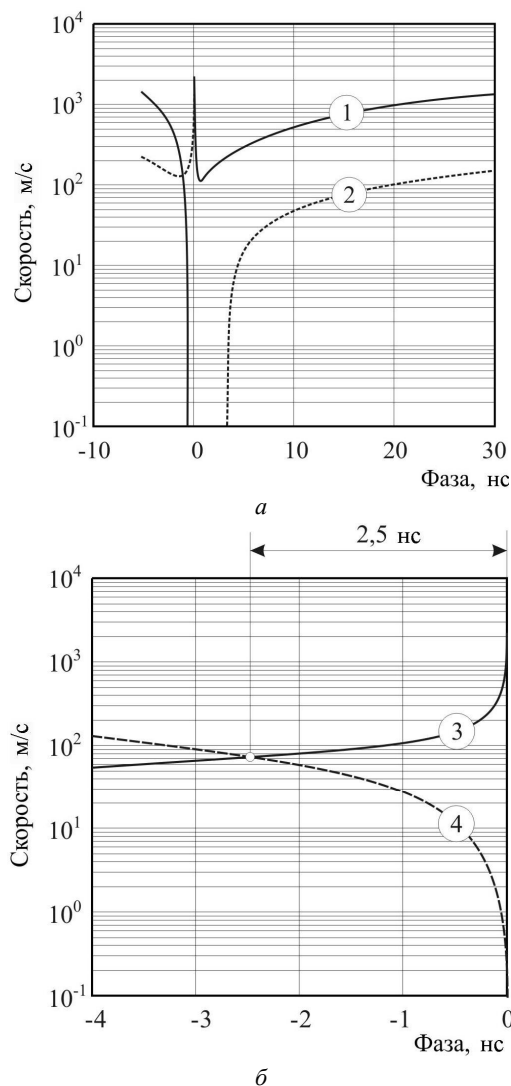


Рис. 3. Графики зависимости физических величин у стенки кавитационного пузырька от фазы его сжатия:
а — абсолютная скорость звука в D_2O (кривая 1) и в парогазовой смеси внутри пузырька, сжатой до p_0 (кривая 2);
б — модуль скорости движения стенки пузырька (кривая 3) и относительная скорость звука в парогазовой смеси (кривая 4). Интервал 2,5 нс — длительность действия ударной волны в парогазовой смеси. Частота ультразвука 20 кГц, амплитуда звукового давления 2 бар. Фаза 0 соответствует максимуму сжатия, т. е. когда $r = r_{\min}$

В плоской акустической волне размеры объемов v_i , где возбуждается кавитация, определяются в (3) площадью излучающей поверхности и высотами h_i , значения которых в общем случае зависят от соблюдения или не соблюдения условий резонанса. В соответствии с принципом суперпозиции распространяющихся встречно упругих гармонических затухающих волн и сделанных заключений о скорости распространения звука выражение зависимости модуля результирующей амплитуды звукового давления излучаемой и отраженной волн, образующих стоячую волну в сонореакторе, от фазы φ в линейном приближении можно записать в виде:

$$A = (2I_0 \zeta_{liq})^2 \left| (1 - \eta^2)^{\lambda k} \sin(\varphi) + \theta (1 - \eta^2)^{\frac{4}{\lambda}} (2H - \frac{\varphi}{k}) \sin(\varphi + \Delta\varphi) \right| \quad (4)$$

где I_0 — интенсивность излучаемого в жидкость ультразвука на поверхности излучателя;

H — размер реактора по лучу волны;

$\Delta\varphi$ — сдвиг фаз отраженной резонатором волны относительно падающей, определяемый соотношением длины волны ультразвука и размером отрезка луча волны H ;

η — коэффициент рассеяния энергии упругих колебаний на кавитации (акусто-кавитационный КПД) [9];

k — волновое число;

$\theta = \frac{\zeta_{liq} - \zeta_{ref}}{\zeta_{liq} + \zeta_{ref}}$ — коэффициент отражения вол-

ны на границе жидкости с удельным акустическим сопротивлением ζ_{liq} и твердого элемента конструкции, служащего рефлектором с удельным акустическим сопротивлением ζ_{ref} [26]. Тогда координаты границ объемов v_i на луче волны в единицах φ находятся как положительные корни трансцендентного уравнения $A = p_t$, где p_t — кавитационный порог. Высоты h_i объемов v_i определяются как разность четных и нечетных корней, а геометрические центры этих объемов вводятся как их полусуммы. В линейные единицы координаты они переводятся путем деления на волновое число k .

