

УДК 621

Экспериментальное обнаружение нейтронов при ударном сжатии дейтериевого пузырька в вязкой жидкости

Е. А. Смородов, Р. Н. Галиахметов

Автономная некоммерческая организация "Центр энергосбережения Республики Башкортостан", г. Уфа, Россия

Рассмотрена принципиальная возможность создания дейтериевой плазмы высокой плотности в сжимающемся газовом пузырьке в вязкой жидкости. Экспериментально обнаружено образование нейтронов при сжатии одиночного сферического дейтериевого пузырька в глицерине при поршневом ударном воздействии на жидкость. Предложены пути усовершенствования экспериментальной установки для увеличения энергетического выхода.

В последние годы появилось множество домыслов и спекуляций по поводу обнаруженного в 2002 г. явления генерации нейтронов при акустической кавитации в дейтерированном ацетоне [1]. Отметим, что полемика в основном

разворачивается в "ненаучных" средствах информации, таких как ТВ, газеты, научно-популярные журналы и сеть Интернет, в то время как в научной печати откликов на предполагаемое открытие практически нет.

Ввиду чрезвычайной важности проблемы управляемого ядерного синтеза, с которым непосредственно связано обнаруженное явление, авторы решили повторить эксперимент [1] в измененном варианте, исключая в дублюе толкование результатов.

Вначале кратко изложим суть проведенных в работе [1] экспериментов. Установка состояла из цилиндрического стеклянного сосуда с дейтерированным ацетоном (C_3D_6O), по внешнему периметру которого располагался кольцевой акустический излучатель. Размеры сосуда подобраны таким образом, чтобы при резонансной частоте излучателя 19 кГц в центре цилиндра образовалась пучность акустического давления, что обеспечивало условия для возникновения акустической кавитации.

Наиболее интересным (и вызывающим наибольшие возражения при интерпретации результатов) является способ получения зародышей кавитации, примененный авторами работы [1]. Был использован импульсный источник нейтронов с энергией 14 МэВ, которые, проходя через жидкость, образовывали след из микропузырьков пара рабочей жидкости, служивших зародышами кавитации. По окончании первичного нейтронного импульса регистрировались вторичные нейтроны с энергией около 2,5 МэВ, которые, по утверждению авторов, являются результатом реакции ядерного синтеза между ядрами дейтерия внутри пузырька при его быстром сжатии в акустическом поле и возникновения в пузырьке высоких температур.

Основным возражением у оппонентов работы является то, что обнаруженные вторичные нейтроны могут быть не результатом реакции ядерного синтеза, а первичными 14-МэВ нейтронами, замедлившимися в жидкости до энергии 2,5 МэВ.

В данной статье предпринята попытка провести эксперимент без использования первичного нейтронного источника. В этом случае каждый из зарегистрированных в установке нейтронов может быть только продуктом ядерных реакций.

Заметим, что необходимость использования первичного нейтронного источника, по утверждению авторов статьи, вызвана тем, что именно нейтронный пучок позволяет получать зародыши кавитации с начальным радиусом и газосодержанием, "оптимальным" с точки зрения достижения максимальных термодинамических параметров газа при его сжатии. Тем не менее очевидно, что "оптимальный" начальный радиус зависит от множества параметров, например частоты и амплитуды акустического поля, состава газа в пузырьке, свойств рабочей жидкости, условий сохранения сферической формы при сжатии и пр. Это следует не только из численных расчетов уравнений динамики кавитационного пузырька, приведенных во многих работах по исследованию кавитации [2—4], но и, вполне очевидно, из интуитивных соображений.

Поэтому необходимо хотя бы качественно проанализировать влияние каждого из перечисленных параметров и определить их "оптимальное" сочетание, с тем, чтобы сжатие газового пузырька в этих условиях приводило к максимальной вероятности инициирования ядерной реакции.

