

03

Подавление центров кавитации в воде при импульсном растяжении

© В.Е. Виноградов

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: vinve@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 июля 2008 г.

Экспериментально изучено влияние примесей на плотность центров кавитации в воде при импульсном растяжении жидкости до -6.0 МПа. Обнаружено снижение плотности центров кавитации в воде при растворении в ней CO_2 , HCl и муравьиной кислоты.

PACS: 47.55.Dp

Явление кавитации связано с локальными растяжениями в жидкости, вызывающими рождение, рост и последующее схлопывание парогазовых пузырьков. Интенсивность кавитационных процессов напрямую зависит от величины растягивающего напряжения в жидкости, предшествующего рождению кавитационных пузырьков [1].

На примере большого массива органических жидкостей [2] было показано, что величина предельного растяжения жидкости с приемлемой для практических оценок точностью определяется с помощью теории гомогенной нуклеации [3]:

$$p^* = p_s - \sqrt{\frac{16\pi\sigma^3}{3kT \ln(N_1 B/J)}}, \quad (1)$$

где p_s — давление насыщенных паров жидкости при заданной температуре T , k — постоянная Больцмана, σ — поверхностное натяжение

жидкости, J — частота гомогенного зародышеобразования, равная числу образовавшихся флуктуационным путем пузырьков пара критического размера в единицу времени в единице объема жидкости, $B \approx 10^{11} \text{ s}$ — кинетический коэффициент, слабо зависящий от температуры, N_1 — число молекул в единице объема жидкости.

При квазистатическом растяжении, когда для разрыва жидкости достаточно одного критического пузырька, имеет место соотношение

$$JV\bar{\tau} = 1, \quad (2)$$

где V — величина растягиваемого объема, $\bar{\tau}$ — среднее время ожидания вскипания.

В случае воды предельные растяжения жидкости, как правило, значительно меньше того, что предсказывает теория гомогенной нуклеации [4,5]. Однозначного объяснения этому факту нет. Можно предположить, что в воде разрыв жидкости происходит на центрах кавитации гетерогенного характера. Природа этих центров зависит во многом от способа приготовления системы. Существуют различные суждения на этот счет. Преобладающей причиной считаются застabilизированные газовые пузырьки на твердых частицах (ядра Гарвея [6]) или в объеме жидкости (бобстоны Бункина [7]). Оптические исследования показывают, что в воде практически всегда присутствуют пузырьки размером $\sim 1 \mu\text{m}$ [8]. Это соответствует прочности воды на растяжение при комнатной температуре $\sim 0.15 \text{ МПа}$. Такие растяжения реализуются в воде при статическом нагружении. При импульсном растяжении прочность воды на растяжение может достигать сотен атмосфер [4,5].

С целью выяснения роли растворенных в жидкости газов и других легкокипящих примесей в процессе образования центров кавитации экспериментально изучено вскипание жидкости растянутой в волне отрицательного давления амплитудой до -6.0 МПа . Опыты проводились с помощью экспериментальной установки [2], использующей метод инверсии волны давления при отражении от свободной поверхности [4,8]. Схема измерительной камеры установки показана на рис. 1. Жидкость ($V \cong 80 \text{ cm}^3$) находится при комнатной температуре в цилиндрической камере диаметром 50 mm . Высота столба жидкости в камере $40-50 \text{ mm}$. Дном камеры является дюралевая мембрана толщиной 0.8 mm . При разряде малоиндуктивного конденсатора на спиральную катушку, прижатую к мембране, генерируется импульс давления длительностью $3 \mu\text{s}$. Передний фронт импульса менее $1 \mu\text{s}$, амплитуда — до 10 МПа . Импульс

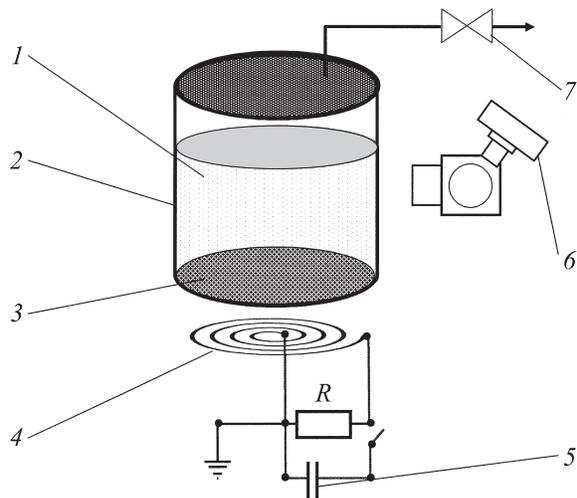


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной камеры: 1 — исследуемая жидкость, 2 — корпус камеры, 3 — дюралевая мембрана, 4 — спиральная катушка, 5 — малоиндуктивный конденсатор, 6 — фотоаппарат, 7 — запорный вентиль.

