

03;12

Аномальная температурная зависимость кавитационной прочности воды

© А.С. Бесов, Д.Н. Покровский

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 10 января 2000 г.

Впервые экспериментально установлено, что зависимость кавитационной прочности воды от температуры имеет экстремальный характер с минимумом вблизи 35–40°С и максимумом вблизи 50°С; дальнейшее повышение температуры ведет к понижению кавитационной прочности и сопровождается ростом поглощения энергии ударных волн. Предложен механизм явления, основанный на удержании микропузырьков конвективными потоками, скорость которых растет пропорционально температуре и при 50°С превышает скорость всплытия равновесных микропузырьков.

Имеющиеся экспериментальные данные о зависимости кавитационной прочности воды от температуры противоречат друг другу. В [1] зависимость предельного отрицательного давления от температуры носит экстремальный характер с максимумом вблизи 15°С, в [2] она линейно, а в [3] нелинейно падает. Противоречия, обусловленные несовершенством применяемых ранее методик, могли быть устранены только после проведения независимых экспериментов. Для их проведения была выбрана емкостная методика [4], отражающая интегральную динамику всего кавитационного кластера с максимальной погрешностью определения величины кавитационного порога 8–10%. Методика применима даже для исследования кавитационных процессов в непрозрачных суспензиях [5].

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Ударная волна генерируется в кювете 1 давлением импульсного магнитного поля на проводящую мембрану 3, передающую импульс давления в жидкость. Магнитное поле возникает в результате разряда малоиндуктивной батареи конденсаторов 10 на плоскую катушку 4, помещенную между ударной мембраной 3 и медным диском 5. Управляемый разрядник 8 позволяет изменять давление в ударной волне в диапазоне от 1 до 10 Мбар. Спротивление R — 9 обеспечивает генерацию

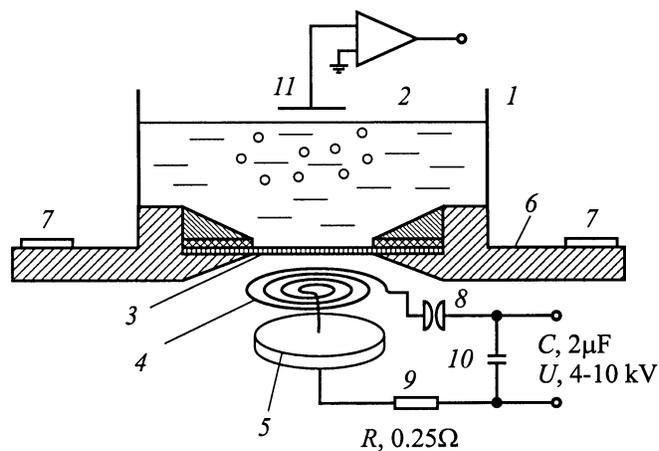


Рис. 1.

одиночного импульса давления. Плоская ударная волна длительностью $4-5 \mu\text{s}$ распространяется в виде диска диаметром $25-30 \text{ mm}$ к свободной поверхности воды 2. При ее отражении образуется волна разрежения, которая, распространяясь вниз, инициирует рост кавитационных ядер, формирующих под свободной поверхностью кавитационный кластер [4]. Нагрев кюветы обеспечивается массивным фланцем 6 с тремя нагревательными элементами 7. Достоинством установки является отсутствие влияния на исследуемые процессы стенок, так как при диаметре кюветы 80 mm и высоте столба жидкости в 25 mm процесс отражения ударной волны от свободной поверхности заканчивается за $20-30 \mu\text{s}$ до прихода в приповерхностную область волн разгрузки. В экспериментах использовалась дистиллированная, отстоявшаяся не менее суток вода. За $20-30 \text{ min}$, при фиксированном значении тока через нагревательные элементы 7, вода в кювете нагревалась до определенной температуры, которая в дальнейшем практически не менялась. Вода выдерживалась 2 h при каждой температуре, пока процесс газовыделения не прекращался. Последнее свидетельствовало о приходе системы вода-воздух в состояние статического равновесия. Для уменьшения испарения кювета 1 негерметично закрывалась лавсановой пленкой. Выделяющийся при

