

Министерство высшего и среднего специального образования

Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 277

ИМПУЛЬС СОНОЛУМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ УДАРЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ
О ТВЕРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Петухов Ю.В.

Горький 1989

П е т у х о в Ю. В.

ИМПУЛЬС СОНОЛОМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ УДАРЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ О ТВЕРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ. //Препринт № 277. - Горький: НИРФИ. - 1989. - 10 с.

УДК 534,232: 535.211

Показана возможность экспериментального наблюдения вспышки сонолюминесценции при коллапсе воздушных пузырьков, распределенных в капле жидкости, при ударе ее о твердую поверхность.

Одна из нерешенных фундаментальных проблем воздействия ультразвука на водные системы и биологические жидкости — проблема расшифровки механизма трансформации механической энергии в энергию электронного возбуждения в водных средах, проявляющуюся в свечении жидкостей в ультразвуковом поле /1,2/. Это особенно актуально для низких (ниже 1 Вт/см^2) — терапевтических интенсивностей ультразвука /2/. При высоких интенсивностях ультразвука (выше 5 Вт/см^2) /2/, свечение, по-видимому, обусловлено излучением газа, нагретого до высокой температуры в результате адиабатического схлопывания газонаполненной полости /3/. Вследствие высокой температуры газа в пузырьке возможно протекание химических реакций с излучением фотонов, например, при реакции диссоциации молекул водяного пара на радикалы и рекомбинации последних, возможно образование возбужденных состояний с последующим высвечиванием фотонов ультрафиолетового диапазона /2/. Наличие примесей так же может изменить спектр свечения /4/, например, на фоне сплошного спектра возможно излучение дискретных линий /4, 5/. Одновременно с тепловыми процессами в полости могут наблюдаться электрические явления /6/, обусловленные существованием зарядов на границе пузырька /7/, что также усложнит спектр излучения.

Возможность возникновения излучения при коллапсе пузырька экспериментально установлена в /8/, где процесс схлопывания наблюдался при разрушении газонаполненных стеклянных сфер, давление в которых было существенно меньше атмосферного; в /9/ — при схлопывании полости, образованной воздействием лазерного излучения на жидкость, в /10/ — при электрическом разряде в воде.

Однако существует другой интересный способ возбуждения свечения в жидкости без использования ультразвука. Так известно, что свечение под действием ультразвука наблюдается в малых объемах

жидкости - в капле, причем для существенно меньших интенсивностей ультразвука /2/. Известно также, что при резком торможении потока жидкости в последнем возможно наблюдать явление гидравлического удара /II/, а давления могут достигать порядка нескольких десятков атмосфер. В определенных условиях аналогичные процессы могут возникать при падении струи или капли жидкости на твердую поверхность.

Следовательно, если справедлива тепловая теория сонолюминесценции, то в момент удара капли жидкости возможно возникновение импульса излучения, обусловленного адиабатическим схлопыванием пузырьков. Ниже приведены оценки энергии излучения, которые показали возможность экспериментального наблюдения вспышки сонолюминесценции.