отрицательного давления в жидкости формируется при отражении импульса сжатия от границы раздела жидкость—пар. Давление растяжения в отраженной волне определяется выражением

$$p_- = p'' + p_+ k, \quad (3)$$

где p'' — давление газа или пара над поверхностью жидкости, p_+ — давление в волне сжатия, k — коэффициент отражения, который рассчитывался по формуле

$$k = \frac{\omega'' - \omega}{\omega'' + \omega}. \quad (4)$$

Здесь $\omega'' = \rho'' c''$, $\omega = \rho c$ — акустические импедансы газа и жидкости соответственно, c'' и c — скорость звука в паре и жидкости, ρ'' и ρ — плотность пара и жидкости. Поскольку вдали от критической точки

$\omega \gg \omega''$, то $k < 0$. Зависимость амплитуды давления в импульсе сжатия p_+ от напряжения питания конденсатора определялась в калибровочных опытах с помощью импульсного датчика давления. Статическое давление пара или газа над поверхностью жидкости измерялось манометром с погрешностью менее 1%. Суммарная погрешность определения давления в импульсе растяжения оценивается в 5%.

В опытах с CO_2 жидкость насыщалась газом из ресивера через вентиль в течение нескольких часов. Об окончании процесса растворения газа судили по установлению стабильного давления в камере, которое в начале процесса насыщения жидкости газом экспоненциально падало. Концентрация газа в растворе рассчитывалась с помощью данных по растворимости [9].

Проводилось фотографирование зоны кавитации, которая находилась на глубине 3–5 мм от поверхности жидкости, с помощью фотоаппарата через микроскоп при подсветке импульсами света длительностью менее $1 \mu\text{s}$. Кавитационные пузырьки в воде, находящейся при атмосферном давлении, появляются уже при прохождении импульса отрицательного давления p_- порядка 1 МПа. Количество пузырьков увеличивается с ростом отрицательного давления в жидкости. Для сравнения опыты проводились с углекислым газом и азотом при одинаковом давлении газа над поверхностью жидкости. Растворимость азота в воде при температуре опытов ($\sim 20^\circ\text{C}$) почти на 2 порядка ниже, чем CO_2 . Количество кавитационных пузырьков в жидкости, находящейся под давлением азота, заметно меньше, чем при атмосферном давлении при том же самом давлении растяжения p_- . Это обусловлено известным эффектом снижения количества готовых центров кавитации (или кипения) после выдержки жидкости под избыточным внешним давлением. Растворение углекислого газа уменьшает число центров кавитации в воде (рис. 2). Размер зоны фотографирования на рисунке составляет примерно $4 \times 2.5 \text{ mm}$. Реализуемые в опытах растяжения были значительно меньше теоретической прочности воды на разрыв ($\sim 150 \text{ МПа}$), рассчитанной по формуле (3). Поэтому образование кавитационных пузырьков происходило на готовых центрах кипения, плотность которых в воде при атмосферном давлении достигает 10^{12} m^{-3} . Примерно такая плотность центров кавитации наблюдалась в опытах без растворения газа. При растворении CO_2 она уменьшается на 2–3 порядка.

Кроме углекислого газа были проведены исследования с другими растворимыми в воде добавками: HCl , CH_2O_2 (муравьиная кислота),

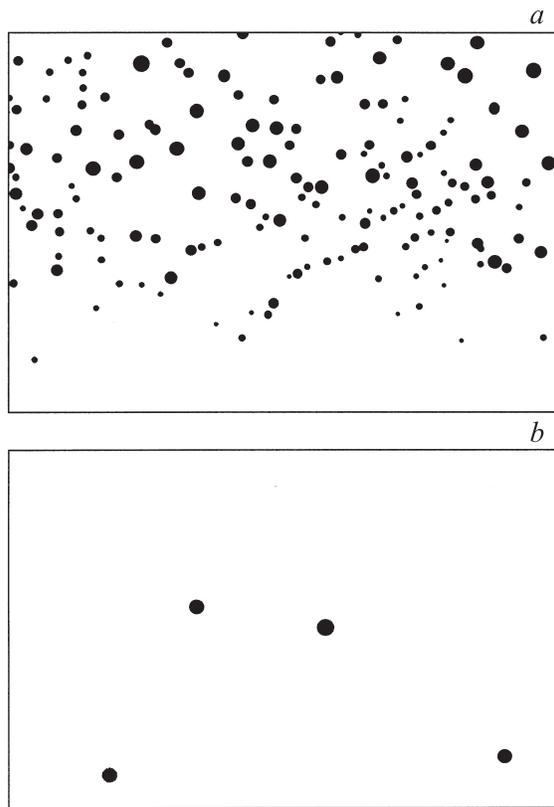


Рис. 2. Фотографии зоны кавитации в газонасыщенной воде: *a* — вода под давлением азота 2.0 МПа, *b* — вода под давлением углекислого газа 2.0 МПа. Амплитуда волны отрицательного давления $p_- = -2.8$ МПа.

