

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ ПУЗЫРЬКА ДЕЙТЕРИЯ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Е.А. Смородов, Р.Н. Галиахметов

Аннотация

Рассмотрены условия эффективной передачи энергии удара газовому пузырьку в жидкости и разработана экспериментальная установка для исследования высокоэнергетичных процессов в плотной плазме, образующейся при сжатии газа в пузырьке. Экспериментально обнаружено образование нейтронов при сжатии одиночного сферического дейтериевого пузырька в глицерине при поршневом ударном воздействии на жидкость.

PACS: 78.60.Mq 25.45.-z 28.20.-v 28.52.-s

В последние годы появилось большое число публикаций, посвященных обнаруженному в 2002 году явлению генерации нейтронов при акустической кавитации в дейтерированном ацетоне, описанного в работе [1], а затем, с некоторыми изменениями в экспериментальной части, в [2]. Авторы утверждают, что обнаруженный ими поток нейтронов является следствием реакции ядерного синтеза (ЯС), происходящего в условиях высоких плотностей и температур плазмы, образующейся при интенсивном сжатии кавитационного пузырька.

Возможность инициирования ядерной реакции в кавитационном пузырьке в настоящее время нельзя считать доказанной. В первую очередь причина состоит в весьма слабом потоке детектируемых нейтронов, незначительно проявляющемся на фоне используемых в экспериментах «первичных» элементарных частиц и естественного излучения. Возможно также появление обнаруженных авторами нейтронов от наведенной радиации элементов установки или окружающих предметов.

Ввиду чрезвычайной важности проблемы управляемого ЯС, с которым может быть связано обнаруженное явление, авторы решили повторить эксперимент [1] в измененном варианте, исключающем двоякое толкование результатов. В данной статье предпринята попытка провести эксперимент без использования первичного нейтронного (и любого другого) источника элементарных частиц. В этом случае каждый из зарегистрированных в установке нейтронов может быть только продуктом ядерных реакций.

В отличие от экспериментов [1,2], в которых процессы зарождения и пульсаций кавитационных пузырьков в акустическом поле были практически неконтролируемы, нами была разработана установка ударного сжатия газового пузырька заданного начального радиуса (рис.1). Установка представляет собой массивный толстостенный стальной цилиндр (1) с плотно входящим в него поршнем (2) из легкого алюминиевого сплава. Цилиндр

заполнен рабочей жидкостью, в качестве которой использовался глицерин ($C_3H_8O_3$). Пузырек газа (5) заданного объема вводился с помощью иглы микрошприца (4) и под действием выталкивающей силы начинал всплывать с постоянной скоростью V . Несложно вычислить, что при температуре $+5^\circ C$ и начальном радиусе пузырька $R_0=3$ mm скорость всплытия пузырька в глицерине составит около 5,3 mm/s, так что при высоте цилиндра 100 mm наблюдение за всплывающим пузырьком можно проводить в течение десятков секунд. Вязкость легко регулировалась в широких пределах путем изменения температуры жидкости.

При достижении пузырьком половины высоты цилиндра к поршню (2) прилагалась ударная нагрузка, создававшаяся грузом массой 10 kg, свободно падающим с высоты 0.1...5 m. Тем самым задавалась кинетическая энергия, передаваемая поршню, и формировался импульс давления в жидкости, под действием которого пузырек газа резко сжимался, аналогично пузырьку при акустической кавитации.

Для определения параметров экспериментальной установки были проведены предварительные эксперименты и проанализированы численные решения системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику газового пузырька при ударной нагрузке, учитывающие физические свойства рабочей жидкости и газа в пузырьке, а также свойств материала и геометрических размеров цилиндра и поршня.