Анализ условий для инициирования реакций ядерного синтеза в газовом пузырьке

Вероятность реакции синтеза зависит от величины энергетического барьера реакции, определяемого сечением ядерного взаимодействия, а значит, от плотности

плазмы, ее состава, температуры и времени существования. Количественно положительный энергетический выход реакции ядерного синтеза определяется критерием Лоусона, а именно произведением концентрации частиц n на время удержания плазмы τ . Для реакции $D-D$ эта величина составляет $n\tau > 10^{22} \text{ м}^{-3}\cdot\text{с}$, а для реакции $D-T$ — $n\tau > 10^{20} \text{ м}^{-3}\cdot\text{с}$.

С точки зрения рассматриваемой задачи это означает, что газовый пузырек необходимо сжать как можно сильнее. Количественно это условие можно приближенно (т. е. без учета влияния испарения и конденсации жидкости внутри пузырька) выразить как

$$n = n_0 \left(\frac{R_0}{R_{\min}} \right)^3 \rightarrow \max, \quad (1)$$

где n_0 — концентрация ядер дейтерия при равновесных условиях;

R_0 — равновесный радиус газового пузырька;

R_{\min} — минимальный радиус, достигаемый при его сжатии.

Не менее важным является второй сомножитель в критерии Лоусона — время заключительной стадии сжатия пузырька τ . В качестве численной оценки τ можно взять, например, ширину по полувысоте импульса температуры, возникающего при пульсации пузырька. В первом приближении можно принять, что время конечной степени сжатия пропорционально времени полного схлопывания вакуумной полости и определяется формулой Рэлея

$$\tau \approx 0,915 R_0 \left(\frac{\rho_l}{P_\infty} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где R_0 — радиус, с которого начинается сжатие пузырька;

ρ_l — плотность жидкости;

P_∞ — сжимающее давление в жидкости.

Из (1) и (2) следует, что значение критерия Лоусона для плазмы в пузырьке $n\tau \sim R_0^4$, т. е. инициирование реакции ядерного синтеза наиболее вероятно для пузырьков с наибольшим начальным радиусом.

Теплопередача в газе определяется процессами передачи импульса, поэтому скорость охлаждения центральных областей пузырька обратно пропорциональна квадрату его радиуса. Вследствие этого следует ожидать, что при одинаковом отношении максимального и минимального радиусов при сжатии пузырька (с учетом теплообмена) температура газа в большом пузырьке (БП) будет выше, чем в малом. Начальный радиус влияет также на возможность формирования ударной волны в газе, если реализуется механизм нагрева центральной области пузырька сходящимися ударными волнами [5, 6].

Приведенные выше оценки, безусловно, носят весьма приближенный характер. Тем не менее можно ожидать, что вероятность достижения условий для ядерных реакций при сжатии большого газового пузырька выше, чем для микроскопического.

Использование БП в качестве концентратора энергии для инициирования ядерной реакции в техническом плане осложняется двумя основными факторами.

1. Сложность сообщения достаточной энергии БП. Из расчетов следует, что эффективно накапливать потенциальную энергию и отдавать ее газу в виде тепла способны только пузырьки с определенным начальным (равновесным) радиусом, который приблизительно соответствует рассчитанному по формуле Минаэрта

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} P_\infty}. \quad (3)$$

При использовании акустических излучателей равновесный радиус пузырька ограничивается низкой эффективностью излучателей на частотах ниже 5—10 кГц. Повышение эффективности излучателей на более низких частотах потребовало бы значительного увеличения их геометрических размеров. Например, для БП радиусом 1 см расчет по (3) дает резонансную частоту 320 Гц, при этом длина резонансного магнитоотрицательного излучателя для возбуждения колебаний БП должна составлять около 10 м.

2. Сложность сохранения сферической формы БП. Эффективность концентрации энергии достигается лишь в случае сохранения сферической формы БП вплоть до достижения им минимального радиуса. Сферическая форма обеспечивается силами поверхностного натяжения жидкости, электрическими силами заряженной поверхности пузырька, а также, по данным [7], силами вязкости (в динамическом случае). Сфера стремится разрушиться под действием течений, нарушающих сферическую симметрию, например, вблизи другого пузырька или стенки сосуда, в связи с чем возможно развитие различного рода динамических неустойчивостей.