Вначале рассмотрим процесс удара капли массы m и радиусом R_x , которая падает с высоты h_0 на твердую поверхность. Там, где это не приведет к серьезным погрешностям, будем моделировать каплю столбиком жидкости (струя). За время удара τ_s скорость капли изменится от v до 0. Сила, действующая на каплю со стороны твердой поверхности, $F = mv/\tau_s$. Так как масса столбика жидкости, заторможенная при ударе $m = \rho_0 c_0 \tau_s S$, где ρ_0 - плотность жидкости, c_0 - скорость звука, S_0 - поперечное сечение, то давление в капле $p_m = F/S = \rho_0 c_0 v$. Если скорость мала, то гидравлического удара нет, капля просто растечется. Поэтому необходимо оценить наименьшую скорость, при которой произойдет удар. Капля при ударе будет вести себя подобно упругому телу, если время разрушения τ_B больше времени, в течение которого происходит удар ($\tau_s \approx R_x/v$). Для оценки времени τ_B учтем, что оно должно зависеть от свойств жидкости: поверхностного натяжения - σ , вязкости - η , и от размеров капли R_x . Из приведенных величин возможна лишь единственная комбинация с размерностью времени $\tau_B \sim R_x^2 \eta / \sigma$. Интересно, что выражение для τ_B совпадает с зависимостью периода колебаний свободно всплывающего пузырька в жидкости /I2/. Такое совпадение не удивительно, так как о колебании пузырька в жидкости можно говорить, что колеблется жидкость вблизи области, где она отсутствует, аналогичное справедливо и для капли. Из равенства $\tau_B \approx \tau_s$ найдем скорость $v \approx \sigma / \eta$, а следовательно, и давление в капле при ударе $p_m = \rho_0 c_0 \sigma / \eta$; для воды получаем $v \approx 1$ м/с, $p_m = 10^7$ Па (100 атмосфер). Если принять,

что до удара капля падала равноускоренно, то нетрудно определить высоту падения $h_0 \approx 1/2 g (t/\eta)^2$, где g - ускорение свободного падения, для воды $h_0 \approx 2,5$ м. В результате действия силы сопротивления воздуха движение капли может выйти на стационарный режим. В этом случае из формулы Стокса получаем $v = \frac{2}{9} g R_{\infty}^2 (\rho_0 - \rho_2) / \eta$, где ρ_2 - плотность воздуха. Для капли $R_{\infty} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м имеем $v \approx 6$ м/с, что существенно превышает скорость, найденную ранее; поэтому условие для удара будет заведомо выполнено.

Теперь, когда определены все необходимые параметры R_m и τ_B , можно перейти к рассмотрению динамики пузырька радиусом R_0 , находящегося к моменту удара в капле. Уравнение, описывающее колебание пузырька, запишем в приближении Кирквуда-Бете [13, 14]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} \left(1 - \frac{1}{c_1} \frac{dR}{dt} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{3c_1} \frac{dR}{dt} \right) =$$

$$= \left(1 + \frac{1}{c_1} \frac{dR}{dt} \right) H + \frac{R}{c_1} \left(1 - \frac{1}{c_1} \frac{dR}{dt} \right) \frac{dH}{dt}, \quad (I)$$

где

$$H = \frac{n}{n-1} \frac{A^{1/n}}{p_0} \left\{ \left(p_0 - p_H + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - 4 \frac{\eta}{R} \frac{dR}{dt} + p_H + B \right\}^{n-1}$$

$$- (p' + A)^{\frac{n-1}{n}}, \quad c_1 = c_0 \left[1 + (n-1) \frac{H}{c_0^2} \right]^{1/2}.$$

Здесь R - радиус пузырька в момент времени t , p_0 - атмосферное давление, γ - показатель адиабаты воздуха, p_H - давление насыщенного пара, A , B , ρ_m и n - постоянные параметры в уравнении состояния воды [11], $p' = \frac{\rho_m}{2} [th\beta(1-t/\tau_s) + 1]_2$ - функция, моделирующая изменение давления в капле ($\beta = 10$). Численные расчеты