Проведенный анализ показал, что для эффективной передачи энергии удара газу в пузырьке необходимо выполнение ряда условий: 1). Начальный радиус пузырька должен быть достаточно большим (не менее 0.5 mm), что обеспечивает синхронность изменения радиуса пузырька и фронта импульса давления. 2). Максимальный начальный радиус пузырька ограничивается условием сохранения его сферической формы при всплывании, и зависит от коэффициентов вязкости и поверхностного натяжения рабочей жидкости. 3). Давление

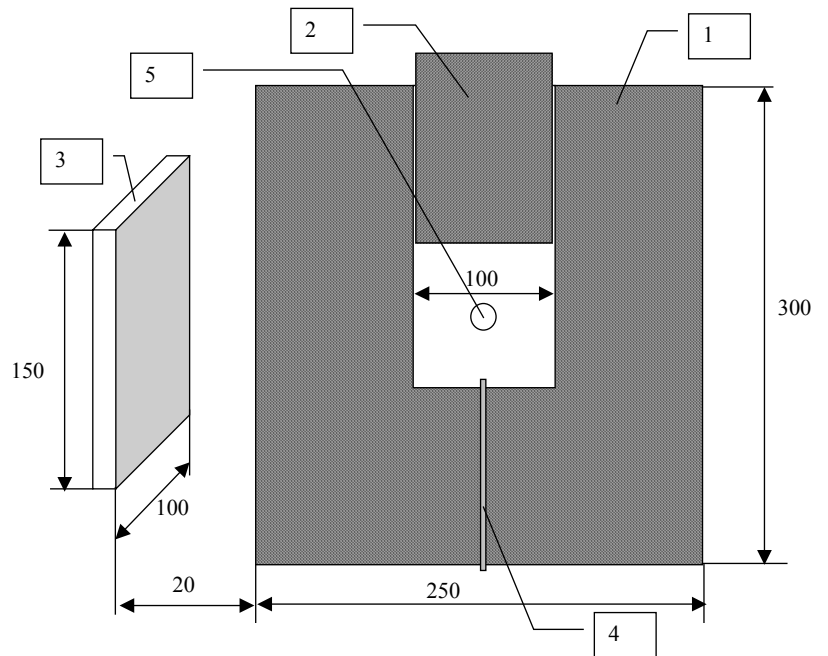


Рис.1. Схема установки. Размеры даны в mm.

1. Стальной цилиндр. 2. Поршень из алюминиевого сплава. 3. Детектор нейтронов из 5 счетчиков СНМ-56. 4. Игла шприца для ввода газового пузырька. 5. Пузырек газа.

насыщенных паров рабочей жидкости должно по возможности быть малым. 4). Размеры цилиндра с рабочей жидкостью должны быть достаточно большими по отношению к радиусу газового пузырька, что обеспечивает сферическую симметрию сжатия пузырька. 5). Для наиболее полной передачи кинетической энергии жидкости газу в пузырьке, свойства жидкости должны приближаться к свойствам несжимаемой жидкости, т.е. определяться условием $\rho \cdot c^2 \rightarrow \infty$, где ρ – плотность жидкости, c – скорость звука. Это условие позволяет минимизировать потери энергии на излучение ударной волны в конечной стадии сжатия пузырька. Сравнение свойств различных жидкостей по этому критерию приведено в табл.1.

В правом столбце приведены данные по интенсивности сонолюминесценции (СЛ) в этих жидкостях в воздушных пузырьках по данным [3,4,7,8]. Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивность СЛ практически однозначно связана с величиной критерия $\rho \cdot c^2$, что может быть следствием упомянутого выше условия несжимаемости.

Таблица 1

Свойства некоторых жидкостей и их сравнение по критерию $\rho \cdot c^2$

Жидкость	Скорость звука при 20 °С, m/s	Плотность при 20 °С, kg/m ³	$\rho \cdot c^2$, 10 ⁹ (J/m ³)	W _{SL} , Отн.ед
Ртуть	1453	13600	28.71	-
Глицерин	1923	1270	4.70	28
Серная кислота	1440	1830	3.79	-
Этиленгликоль	1658	1115	3.07	22
Анилин	1656	1023	2.81	-
Нитробензол	1460	1200	2.56	-
Вода	1484	1000	2.20	6
Бензол	1324	900	1.58	2
Этанол	1207	790	1.15	2
Ацетон	1174	810	1.12	1

Как следует из табл.1, оптимальным выбором жидкости по принятому критерию является ртуть. Ее использование, тем не менее, нежелательно по причине токсичности и высокого давления насыщенных паров. Более реальным кандидатом на роль рабочей жидкости в установке ударного сжатия является глицерин – безвредная прозрачная вязкая жидкость с ничтожно малым давлением насыщенных паров. Из других физических свойств глицерина, оказывающих влияние на динамику газового пузырька отметим коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 63$ мН/м (при 20 °С) и очень низкое давление насыщенных паров $P_s=0.133$ кПа (при 125 °С. Для ртути $P_s=171$ кПа уже при 20°С).