Исходя из изложенного можно предположить, что для достижения условий, необходимых для инициирования ядерных реакций синтеза, необходимо выполнение следующих условий:

- равновесный радиус пузырька должен быть достаточно большим (до 1—10 мм);
- жидкость должна иметь высокие коэффициенты поверхностного натяжения и вязкости;
- пузырек должен быть одиночным, т. е. выполняется условие $R_0 \ll L$, где L — расстояние от центра пузырька до любого другого включения (другой пузырек, стенка сосуда, поверхность жидкости и т. п.).

В качестве экспериментального подтверждения последних двух пунктов можно привести работу [7], где показано, что наибольшей интенсивностью обладает сонолюминесценция (СЛ) в вязких жидкостях с высоким поверхностным натяжением (глицерин, этиленгликоль), а также работу [8] по "однопузырьковой" СЛ, в том числе в серной кислоте [9].

Особый интерес представляет вопрос о сообщении достаточной энергии БП. Как уже было отмечено выше, акустические методы для этого малоприменимы, по крайней мере при использовании существующих акустических излучателей. Многократные пульсации БП в конечном итоге могут привести к потере сферической

формы и его расщеплению, после чего дальнейшая накачка энергии становится невозможной.

Поэтому в данной работе использовалось однократное высокоинтенсивное сжатие БП с применением ударного воздействия на рабочую жидкость.

Для получения полностью ионизированной дейтерий-электронной плазмы в БП радиусом 5 мм (при нормальных условиях) необходимо затратить энергию около 30 Дж. В простейшем случае при использовании ударного сжатия БП падающим грузом такая энергия сообщается системе при падении груза массой 3 кг с высоты 1 м.

Таким образом, для проведения эксперимента не требуется применения материалов с уникальными свойствами, однако необходимо разработать схему установки, передающей энергию удара пузырьку без нарушения его сферической формы и с соблюдением всех условий, перечисленных выше.

Экспериментальная установка

Для экспериментальной проверки гипотезы о возможности запуска реакции ядерного синтеза при ударном сжатии большого дейтериевого пузырька была разработана установка, схема которой приведена на рис. 1.

Установка представляет собой массивный толсто-стенный стальной цилиндр 1 с плотно входящим в него поршнем 2 из легкого алюминиевого сплава. В цилиндре находится жидкость, в качестве которой использовался глицерин ($C_3H_8O_3$). Выбор последнего обусловлен следующими соображениями. Во-первых, интенсивность солюминесценции в глицерине наибольшая из всех исследованных жидкостей [4, 7], а поскольку яркость вспышки СЛ считается индикатором термодинамических параметров плазмы в пузырьке, то и условия для реакции ядерного синтеза при этом наиболее благоприятны. Во-вторых, глицерин является высоковязкой жидкостью, что решает проблему герметичности зазора между цилиндром и поршнем установки и позволяет замедлять процесс всплытия БП. Вязкость легко регулировать в широких пределах, изменяя температуру жидкости. В-третьих, скорость звука в глицерине составляет 1900 м/с (в воде — около 1500 м/с), что приближает систему жидкость—пузырек к модели несжимаемой жидкой среды, и при этом вероятность разрушения пузырька ударной волной при ударе поршня о жидкость снижается. Важно отметить, что давление насыщенных паров глицерина в условиях эксперимента малó, и влиянием паров рабочей жидкости можно пренебречь.

Пузырек дейтерия 5 вводился с помощью шприца 4, установленного в дне цилиндра. Начальный радиус пузырька определялся по объему закачанного газа и мог задаваться от 0,5 до 10 мм.