Таким образом, любой оцениваемый сонореактор, обрабатывающий какую-нибудь жидкость в непрерывном режиме, будет иметь критерий подобия Cr какому-либо выбранному эталонному сонореактору с известной производительностью P_{st} при обработке этой жидкости, который отличается только функцией G , частотой источника ультразвука и описывается следующим соотношением:

$$Cr = \frac{f \iiint (V) G \, dx dy dz}{f_{st} \iiint (V_{st}) G_{st} \, dx dy dz} \quad (5)$$

где V, V_{st} — рабочие объемы, а f, f_{st} — частоты излучателей оцениваемого и эталонного сонореакторов, соответственно. Отсюда, например, производительность оцениваемого сонореактора в каком-либо сонохимическом процессе, оптимизированном с помощью эталонного реактора, будет равна $P_{st} Cr$.

Экспериментальная часть

Поскольку кавитационный процесс протекает практически в адиабатных условиях, а объем пу-

зырьков по сравнению с объемом жидкости ничтожно мал, то происходящие в газовой фазе сонореакции не имеют прикладного значения, во всяком случае, пока инерциальный термоядерный соносинтез не осуществлен.

Практически значимые процессы протекают в жидкой фазе в результате действия распространяемых в ней пузырьками импульсов давления, стимулирующих реакции взвешенных и растворенных веществ. Кавитация диспергирует взвешенную в жидкости твердую и жидкую гидрофобную фазы, увеличивая площадь контакта вступающих в реакции веществ. Трансформация энергии кавитационных импульсов давления в воде реализует надтепловой механизм разрушения молекулярных ассоциатов воды, гидратных оболочек ионов и коллоидов растворенных веществ, ослабляющих поверхностную плотность их заряда и препятствующих тем самым вступлению их в химические реакции. Вода при этом на время переходит в термодинамически неравновесное состояние, которое характеризуется ее аномально высокой растворяющей способностью. Это состояние сохраняется, пока полученная энергия не будет отдана в виде теплоты реакции гидратации, которая протекает, восстанавливая вновь водородные связи и соответствующую термодинамическому равновесию структуру воды, которая даже при комнатной температуре идентична структуре льда [27], т. е. со временем неизбежно происходит релаксация неравновесного состояния [28]. Если же до или сразу после кавитационного воздействия в воде растворить, например, сухую биомассу, то имеющиеся в ней электролиты в большем количестве, чем обычно, диссоциируются на ионы, которые тут же иммобилизируются мономолекулами воды, а молекулы биополимеров приобретают плотные гидратные оболочки из них. Это увеличивает их массу, поскольку вода соединится с ними настолько же прочно, насколько прочны в биомассе связи, формирующие ее нативную структуру. Поэтому сонохимические методы и аппараты во всем мире находят все большее применение в прикладных биотехнологиях [29].

Экспериментальные исследования были осуществлены на одном из известных и востребованных эффектов кавитационной обработки — диспергировании и гомогенизации взвешенных в воде полимерных фаз [30]. В качестве исследуемой дисперсной системы использовался водный раствор полистирольного латекса — "белого" мелкодисперсного золя. При кавитационной обработке латекса периодическими импульсами давления, имеющими во фронте распространения большие градиенты, совершается работа против циклической прочности полистирольных частиц, которая пропорциональна интегральной мощности кавита-

ции. Изменение дисперсности латекса за определенное время воздействия, которое можно определить методами оптической квалиметрии [31], и может служить мерой этой работы.

На рис. 4 приведена фотография экспериментального сонореактора, а чертеж общего вида его камеры вместе с двумерным распределением в латексе объемной плотности мощности кавитации в плоскости его диаметрального сечения показан на рис. 5.