Весьма ответственным элементом экспериментальной установки является детектор нейтронов (3). Он составлен из пяти счетчиков СММ-56, с общей активной площадью 150 см^2 , что составляет с учетом геометрии установки 0.059 полного телесного угла. Работа счетчика основана на реакции нейтронов с наполняющим камеру газом гелия-3: $n+{}^3\text{He} = p+\text{T}+764 \text{ keV}$. У данного типа счетчиков, благодаря высокому сечению реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$, составляющему для тепловых нейтронов $5 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$ достигается практически предельная эффективность регистрации нейтронов. Характеристики счетчика приведены в табл.2.

Схема регистрации работала в режиме счета нейтронов с их накоплением в течение заданного промежутка времени. Время накопления составляла в нашем случае 1 секунду. Такое время было выбрано с учетом сложности синхронизации механического ударного устройства и электронной схемы.

Принцип работы схемы регистрации нейтронов иллюстрируется на рис.2. При непрерывном облучении слабым потоком нейтронов (в примере на рис.2 - 5 с^{-1}) на выходе усилителя заряда наблюдается картина, показанная на верхнем рисунке. После среза шумового сигнала (штриховая линия) он идет на сумматор-накопитель, который работает, как показано на нижнем рисунке. Ступеньки напряжения одинаковы по высоте. После завершения цикла счета уровень счета сбрасывается в ноль, и начинается новый цикл.

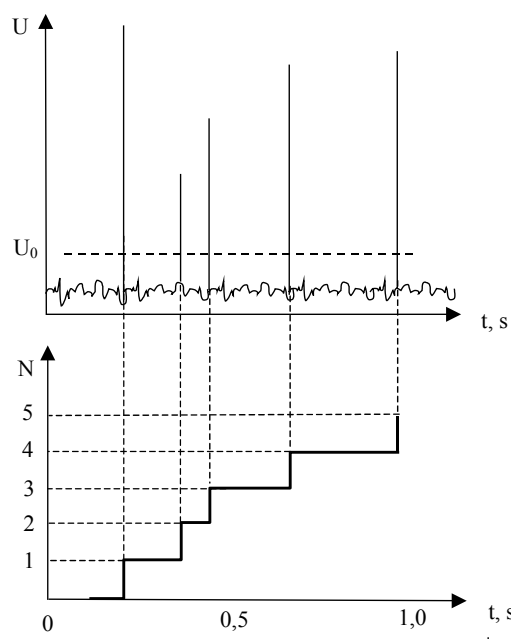


Рис.2. Принцип работы электронной схемы счета нейтронов. U - сигнал на выходе усилителя, U_0 - уровень среза шумового сигнала (90 mV). N - число нейтронов, вылетевших за одну секунду.

Таблица 2

Характеристики счетчика нейтронов СММ-56

Диаметр	18 mm
Длина рабочей части	150 mm
Режим работы	Пропорциональный счет
Давление ${}^3\text{He}$	0.7 MPa
Собственный фон, не более	10^{-3} с^{-1}
Сопротивление изоляции, не менее	10^{11} Ohm
Рабочее напряжение	1200 V
Эффективность регистрации тепловых нейтронов, не менее	0.7
Время сбора заряда	10^{-6} s

Регистрация нейтронов, образующихся при схлопывании газового пузырька, требует достаточно высокого временного разрешения как газового счетчика, так и электронной схемы.

Если предположить, что временные параметры нейтронного импульса близки к параметрам вспышки сонолюминесценции (около 10^{-10} s, [5]), то непосредственный счет нейтронов в импульсе невозможен, т.к. время накопления заряда счетчика значительно превышает эту величину (10^{-6} s). Поэтому необходимо расширить нейтронный импульс во времени. Это производится с помощью замедления нейтронов в водородосодержащей среде. При этом достигалась и вторая цель – снижение энергии нейтронов до уровня тепловых, наиболее эффективно регистрируемых гелиевым счетчиком. Применение специальных замедлителей в виде слоев или оболочек полимеров является нежелательным, т.к. приводит к удалению детектора от области генерирования нейтронов, а при этом телесный угол регистрации уменьшается. Поэтому в качестве замедляющей среды использовался глицерин, т.е. сама рабочая среда.