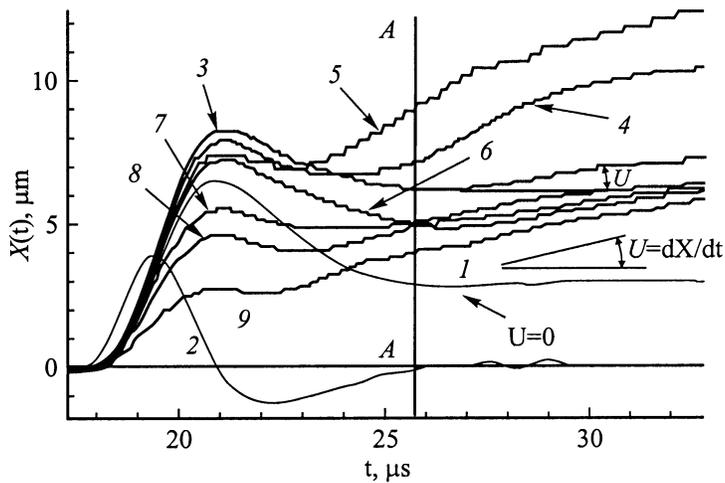


Рис. 2.

нагрев воздуха удалялся со дна и стенок кюветы пипеткой. Емкостный датчик *11* имел температуру воды.

Характеристики ударной волны и результаты экспериментов представлены на рис. 2, где кривая *1* — динамика свободной поверхности воды $X(t)$ при отражении от нее волны сжатия в докавитационном режиме, кривая *2* — полученный дифференцированием кривой *1* профиль скорости свободной поверхности воды, который, в условиях отсутствия кавитации, соответствует профилю ударной волны. Отрезком *AA* помечен момент завершения процесса отражения ударной волны от свободной поверхности. Поднятие свободной поверхности (кривая *1*) на определенный уровень отражает упругое растяжение образца воды в поле движущейся вниз волны разгрузки. Кривая *3* соответствует пороговому нагружению, ведущему к инерционному развитию кавитационного кластера при 18.5°C , о чем свидетельствует появление после границы *AA* наклона U кривой смещения свободной поверхности [4–6], обусловленного ростом пузырьков и увеличением объема нагружаемого образца воды. Для применяемой постановки эксперимента после границы *AA* (рис. 2) наклон U всех кривых смещения свободной поверхности связан с удельным объемом образующихся пузырей α простым соотношением

$\alpha = U/c$ [5] (U — скорость свободной поверхности, c — скорость звука в воде) и характеризует интенсивность кавитации. Появление наклона U выбрано в качестве критерия возникновения кавитации, а амплитуда соответствующей ударной волны считается пороговой [6]. Кривые 4–9 отражают динамику свободной поверхности при температурах исследуемого образца воды 33, 42, 52, 66, 74 и 84°C соответственно. Сначала с ростом температуры интенсивность кавитационных процессов увеличивается в несколько раз (33, 42°C, рис. 2, критерий — угол U), однако при 52°C она падает практически до исходного уровня, свидетельствуя об увеличении кавитационной прочности воды. Дальнейшее увеличение температуры опять приводит к повышению интенсивности кавитации и резкому увеличению поглощения энергии ударных волн, так как амплитуда смещения свободной поверхности при их отражении (кривые 7–9) падает. Поглощение ударной волны обычно обусловлено ростом газосодержания среды [4], а понижение кавитационной прочности воды — ростом кавитационных ядер [2]. Для корректного сравнения интенсивности развития кавитации при разных температурах начальная амплитуда ударной волны при 52 и 66°C была увеличена таким образом, что смещение свободной поверхности было равно исходному для 18.5°C. Характер температурной зависимости не изменился.

Понижение кавитационной прочности воды при нагреве до 42°C может быть обусловлено ростом равновесного радиуса микропузырьков газа, которые всегда присутствуют в воде [7,8], определяют ее кавитационную прочность и начальную динамику кавитационных процессов в ней. Логично предположить, что при нагревании микропузырьки увеличиваются в размерах настолько, что при 50°C всплывают, обуславливая увеличение кавитационной прочности воды. Это подтверждает резкое увеличение количества и размеров растущих на стенках и дне кюветы газовых пузырьков в процессе прогрева до 50°C. При дальнейшем росте температуры выделение воздуха существенно уменьшается. Повышение температуры приводит к экспоненциальному росту давления насыщенных паров воды и значительному снижению сил поверхностного натяжения σ , что облегчает развитие кавитации на механических включениях и при достижении определенной температуры может компенсировать недостачу микропузырьков свободного газа в воде и обеспечить наблюдаемое в экспериментах снижение кавитационной прочности. Однако факт резкого возрастания поглощения энергии ударной волны, начиная

с температуры 66°C (рис. 2, кривые 7–9), может быть объяснен только ростом газосодержания α воды.