Рис. 4. Экспериментальный сонореактор

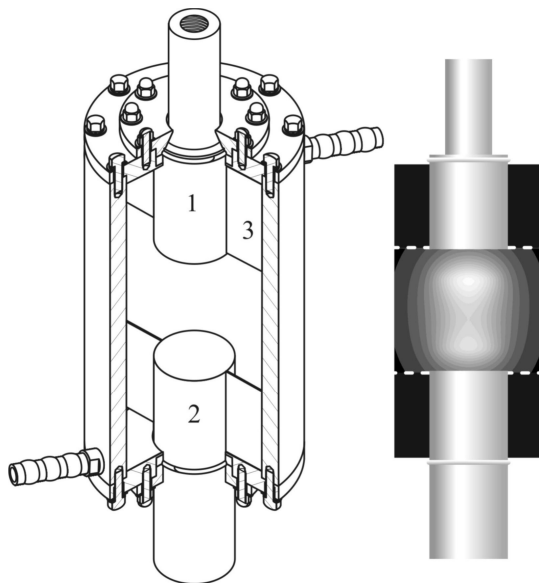


Рис. 5. Общий вид камеры экспериментального сонореактора (слева). Двухмерное распределение объемной плотности мощности кавитации в латексе в плоскости диаметрального сечения камеры сонореактора (справа): 1 — волноводный акустический трансформатор; 2 — резонансный рефлектор [23]; 3 — шторки для профилирования потока латекса

Рефлектор 2, будучи закреплен к корпусу реактора в узле собственных колебательных смещений, лишен акустического контакта с ним и не порождает в нем рассеивающих энергию гармонической волны неосновных мод колебаний даже во время переходного процесса возникновения кавитации при включении аппарата. В экспериментах использовалось два типа рефлекторов. Первый, имеющий резонансную длину, соответствующую частоте источника колебаний, был изготовлен из титанового сплава, второй такой же длины — из полиуретана. Это обеспечивало существенные различия в условиях отражения и образования результирующей волны, выражаемые уравнением (4), поскольку титан является акустически высокочастотным материалом, передает энергию колебаний практически без потерь и граничит одной стороной с воздухом, обладающим по сравнению с металлом очень низким удельным акустическим сопротивлением. Таким образом, в самом титановом рефлекторе на частоте источника ультразвука устанавливаются резонансные колебания с удвоенной амплитудой проходящей в него волны, в результате чего в числителе выражения для θ , входящего в (4), появляется множитель 3 перед ζ_{liq} . Полиуретан же, наоборот, почти полностью рассеивает энергию колебаний на внутреннее трение. При математическом моделировании значение критерия (5), равное единице, было присвоено сонореактору с первым вариантом рефлектора.

Технические характеристики экспериментального сонореактора и параметры, использованные при вычислении критериев, приведены в табл. 1. Индексами 1 и 2 указаны значения, соответствующие вариантам с рефлекторами первого и второго типа.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение
Интенсивность излучаемого ультразвука, Вт/м ²	I_0	$1,3 \cdot 10^5$
Частота излучаемого ультразвука, Гц	f	$2,2 \cdot 10^4$
Протяженность отрезка луча волны в сонореакторе, м	H	0,064
Рабочий объем камеры сонореактора, мл	V	345
Суммарный объем кавитационных областей, мл	$\Sigma_1 v_i; \Sigma_2 v_i$	58; 54
Кавитационный порог в латексе, МПа	p_i	0,1
Акустикокавитационный КПД [9], безразмерный	η	0,15
Коэффициент отражения волны от рефлектора, безразмерный	$\theta_1; \theta_2$	-0,75; -0,23
Удельное акустическое сопротивление латекса, кг/(м ² ·с)	ζ_{liq}	$1,5 \cdot 10^6$

На рис. 6 приведены графики функций (4) зависимости амплитуды звукового давления результирующей волны в экспериментальном сонореакторе от координаты на ее луче. Отсчет координаты ве-

дятся от излучающей поверхности акустического трансформатора 1, т. е. график ориентирован в соответствии с рис. 5.