NH_3 (аммиак), $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ (ацетон). Добавки HCl , CH_2O_2 , $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ уменьшают число центров кавитации в воде. При растворении аммиака в воде число центров кавитации в жидкости практически не изменилось. Необходимо отметить, что речь идет о центрах кавитации, на которых выросли пузырьки видимого размера за время прохождения волны отрицательного давления ($\sim 3 \mu\text{s}$). В данных опытах регистрировались

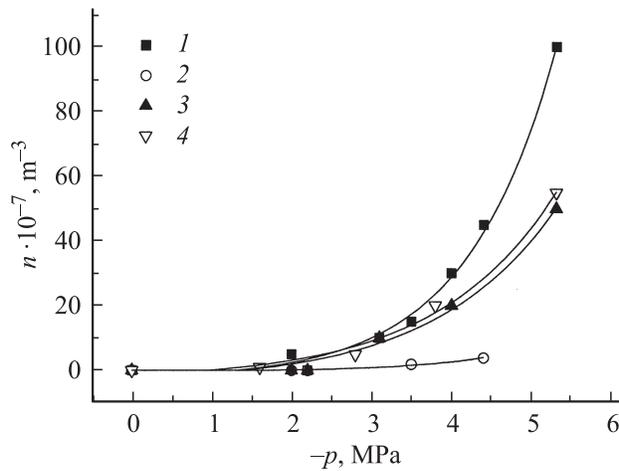


Рис. 3. Зависимость плотности центров кавитации в воде от величины отрицательного давления при температуре 20°C. 1 — дистиллированная вода, 2 — вода с HCl, 3 — вода с муравьиной кислотой, 4 — вода с CO₂. (Мольная доля примесей 1.5%).

пузырьки диаметром более $10\ \mu\text{m}$. На рис. 3 показаны зависимости плотности центров кавитации в воде от величины отрицательного давления p_- для дистиллированной воды, растворов соляной и муравьиной кислот и углекислоты в воде. Мольная концентрация добавок во всех опытах составляла 1.5%. Статическое давление p'' во всех опытах было 2.0 МПа. Опыты показали, что количество центров кавитации в воде сокращается при растворении в ней ряда легкокипящих добавок. Поскольку опыты проводились при растяжениях значительно ниже теоретической прочности жидкости, разрыв и вскипание воды происходили на гетерогенных центрах кипения. Влияние примесей в этом случае обусловлено их взаимодействием с уже имеющимися в жидкости центрами кавитации (если эти примеси сами не являются центрами кавитации). В опытах наблюдалось подавление центров кавитации добавками, которые с точки зрения теории нуклеации не должны понижать теоретическую прочность воды, поскольку они или повышают равновесное давление пара p_s и снижают поверхностное натяжение (CO₂, ацетон), или практически их не изменяют (HCl, CH₂O₂) при

малых концентрациях (до 1.5 mol.%) в воде. Следует отметить, что уменьшение плотности центров кавитации в воде в большей степени характерно для примесей, которые в той или иной мере имеют кислотные свойства. Поэтому не исключено, что одной из причин подавления центров кавитации в воде является связывание свободных ионов водорода в воде при растворении в ней вышеуказанных добавок. Другой возможной причиной подавления центров кавитации в воде может быть заполнение молекулами примесей пустот в ажурной структуре воды. На это указывает зависимость эффекта снижения плотности центров кавитации от размера молекул примеси. Наибольший эффект получен при растворении двухатомных молекул (HCl). Не исключено, что и высокая плотность центров кипения (кавитации) в воде по сравнению с другими жидкостями связана с ее структурными особенностями.

В заключение следует отметить, что высказанные предположения нуждаются в дополнительной экспериментальной проверке, а механизм подавления центров кавитации в воде требует специального изучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 07-08-00139.

Список литературы

- [1] *Кнэпп Р., Дейлл Дж., Хеммит Ф.* Кавитация. М.: Мир, 1974. 688 с.
- [2] *Виноградов В.Е., Павлов П.А.* // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. С. 402–406.
- [3] *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 31 с.
- [4] *Богач А.А., Уткин А.В.* // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. С. 198–205.
- [5] *Herbert E., Valibar S., Caupin F.* // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. 041603.
- [6] *Вопросы физики кипения* / Под ред. И.Т. Аладьева. М.: Мир, 1964. 444 с.
- [7] *Булкин Н.Ф., Булкин Ф.В.* // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. С. 512–527.
- [8] *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
- [9] *Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.А.* Справочник термодинамических величин. М.: Атомиздат, 1971. 240 с.