Численные оценки показали, что для замедления нейтронов с энергией 2.5 MeV до 0.5 eV в глицерине требуется около 25 столкновений нейтрона с ядрами водорода, что соответствует среднеквадратичному удалению от точки его рождения на 12 см и времени замедления около $3 \cdot 10^{-6}$ s. Поэтому с учетом линейных размеров цилиндра с глицерином (рис.1), можно ожидать, что основной поток нейтронов замедлится в самой рабочей жидкости без использования дополнительного слоя замедлителя, а длительность нейтронного импульса увеличится до нескольких микросекунд. Таким образом, временные и энергетические параметры нейтронного импульса становятся достаточными для регистрации газоразрядными счетчиками типа СМ-56.

Глицерин перед экспериментом дегазировался путем нагрева до температуры $+150^{\circ}\text{C}$, а затем охлаждался до $+5^{\circ}\text{C}$ для получения необходимой вязкости.

Дейтерий получали при химической реакции тяжелой воды с литием.

Энергия удара регулировалась изменением массы и высоты падения груза на поршень установки и составляла 5...500 J. После залива глицерина и установки поршня включалась электронная схема, которая работала в течение 30 минут для устранения дрейфов напряжений и контроля естественного фона. Фон нейтронного излучения в условиях проведения экспериментов составлял от 1 до 5 нейтронов в минуту.

Заметим, что при трех варьируемых параметрах (начальный радиус пузырька и энергия удара, которая может регулироваться массой груза или его конечной скоростью) для надежной статистики необходимо весьма большое число экспериментов. Поэтому вначале были проведены оценочные опыты, по результатам которых был найден начальный радиус газового пузырька, сжатие которого давало наиболее воспроизводимые результаты.

Было установлено, что при температуре глицерина $+5^{\circ}\text{C}$ наибольшая воспроизводимость результатов имеет место при начальном радиусе пузырька равном 3...5 мм. Предположительно это связано с устойчивостью сферической формы пузырька. При

больших радиусах квадратично возрастает скорость всплытия пузырька с каплеобразным искажением формы. При меньших начальных радиусах начинает сказываться недостаточная скорость нарастания давления, которая требуется для эффективного накопления кинетической энергии. Примененное в экспериментах механическое ударное устройство не позволяло создавать скорость падения груза большую 10 m/s при его массе 10 kg. (Полная масса установки, определявшаяся, главным образом, массой стального цилиндра, составляла 110 kg).

Результаты серии экспериментов при начальном радиусе пузырька $R_0=3\text{mm}$ представлены в табл.3. Для каждого значения энергии удара в интервале 10...500 J проводилась серия из 10 экспериментов, при которых фиксировалось показания счетчика нейтронов непосредственно после удара.

Для подтверждения того, что результаты экспериментов не могут объясняться фоновым излучением или случайными факторами, нами были проведены контрольные эксперименты, в которых все условия экспериментов сохранялись, кроме того, что вместо дейтерия пузырек содержал воздух.

При контрольных экспериментах с воздушными пузырьками нейтроны не были обнаружены, за исключением нескольких случаев, в которых, по-видимому, регистрировалось фоновое нейтронное излучение или собственный фон счетчика. Фоновое излучение в условиях проведения экспериментов составляло $1...5 \text{ min}^{-1}$. При интервале измерений (счета) в одну секунду вероятность регистрации фонового нейтрона составляет не более 0.08, так что из 459 нейтронов, зарегистрированных в серии измерений табл.3 (общее время измерений составляет 110 с), только $110 \cdot 0,08=9$ могут быть фоновым излучением. Таким образом, можно утверждать, что результаты экспериментов, во-первых, однозначно связаны с наличием дейтерия в пузырьках, и, во-вторых, не могут быть объяснены фоновыми излучениями.