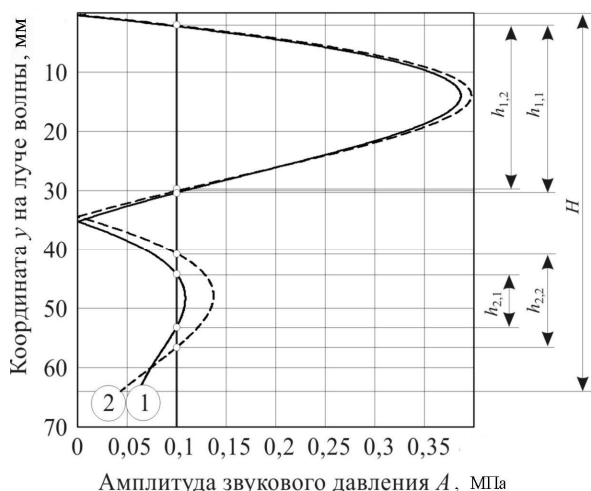


Рис. 6. Графики зависимостей амплитуды звукового давления A в результирующей волне сонореактора от координаты на ее луче (ось y), построенные по (4). Кривая 1 — сонореактор с рефлектором типа 1, кривая 2 — с рефлектором типа 2

В эксперименте по пять образцов латексов с одинаковыми исходными оптическими плотностями обрабатывали при одинаковой начальной температуре 22 ± 1 °С со скоростью 1 л/мин, которую устанавливали, регулируя производительность прокачивающего латекс через реактор перистальтического насоса. Оптические коэффициенты пропускания определяли методом сравнительной монохромной турбидиметрии в диапазоне длин волн 400—600 нм. По измеренным в указанном диапазоне с дискретностью 20 нм коэффициентам пропускания τ_1 и τ_2 проб обработанных образцов и далее путем аппроксимации прямыми полученных на дискретных множествах функций $\lg \lg \frac{1}{\tau_1(x)}$ и

$\lg \lg \frac{1}{\tau_2(x)}$ вычисляли значения показателей n при

длине волны света в известном уравнении Геллера как абсолютные значения коэффициентов α_1 при аргументах в уравнениях этих прямых вида $\alpha_0 + \alpha_1 x$, где x — десятичный логарифм длины световой волны. Пользуясь ими, находили значения калибровочной функции Геллера Z . Поскольку за эталон принят сонореактор с титановым рефлектором, то вычисленному по (5) критерию сонореактора с полиуретановым рефлектором должно соответствовать отношение Z_1/Z_2 , пропорциональное соотношению средних диаметров полистирольных частиц латексов, полученных в результате диспергирования. Измеренные и вычисленные значения параметров с границами их доверитель-

ных интервалов при доверительной вероятности 0,9 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Обозначение	Значение	
		Вариант 1	Вариант 2
Показатель при длине световой волны в уравнении Геллера, безразмерный	n	$2,30 \pm 0,02$	$2,50 \pm 0,03$
Значение функции Z , безразмерный	Z	$8,08 \pm 0,06$	$6,82 \pm 0,05$
Средний диаметр полистирольных частиц обработанных латексов, мкм	d_{cp}	$0,32 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$
Критерий, безразмерный	Cr	1	1,18
Параметр, выраженный отношением, безразмерный	Z_1/Z_2	1,17—1,20	

Обсуждение результатов

Из табл. 2 видно удовлетворительное совпадение расчетного значения критерия подобия для сонореактора (с рефлектором второго варианта) с серединой доверительного интервала для экспериментально полученного параметра Z_1/Z_2 .

Тот факт, что кавитационная мощность сонореактора с высокочастотным резонансным рефлектором ниже, чем у реактора с рефлектором из полиуретана, объясняется следующим образом. Обладая удельным акустическим сопротивлением выше, чем у полиуретана и латекса, титановый рефлектор отражал в латекс большую часть падающей на него волны в противофазе. А полиуретановый рефлектор, имея те же размеры, но, являясь фактически звукопоглотителем, большую часть проходящей волны рассеивал на внутреннем трении и отражал обратно в латекс также в противофазе ее меньшую часть и тем самым меньше ослаблял упругие колебания в нем.