Возможно, равновесный радиус стабильных микропузырьков в воде имеет сложную температурную зависимость с минимумом вблизи 52°C , но более вероятно предположение о том, что с ростом температуры растет их равновесный радиус и соответственно скорость всплытия, которая из равенства сил Стокса и Архимеда определяется выражением

$$U = 2\rho g R^2 / 9\eta, \quad (1)$$

где ρ — плотность, η — динамическая вязкость жидкости, R — текущий радиус микропузырька, g — ускорение силы тяжести. Предполагая, что газ в пузырьке идеальный и число молекул N с ростом температуры не меняется, можно написать $(P_0 + 2\sigma/R) \cdot 4\pi R^3/3 = NkT$, откуда при $2\sigma/R \gg P_0 - R \sim T^{1/2}$, а при $2\sigma/R \ll P_0 - R \sim T^{1/3}$. Здесь k — постоянная Больцмана, P_0 — атмосферное давление. В соответствии с (1) для стабильных ядер кавитации $R_0 \approx 1.5 \mu$ [8], $2\sigma/R_0 \approx P_0$ и при их дальнейшем росте выполняется условие $R \gg 2\sigma/P_0$ и $U \sim T^{2/3}$, т. е. темп температурного роста ядер кавитации ниже, чем темп роста скорости конвективных потоков, которая в соответствии с [9] для горизонтального слоя линейно зависит от температуры и при $40\text{--}60^\circ\text{C}$ достигает нескольких mm/s . Этого достаточно для удержания в объеме микропузырьков диаметром $10\text{--}30 \mu\text{m}$ и объяснения резкого повышения газосодержания и соответствующего роста поглощения энергии ударных волн в воде при 66°C и выше. Окончательное подтверждение того или иного механизма явления возможно только после проведения дополнительных экспериментальных исследований. Интересно отметить, что минимум кавитационной активности воды вблизи 52°C точно совпадает с максимумом кавитационной эрозии в ней и максимальной эффективностью очистки загрязненных поверхностей в моющих растворах на ее основе. Возможно, существует фундаментальная связь с аномальным поведением сжимаемости воды, которая с ростом температуры уменьшается, а после 50°C начинает расти [10].

Таким образом, благодаря оригинальной постановке эксперимента с использованием преимуществ емкостной методики впервые удалось минимизировать статистический разброс кавитационных порогов и выявить ход их температурной зависимости для воды.

Список литературы

- [1] *Briggs L.Y.* // *Jornal of Appl. Phys.* 1950. V. 21. P. 721.
- [2] *Перник А.Д.* Проблемы кавитации. Л: Судостроение, 1966.
- [3] *Connoly M., Fox F.E.* // *JASA.* 1954. V. 26. N 5.
- [4] *Besov A., Kedrinskii V.* // *Proc. of Int. Symp. on Bubble Dynamics and Interface Phenomena.* Birmingham, UK, 1994. P. 93–103.
- [5] *Бесов А.С., Зайцев В.В.* // *Акустика неоднородных сред.* ДСС. Т. 112. Новосибирск, 1997. С. 43–54.
- [6] *Бесов А.С., Кедринский В.К., Пальчиков Е.И.* // *Письма в ЖТФ.* 1989. Т. 15. В. 16. С. 23–27.
- [7] *Бесов А.С., Кедринский В.К., Пальчиков Е.И.* // *Письма в ЖТФ.* 1984. Т. 10. В. 4. С. 240–244.
- [8] *Бесов А.С., Кедринский В.К., Matsumoto Y.* // *ДСС.* Т. 104. Новосибирск, 1992. С. 16–28.
- [9] *Леонтьев А.И., Кирдякин А.Г.* // *Труды 3-го Всесоюзн. совещ. по тепло- и массопереносу.* Т. 1. М., 1968. С. 661–664.
- [10] *Зацепина Г.Н.* *Физические свойства и структура воды.* М.: МГУ, 1987. 171 с.