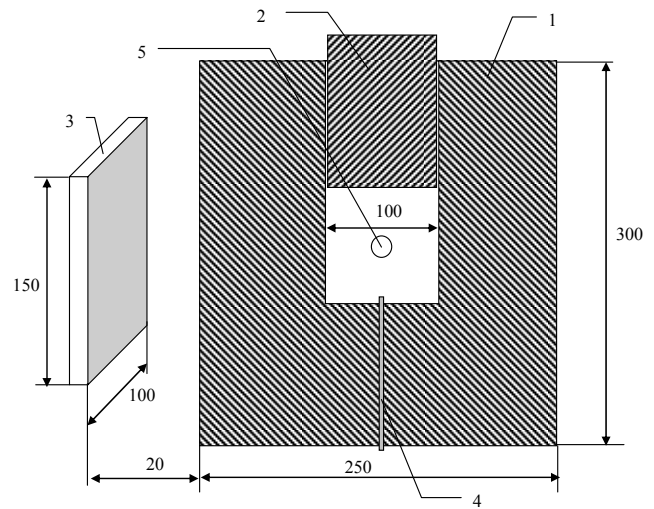


Рис. 1. Схема установки (размеры даны в мм): 1 — стальной цилиндр; 2 — поршень из алюминиевого сплава; 3 — детектор нейтронов из пяти счетчиков СМН-56; 4 — игла шприца для ввода пузырька дейтерия; 5 — пузырек дейтерия

Весьма ответственным элементом экспериментальной установки является детектор нейтронов 3, составленный из пяти гелиевых счетчиков СМН-56 с общей активной площадью 10×15 см. Для устранения шумов усилителя использовалась схема амплитудного дискриминатора, срезающего сигнал на заданном уровне. Детектор работал в режиме счета импульсов.

Особенность гелиевых детекторов нейтронов — их высокая чувствительность к тепловым нейтронам, с сечением реакции в его объеме $He^3(n, p)T$, равным 27463 барн, и низкая — к быстрым, с сечением той же реакции $\sim 0,8$ барн в области энергий нейтронов от 300 КэВ до 2 МэВ.

Поэтому желательно замедлить получаемые 2,5-МэВ нейтроны до тепловых скоростей. Одновременно с этим замедление нейтронов приводит к расширению нейтронного импульса во времени, что позволяет снизить требования к быстродействию электронной схемы.

К числу лучших замедлителей, широко используемых в ядерной физике и ядерной технике для превращения быстрых нейтронов в тепловые, относятся вода, тяжелая вода, бериллий, графит. Данные по некоторым наиболее распространенным замедлителям нейтронов приведены в таблице.

| Вещество | N | t , мкс | L_B , см |
|----------|------|-----------|------------|
| Свинец | 1600 | 1300 | 200 |
| Графит | 110 | 70 | 43 |
| Вода | 23 | 3 | 13 |

Данные по замедляющим свойствам глицерина отсутствуют, однако несложно вычислить, что концентрация ядер водорода в глицерине (основной замедлитель) и воде примерно одинакова, поэтому и их замедляющие свойства близки.

С учетом геометрических размеров установки оценка параметров чувствительности дает следующие характеристики:

на активную поверхность детектора нейтронов падает 1/17 из всех нейтронов, вылетевших из установки;

время замедления нейтронов (т. е. время вылета из установки после схлопывания пузырька) 0,1...—1 мкс. Поэтому до тепловой скорости замедлятся около 1/5 из всех образующихся нейтронов;

вероятность захвата нейтрона детектором — 1/100.

Таким образом, можно приближенно считать, что регистрируется один нейтрон из $17 \cdot 5 \cdot 100 = 8500$.

Примем среднее число столкновений N , среднее время замедления t и среднее квадратичное удаление L_B нейтрона от источника при замедлении нейтрона в неограниченной среде от энергии 1 МэВ до энергии 0,1 эВ.

Проведение эксперимента и полученные результаты

На первом этапе экспериментов в цилиндр установки намеренно не устанавливались датчики приборов (измерения импульса давления, интенсивности световой вспышки и пр.), что обусловлено необходимостью обеспечения максимальной жесткости конструкции реактора и симметрии потоков жидкости для сохранения сферической формы газового пузырька.