Таблица 3

Результаты серии экспериментов при различной энергии удара (дейтерий, $R_0=3\text{mm}$)

Номер опыта	Счет импульсов N при энергии удара, J										
	10	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
1	0	1	2	2	7	2	5	6	3	9	0
2	0	2	2	0	6	6	9	8	8	8	2
3	1	1	1	5	6	7	1	9	6	9	15
4	0	2	1	5	4	2	3	6	0	7	11
5	1	0	1	4	6	5	5	9	7	6	0
6	1	0	1	3	5	1	6	2	3	9	2
7	0	2	3	4	2	4	3	7	10	10	7
8	1	1	1	4	2	9	5	5	4	7	5
9	0	2	1	4	5	3	5	4	6	16	8
10	0	2	1	1	2	5	11	1	8	9	2
Среднее	0.4	1.3	1.4	3.2	4.5	4.4	5.3	5.7	5.5	9.0	5.2
Дисперсия	0.27	0.68	0.49	2.84	3.61	6.26	8.45	7.56	8.94	7.55	25.06

Анализ данных табл.3 показывает, что выход нейтронов в подобных экспериментах достаточно сложно связать с энергией удара. Среднее число нейтронов в одном импульсе с увеличением энергии удара увеличивается, но возрастает и его дисперсия, что указывает на значительное снижение воспроизводимости опытов. По-видимому, это связано со сложностью создания идентичности условий проведения эксперимента, таких как положение пузырька в момент удара, искажение его формы и т.п. Кроме того, после однократного проведения эксперимента необходимо было заменять рабочую жидкость, т.к. образовавшаяся после эксперимента газовая подушка препятствовала эффективному сообщению энергии пузырьку при повторении эксперимента. Замена жидкости также не способствует сохранению идентичности условий экспериментов. В некоторых случаях визуально наблюдалось дробление пузырька на множество мелких пузырьков, которые находились в жидкости в виде мутного облака (высокая вязкость не позволяла им всплывать). В таких случаях выхода нейтронов зафиксировано не было.

Заметим еще одно интересное обстоятельство. Из табл.3 следует, что при энергиях удара 10...50 J наблюдается заметное превышение выхода нейтронов над фоном. В то же время, как можно показать элементарным расчетом, этой энергии явно недостаточно не только для адиабатического нагрева газа до термоядерных температур, но даже для полной ионизации газа. По-видимому, этот факт служит подтверждением гипотезы об образовании сходящейся сферической ударной волны в газе, сообщающей энергию лишь небольшой центральной области газового пузырька.

Для выяснения физического механизма генерирования нейтронов в проведенных экспериментах необходимы дальнейшие исследования. Представляется весьма вероятным механизм реакции ядерного синтеза в условиях сильно неравновесной плазмы в ударной волне, предложенный авторами работы [6].

Несмотря на предельную простоту экспериментальной установки можно считать надежно установленным факт генерации нейтронов при сжатии дейтериевого пузырька в глицерине, который может быть следствием инициирования реакции ядерного синтеза в дейтериевой плазме.

Авторы:

Смородов Е.А.

Галиахметов Р.Н.

14.02.2006

Список литературы

1. Taleyarkhan R. P., West C.D., Lohey R.T. et al. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation. // Science. 2002. **V.295**, P.1868–1873.
2. Taleyarkhan R. P., West C.D., Lohey R.T. et al. Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation. // Phys. Rev. Lett. 2006. **V.96**. P. 034301
3. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция. М.: Химия, 1986.-288 с.
4. Смородов Е.А. Экспериментальные исследования кавитации в вязких жидкостях. //Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: Акустический институт АН, 1987.
5. Hiller R.A., Putterman S. J., Weninger K.R. Time-Resolved Spectra of Sonoluminescence. // Phys. Rev. Lett. 1998. **V.80**, P.1090–1093
6. Великодный В. Ю., Битюрин В. А. О возможности термоядерного синтеза во фронте ударной волны // Прикладная физика. 2001. № 3. С. 12-19.
7. Flannigan D. J., Suslick K.S. Molecular and atomic emission during single-bubble cavitation in concentrated sulfuric acid // Acoustics Research Letters Online, 2005. **V.6**. Issue 3, P. 157-161
8. Flannigan D.J., Suslick K.S. Plasma Line Emission during Single-Bubble Cavitation. //Phys. Rev. Lett. 2005.**V.95**, P.044301