уравнения (I) проводились для следующих значений параметров: $\rho_0 = 10^5$ Па, $\gamma = 4/3$, $\rho_n = 2 \cdot 10^3$ Па, $A = 3,001 \cdot 10^8$ Па, $B = A - \rho_0$, $n = 7$, $C_0 = 1500$ м/с, $\rho_0 = 10^3$ кг/м³, $\sigma = 7$ Па, $\eta_0 = 0,01$ кг/мс и для пузырька с начальным радиусом 10^{-5} м $\leq R_0 \leq 10^{-4}$ м. Результаты численного анализа уравнения (I) приведена на рис. I - 3. Как видно из рис. I, 2, захлопывание полости происходит за время t_m , существенно меньшее времени разрушения капли ($R_{\infty} = 2,5 \times 10^{-4}$ м). Для пузырьков с радиусами $R_0 = 10^{-5}$ м + 10^{-4} м отношение минимального радиуса R_m к первоначальному приблизительно одинаково и в среднем $\alpha = R_m / R_0 \approx 0,129$ (см. рис. 2), что соответствует максимальной температуре $T_m \approx 1500^\circ$ К при $T_0 = 273^\circ$ К. Из закона смещения Вина следует, что максимум в излучении абсолютно черного тела при данной температуре приходится на длину волны $\lambda = 2 \cdot 10^{-6}$ м /15/, соответствующей границе видимой области /16/.

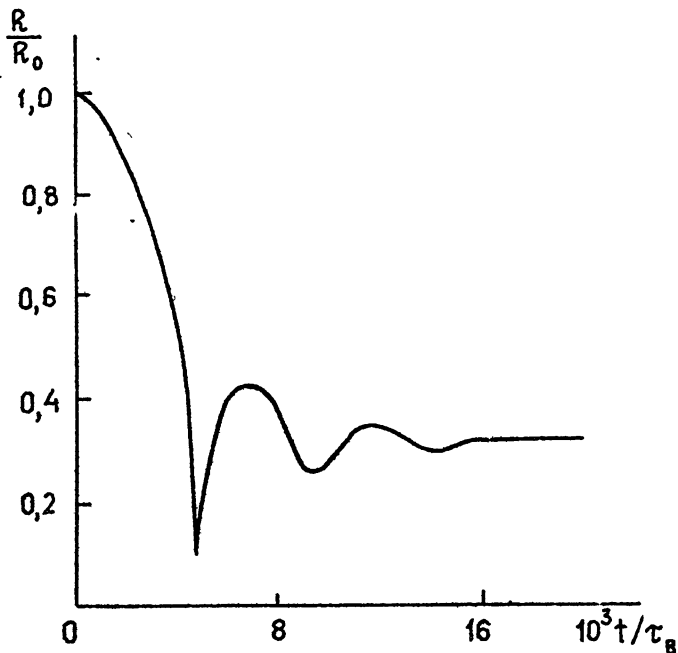


Рис. I. Оциллограмма колебания полости с начальным радиусом $R_0 = 10^{-4}$ м

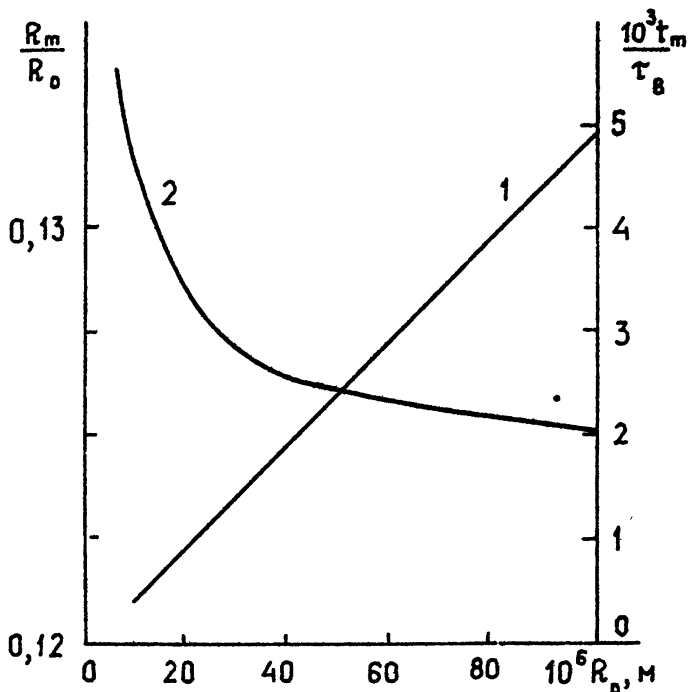


Рис.2. Зависимость минимального относительного радиуса R_m/R_0 пузырька - 1 и времени схлопывания t_m/τ_g - 2 от первоначального размера полости R_0 .