Глицерин перед экспериментом дегазировался путем нагрева до температуры +150 °С, а затем охлаждался до +5 °С в целях 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 Дж.

После залива глицерина и установки поршня включалась электронная схема, которая работала в течение 30 мин для устранения дрейфов напряжений и контроля естественного фона.

После этого производился контрольный удар (без пузырька) с максимальной энергией в целях проверки влияния вибрации установки на работу детектора нейтронов. Во всех случаях подобное влияние отсутствовало.

Затем в установку вводили пузырек воздуха объемом 1...—10 мл и производили удар с максимальной энергией. Момент удара поршня о жидкость рассчитывался таким образом, чтобы всплывающий пузырек находился на половине высоты цилиндра, что обеспечивало максимальную симметрию потока жидкости. В этих экспериментах нейтроны зарегистрированы не были.

На последнем этапе вводили пузырек с дейтерием. Объем пузырька изменяли в процессе экспериментов также от 1 до 10 мл (что соответствует радиусу 0,62...—13 мм). Многократное повторение экспериментов дало возможность установить, что в момент максимального сжатия пузырька с дейтерием детектор регистрирует от 1 до 5 нейтронов, что, с учетом гео-

метрии установки и чувствительности детектора, означает генерирование 8500...—40000 нейтронов.

Необходимо отметить, что выход нейтронов в подобных экспериментах достаточно сложно связать с энергией удара (рис. 2). По-видимому, это обусловлено сложностью создания сопоставимых 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, так как образовавшаяся после эксперимента газовая подушка препятствовала эффективному сообщению энергии пузырьку при повторении эксперимента. В некоторых случаях происходило дробление пузырька на множество мелких, которые наблюдались в жидкости в виде мутного облака (вязкость не позволяла им всплывать). В таких случаях выхода нейтронов зафиксировано не было.

Тем не менее статистически значимо установлено, что наибольшая вероятность выхода нейтронов имела место при радиусах дейтериевого пузырька в пределах 1—3 мм. Предположительно это связано с тем, что при больших радиусах нарушается сферическая форма пузырька при всплытии, а при меньших сказывается недостаточная скорость нарастания импульса давления при ударе.

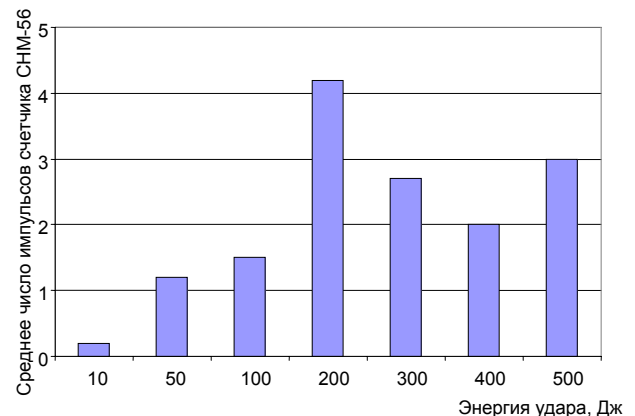


Рис. 2. Зависимость выхода нейтронов от энергии удара для дейтериевых пузырьков с равновесным радиусом 3 мм

Отметим еще одно обстоятельство. Если считать, что временные характеристики нейтронного импульса примерно соответствуют характеристикам вспышки СЛ, т. е. имеют длительность порядка десятков пикосекунд [10], то в этом случае используемый счетчик нейтронов СНМ-56 зафиксирует нейтронный импульс как одиночный нейтрон. Временные характеристики счетчика не позволяют разделить импульс длительностью менее 0,1 мкс на отдельные нейтроны. Поэтому данные эксперимента по количеству нейтронов будут сильно занижены даже с учетом расширения импульса во времени в процессе замедления нейтронов в глицерине.