С помощью критерия возможна оценка существующих кавитационных аппаратов для осуществления процессов, которые не были предусмотрены их назначением. Так, германская фирма Hielscher Systems GmbH производит мощные реакторы типа UIP (Ultrasonic Industrial Processor). На интернет-сайте фирмы приводятся каталоги, содержащие технические характеристики аппаратов и параметры их назначения [32]. Там, например, указано, что аппарат UIP 4000 с потребляемой электрической мощностью 4 кВт обеспечивает разрушение биологических мембран в процессах экстракции биополимеров из взвешенной в виде фазы водного золья биомассы с производительностью 20—400 л/ч. Взяв его за эталон, можно рассчитать критерий подобия отечественного сонореактора типа РКУ-0,63 (ТУ 5130-002-26784341-08), предназначенного для обработки растворов натрия хлорида, используемых в пищевой промышленности [33]. Если плотность и сжимаемость обрабатываемой

суспензии аналогичны параметрам исследованного латекса, то при $f_{\text{UIP}} = 20$ кГц и $f_{\text{РКУ}} = 22$ кГц с учетом уравнения (4) $Cr_{\text{РКУ/UIP}} = 0,24$. Таким образом, производительность sonoreактора РКУ-0,63 в процессах диспергирования и экстракции будет 5—96 л/ч. Но его удельная производительность, характеризующая эффективность энергозатрат и выражаемая в л/кВт·ч, будет в полтора раза больше. Наоборот, если взять за эталон обработки насыщенного раствора NaCl sonoreактор РКУ, то критерий аппарата UIP 4000 для этого процесса будет равен $Cr_{\text{UIP/РКУ}} = 1,75$. Соответствующая этому критерию и паспортной производительности реактора РКУ равной 120 л/ч производительность реактора UIP 4000 будет равна 210 л/ч, а удельная производительность у РКУ и в этом случае останется выше.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают, что полученный экспериментально результат обработки и рассчитанная относительная кавитационная мощность одного и того же sonoreактора при обработке одной и той же жидкости равны между собой, т. е. сформулированный критерий адекватен. С другой стороны, и расчетные относительные кавитационные мощности, и результаты работы двух sonoreакторов с одинаковыми размерами камеры и с одинаковой мощностью источника ультразвука, но различающимися условиями суперпозиции ультразвуковых волн не равны между собой даже в одной и той же жидкости. Значит, критерий позволяет учитывать влияние этих условий на кавитационную мощность. Таким образом, произведенные усовершенствования модели и критерия существенны.

Недостатком модели остается то, что базирующая на ней оценка остается относительной и, вероятно, останется такой, пока не будут созданы средства, способные точно определять абсолютные значения параметров процесса, которые были исключены из критерия путем простого отношения, поскольку принадлежат одной и той же жидкости с одними и теми же характеристиками состояния. К ним относятся размер кавитационных зародышей, количество их в жидкости, распределение их по размерам и их энергия покоя.

Прикладное значение критерия подобия состоит в том, что он позволяет при разработке соно-технологий и аппаратов для их реализации избавиться от трудоемких этапов натурного макетирования и дает возможность выполнять инженерные расчеты sonoreакторов любой мощности и производительности, опираясь на результаты лабораторной оптимизации того или иного процесса в

малогабаритном аппарате. Таким образом, пред-проектные исследования сводятся к лабораторному эксперименту и компьютерному моделированию по его результатам. И хотя совсем отказаться от экспериментирования при этом не удастся, но оно становится лабораторным процессом, при котором можно иметь дело с небольшими объемами обрабатываемых субстанций и с малогабаритной техникой.