Оценим полную энергию излучения капли. При захлопывании пузырька до минимального размера $R \approx \alpha R_0$ энергия излучения, определенная из равенства $E_R = (1 - e^{-\tau}) E_0$, где $E_0 = 4\pi \int_0^{\infty} \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = (8\pi^5/15c^2) [(kT)^4/R_0^3 h^3]$ - энергия излучения абсолютно черного тела /15/, здесь ν - частота излучения, h - постоянная Планка, c - скорость света, k - постоянная Больцмана. Величина $\tau = R_0 \alpha / L_R$ - оптическая толщина, где $L_R^{-1} = 4,86 \cdot 10^{-5} (\rho/\rho_0)^{1,31} \exp(4,56 \times 10^{-4} T) \text{ м}^{-1}$, L_R - средняя длина свободного пробега излучения по Расселанду для воздуха /15/, ρ - давление в пузырьке в момент схлопывания. Поскольку $\alpha \geq 0,129$, то максимальное давление и температура в пузырьке T таковы, что $\tau \ll 1$ и $E_R \approx \tau E_0$. Если учесть $n(R_0)$ - распределение пузырьков по размерам в единице объ-

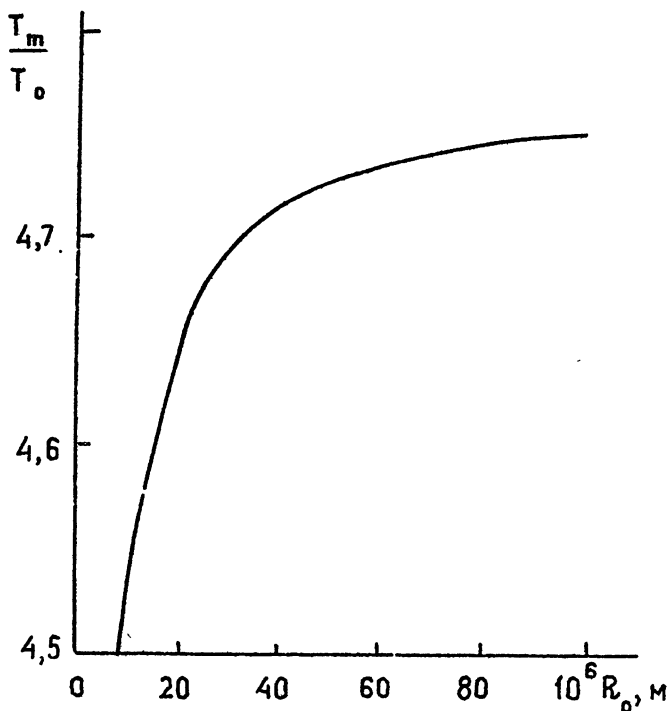


Рис.3. Зависимость максимальной температуры T_m в пузырьке от первоначального размера полости R_0 при $T_0 = 273^\circ\text{K}$

ема воды /17/ и размеры капли, то полную энергию излучения определим из равенства $E = \frac{4}{3} \pi R_{\infty}^3 (\alpha/L_R) E_0 \int_{R_1}^{R_2} R_0 n(R_0) dR_0$, где $R_1 = 10^{-5}$ м, $R_2 = 10^{-4}$ м. Используя два предельных закона изменения $n(R_0)$ /17/: для воды, отстоявшейся в течение 10 часов, $n(R) = 3 \cdot 10^4 / R_0^{3,5}$ м⁻⁴, в течение 25 минут - $n(R) = 5,51 \cdot 10^6 / R_0^{3,5}$ м⁻⁴, получим для капли $R_{\infty} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м значения энергии $E = 4,06 \cdot 10^{-13} + 7,34 \cdot 10^{-9}$ Дж, которые превышают значения энергии вспышки, полученные из экспериментальных данных в /18/.