Для выяснения физического механизма генерирования нейтронов в проведенных экспериментах необходимы дальнейшие исследования. Представляется весьма вероятным существование механизма реакции ядерного синтеза в условиях сильно неравновесной

плазмы в ударной волне, предложенного авторами работы [11].

Заключение

Ввиду полного отсутствия посторонних и фоновых шумов можно считать доказанным, что инициирование реакции ядерного синтеза при пульсации газового пузырька имеет место.

Для увеличения энергетической эффективности и дальнейшего исследования физического механизма процессов в сжимающемся газовом пузырьке необходимо продолжение экспериментов на более сложной установке с проведением измерения давления в жидкости, контроля формы и радиуса пузырька во времени, энергии и спектрального состава световой вспышки.

Предполагаемые пути усовершенствования экспериментальной установки следующие:

- проведение эксперимента с жидкими металлами, в которых скорость звука значительно больше, чем в жидкости;
- использование электрогидравлического удара или микровзрыва;
- снижение энергетического порога реакции с использованием трития;
- введение в материал стенок реактора или в рабочую жидкость ядер бериллия или лития для увеличения концентрации трития в растворе;
- создание сферической рабочей зоны с радиусом около 1 м и накачка энергии в режиме резонансных пульсаций пузырька в центре сферы на частотах 200—...400 Гц.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ГУП "Геофизика" А. М. Ахмедшину и С. С. Ефимову за разработку электронной схемы и программного обеспечения для счетчика нейтронов.

Л и т е р а т у р а

1. *Taleyarkhan R. P., West C. D., Lohey R. T., Nigmatulin R. I., Block R. C.* Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation// *Science* 295. 2002. P. 1868—1873.
2. *Аганин А. А., Ильгамов М. А.* Численное моделирование динамики газа в пузырьке при схлопывании с образованием ударных волн// *Прикл. мех. техн. Сер. Физ.* 1999. Т. 40. № 2. С. 101—110.
3. *Аганин А. А., Нигматулин Р. И., Ильгамов М. А., Ахатов И. Ш.* Динамика пузырька газа в центре сферического объема жидкости// *Доклады АН.* 1999. Т. 369. № 2. С. 182—185.
4. *Маргулис М. А.* Сонолюминесценция// *Успехи физических наук.* 2000. № 3. С. 263—287.
5. *Nigmatulin R. I., Akhatov I. Sh., Topolnikov A. S. et al.* Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion// *Physics of Fluids.* 2005. № 17. P. 106—107.
6. *Аганин А. А., Ильгамов М. А.* Колебания сферического пузырька газа в жидкости с образованием ударных волн// *Изв. АН. МЖГ.* 1999. № 6. С. 126—133.
7. *Смородов Е. А.* Экспериментальные исследования кавитации в вязких жидкостях. Дис... канд. физ.-мат. наук. — М.: Акустический институт АН им. Андреева, 1987.
8. *Gaitan D. F., Crum C. C., Churh C. C., Roy R. A.* // *J. Acoust. Soc. Am.* (1992). № 91. P. 3166.
9. *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. № 3. P. 157—161.
10. *Hiller R. A., Putterman S. J., Weninger K. R.* Time-Resolved Spectra of Sonoluminescence// *Phys. Rev. Lett.* 1998. № 80. P. 1090—1093.
11. *Великодный В. Ю., Битюрин В. А.* О возможности термоядерного синтеза во фронте ударной волны// *Прикладная физика.* 2001. № 3. С. 12—19.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2005 г.

Experimental detection of neutrons at shock compression bubble in a viscous liquid

E. A. Smorodov, R. N. Galiakhmetov

The Independent noncommercial organization "Energy efficiency Agency of Republics Bashkortostan",
Ufa, Russia

Key opportunity of making the high-density deuterium plasma in a cramped gas bubble into a thick liquid has been surveyed in this work. Formation of neutrons at squeezing the single spherical deuterium bubble in glycerine at piston shock action on a fluid was revealed in the experiment. The retrieval routes of betterment for the experimental installation to increase the energy efficiency are offered.