Литература

1. Taleyarkhan R. et al. // Science. 2002. V. 295. P. 1868.
2. Taleyarkhan R. et al. // Physical Review. 2004. V. E69. P. 036109.
3. Nigmatulin R. // Nuclear Engineering and Design. 2005. V. 235. P. 1079.
4. Nigmatulin R. et al. // Physics of Fluids. 2005. V. 17. P. 107106.
5. Lahey R., Taleyarkhan R., Nigmatulin R. // Nuclear Eng. and Design. 2007. V. 237. P. 1571.
6. Хаврошкин О. Б., Быстров В. П. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 7.
7. Намиот В. А. // ДАН. 2003. Т. 388. С. 324.
8. Шестаков С. Д. Деп. в ВИНТИ. 2007. № 532-B2007.
9. Физика и техника мощного ультразвука / Под ред. Л. Д. Розенберга. — М.: Наука, 1968.
10. Masahito S., Yoichiro M., Takashi K. // JSME Int. J. B. 2000. V. 43. P. 380.
11. Floris F. // J. Phys. Chem. B. 2005. V. 109. P. 24061.
12. Mettin R. et al. / 6th International Symposium on Cavitation, Wageningen, 2006.
13. Шестаков С. Д. // Труды XVI сессии Росс. акуст. Общества. 2005. Т. 1. С. 116.
14. Patent EP 1810744. 2007.
15. Krefling D., Mettin R., Lauterborn W. // Ultrasonics Sonochemistry. 2004. V. 11. P. 119.
16. Свидетельство Роспатента 2005611914, 2005.
17. Свидетельство Роспатента 2008612431, 2009.
18. Пат. 2361658 РФ. 2009.
19. Шестаков С. Д. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 18.
20. Шестаков С. Д. // Труды XX сессии Росс. акуст. Общества. 2008. Т. 2. С. 112.
21. Gaitan D. F., Tessien R. A., Hiller R. A. / 19th Int. Congress on Acoustic, Madrid, 2007.
22. Townsend R. J. et al. // Proc. of the Int. Congress on Ultrasonics, Vienna, 2007.
23. Patent EP 1810747. 2007.
24. Шестаков С. Д. Деп. в ВИНТИ. 2007. № 490—B2007.
25. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. — М.: Мир, 1974.
26. Горелик Г. С. Колебания и волны. — М.: ИФ-МЛ, 1959.
27. Jinesh K. B., Frenken J. W. M. // Physical Review Letters. 2008. V. 101. P. 036101.
28. Рогов И. А., Шестаков С. Д. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2004. № 4. С. 17; № 10. С. 9.
29. Mawson R., Knoerzer K. / 19th Int. Congress on Acoustic, Madrid, 2007.
30. Мозжаров С. Е., Шуюнов Ю. А., Становой П. Г. // Матер. Междунар. науч.-практ. конф. "Техника и технологии: инновации и качество". — Барановичи. 2007. С. 358.
31. Krasnov A. E. et al. // J. of Optics A: Pure and Applied Optics. 2002. No. 3. P. 70.
32. <http://www.hielscher.com>
33. Красуля О. Н. и др. // Мясная индустрия. 2009. № 7. С. 43.

Mathematical model and similarity parameter of cavitation in sonoreactors

S. D. Shestakov, A. E. Krasnov

Moscow State University of Technologies and Management, 73 Zemlyanoy Val, Moscow, 109004, Russia

E-mail: sdsh@mail.ru

P. A. Gorodishchensky

Ultratekhnikha-SI, Ltd, 26 Arkhangelsk highway, Severodvinsk, 164500, Russia

E-mail: tech_ultra@mail.ru

It is shown that cavitation processes in liquids have a physical similarity with the identical chemical and physical properties at identical external environments in sonoreactors of different sizes with sources of acoustic fluctuations of different intensity. A cavitation power can be estimated with help of the similarity criterion. The description of this criterion and the experiment are resulted to confirm its adequacy. A criterion estimation allows to execute the engineering design and to predict the technical characteristics of sonoreactors for using in applied purposes. It may be made on results of practical optimization of the concrete cavity processes with the help of small-sized lab machines.

PACS: 43.35.Zc

Keywords: sonoreactor, cavitation processes, similarity, criterion, mathematical model, experiment.

Bibliography — 33 references.

Received November 9, 2011