Следовательно, при ударе капли воды о твердую поверхность возможно экспериментальное наблюдение вспышки сонолюминесценции, что явилось бы хорошим подтверждением тепловой теории свечения /2, 3/.

1. Эльпинер И.Е. Ультразвуковая люминесценция (обзор).//Акуст. ж. - 1960. - Т.5, № 1. - С. 3-15.
2. Журавлев А.И., Акопян В.Б. Ультразвуковое свечение. - М.: Наука, 1977.
3. Гордеев В.Е., Сербинев А.И., Трошин Я.К. О тепловой теории свечения кавитирующей жидкости.//Акуст.ж. - 1968. - Т.14, № 2. - С.287-288.
4. Taylor K.J., Jarman P.D. The spectra of sonoluminescence.// Austral.J.Phys. - 1970. - V.23, N 3. - P.319-334.
5. Голубничий П.И., Гончаров В.Д., Протопопов Х.В. Сонолюминесценция в жидкостях, влияние растворенных газов, отступление от тепловой теории.//Акуст.ж. - 1969. - Т.16, № 3. - С.534-541.
6. Горский С.М., Клемин В.А., Чернов В.В. О некоторых особенностях спектра ультразвуковой флуоресценции воды.//Акуст.ж. - 1980. - Т.26, № 3. - С. 459-462.
7. Degrois M., Baldo P. A new electrical hypothesis explaining sonoluminescence chemical actions and other effects produced in gaseous cavitation.//Ultrasonics. - 1974. - V.12, N 1. - P.25 - 28.
8. Schmid J. Das Lumineszenz und Gehalt einer Ravitationsbase. (Modellversuche an Glaskugeln).//Acustica. - 1962. - V.12, N 2. - P.70 - 83.
9. Акманов А.Г., Беньковский В.Г., Голубничий П.И. Исследование лазерной сонолюминесценции.//Акуст.ж. - 1973. - Т.19, № 5. - С.649-652.
10. Беньковский В.Г., Голубничий П.И., Масленников С.И. Импуль-

он электрогидродинамической сонолюминесценции, сопровождаемой высоковольтный электрический разряд в воде. // Акуст. ж. - 1974. - Т.20, № I. - С.23-26.

- II. Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Я.К. Гидравлический удар и уразнительные резервуары. - М.: Наука, 1968.
12. Перник А.Д. Проблемы кавитации. - Л.: Судостроение, 1966.
13. Акуличев В.А., Богуславский Ю.Я., Иoffee А.И., Наугольных К.А. Излучение сферических волн конечной амплитуды. // Акуст. ж. - 1967. - Т.13, № 3, - С.321-328.
14. Агрест Э.М., Корец В.Л. Крупномасштабные пространственные осцилляции кавитационной полости в звуковом поле. // Акуст. ж. - 1978. - Т.24, № I. - С.1-9.
15. Бай Ши-и. Динамика излучающего газа. - М.: Мир, 1968.
16. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. - М.: Наука, 1980.
17. Гаврилов Л.Р. О распределении газовых пузырьков в воде по их размерам. // Акуст. ж. - 1969. - Т.15, № I. - С.25-27.
18. Беньковский В.Г., Голубничий П.И., Козлов К.Ф. Об абсолютной светимости и длительности вспышек при ультразвуке. // Акуст. ж. - 1974. - Т.20, № I. - С.126-128.

Дата поступления статьи
24 февраля 1989 г.

Юрий Васильевич Петухов

ИМПУЛЬС СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ УДАРЕ КАПЛИ ЖИДКОСТИ
О ТВЕРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Подписано в печать 11.04.89 г. Мц 00671 . Формат 60x84/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,55 усл.п.л.

Заказ 4861 . Тираж 100 . Бесплатно

Отпечатано на ротапринтере НИРФИ