

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

О перспективах термоядерной энергетики на основе кавитации пузырей

А.А. Говердовский, В.С. Имшенник, В.П. Смирнов

Представлен критический анализ экспериментальных и теоретических работ по кавитационному возбуждению термоядерных реакций в пузырьках. Показано, что опытные данные внутренне противоречивы. Выход гипотетических термоядерных нейтронов оказался завышенным по крайней мере на три порядка, и он не может быть согласован с наблюдаемой наработкой трития. Простая оценка показала, что любые энергетические системы, основанные на обсуждаемом принципе, нереальны.

PACS numbers: 28.90.+i, 52.90.+z, 78.60.Mq

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201304k.0445

Содержание

1. Введение (445).
 2. Анализ экспериментов по пузырьковому синтезу (446).
 3. О принципиальной достижимости пузырькового синтеза (447).
 4. Заключение (448).
- Список литературы (448).

1. Введение

История исследований по управляемому термоядерному синтезу (УТС) в Советском Союзе насчитывает более 60 лет. Несколько ранее такие исследования были начаты и в ряде других стран. После исторического выступления И.В. Курчатова в Англии¹ были сняты ограничения секретности на принцип термоизоляции и удержания высокотемпературной плазмы магнитным полем. Спустя примерно ещё 20 лет началось довольно широкое обсуждение подходов к инициированию взрывов термоядерной микромишени (инерционное удержание), имею-

¹ Во время поездки в 1956 г. в составе правительственной делегации в Англию И.В. Курчатов посетил Харуэльскую лабораторию — британский атомный центр — и выступил там с лекцией о проводимых в СССР работах по термоядерному синтезу. (Примеч. ред.)

А.А. Говердовский. Государственный научный центр РФ "Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского", пл. Бондаренко 1, 249033 Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация
E-mail: gaa@ipre.ru

В.С. Имшенник. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл. 4, 125047 Москва, Российская Федерация
E-mail: imshenik@itep.ru

В.П. Смирнов. Объединённый институт высоких температур РАН, ул. Ижорская 13/2, 125412 Москва, Российская Федерация
E-mail: vpsmirnov@rosatom.ru

Статья поступила 14 февраля 2013 г.

щей много общих физических черт с боевыми зарядами. В дальнейшем термоядерные исследования развивались при обширном международном обмене результатами и идеями. К работе были привлечены блестящие учёные ведущих стран, создана физика высокотемпературной плазмы, сделан вклад во многие сопредельные разделы физики. Необходимость достижения температур в несколько десятков миллионов градусов и более дала мощный толчок к появлению новых средств диагностики и новых материалов, новых технологий. Экономический эффект, полученный от внедрения этих технологий и знаний в практическую жизнь, превзошёл размер инвестиций в исследования УТС.

Но, несмотря на все успехи в физике и технологии обращения с высокотемпературной плазмой, главная задача — создание термоядерного реактора — до сих пор остаётся нерешённой. Относительно недавно было развёрнуто строительство Международного термоядерного экспериментального токамака-реактора ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor — ITER). Ожидается, что только в начале 2030-х годов на ИТЭР будет надёжно осуществлена физическая демонстрация энергетически выгодной реакции. На следующем этапе должен быть сооружён демонстрационный реактор ДЭМО (DEMOstration Power Plant — DEMO), предваряющий переход к строительству промышленных реакторов. Таким образом, при успехах ИТЭР и ДЭМО промышленное освоение термоядерной энергетики может начаться не ранее второй половины этого столетия. Столь длительный срок ожидания не может не разочаровывать общество и провоцирует вопросы о правильности выбранного пути к термояду. Проявлением этого разочарования, в частности, является большой поток предложений малообразованных изобретателей, утверждающих, что нашли простое решение проблемы термоядерного синтеза. Ведущим термоядерщикам приходится тратить немало времени, составляя ответы на эти предложения, поступающие к ним на отзыв, как правило, через властные структуры.

Однако бывают случаи, когда всемирно признанные учёные и даже целые научные коллективы, работающие, как правило, в других областях науки, выдвигают оригинальные и интересные идеи решения проблемы УТС. Рассмотрение этих предложений требует особенно тщательного анализа, поскольку нельзя исключать появления новых перспективных подходов к созданию термоядерных реакторов. Одним из таких предложений является "ультразвуковой термоядерный синтез", или, как его обычно называют, пузырьковый синтез.

Теоретическое рассмотрение кавитации пузырьков в жидкости восходит ещё к временам Рэлея. Надежды на получение высоких температур и плотностей при сферическом симметричном схлопывании пузырька подкреплялись наблюдением сонолюминесценции — явления возникновения света в жидкости, при котором регистрировались вспышки излучения длительностью до нескольких десятков пикосекунд. В ряде работ, выполненных в 1960–1970 гг., теоретически рассматривалась возможность достижения высоких температур в момент имплозии пузырька. Установление предельных параметров сопряжено с оценкой таких факторов, как диссипация через электронную теплопроводность, излучение и влияние несимметрии формы пузырька. Отклонение от идеально симметричного сжатия может проявляться при схлопывании в результате как взаимного влияния пузырьков друг на друга при их множественном возникновении, так и развития неустойчивостей. При анализе формирования пузырька на стадии зарождения также не исключено развитие неустойчивостей и уширение размера зоны перехода жидкость–пар, что повлияет на предельно достижимые параметры плазмы в момент максимального сжатия. Количество паров в пузырьке, зарядовый состав паров для понижения лучистых потерь при сжатии также представляются трудно контролируемые параметрами. В прямых экспериментах по излучению из одиночного пузырька регистрировались низкие температуры, порядка нескольких электрон-вольт, уменьшавшиеся на порядок при многопузырьковой кавитации. Поэтому пузырьковое направление в термоядерных исследованиях считалось неперспективным.

2. Анализ экспериментов по пузырьковому синтезу

К теме пузырькового синтеза научное сообщество вернулось после публикации статьи [1], вызвавшей интенсивную дискуссию. Особо было отмечено, что эксперименты были выполнены в Окриджской национальной лаборатории (Oak Ridge National Laboratory) США, известной своей высокой репутацией. Оказалось, что при одновременном воздействии на макрообразец дейтерированного ацетона C_3D_6O (0,6 л) при температуре $0^\circ C$ нейтронами (14 МэВ) и ультразвуком наблюдаются, по утверждению авторов [1], нейтроны с энергией 2,5 МэВ и значительное количество трития, что является индикатором D–D-синтеза в равновероятных процессах $D(d, n)^3He$ и $D(d, p)^3H$ соответственно. В случае облучения контрольного образца — обычного ацетона C_3H_6O — эффект не наблюдался. Нейтроны регистрировались широко распространённым жидким сцинтиллятором NE213 небольшого размера (50×50 мм). Детектор располагался в непосредственной близости от поверхности

кюветы и на расстоянии 15 см от головки нейтронного генератора (НГ) с интенсивностью $\Phi_0 = 5 \times 10^5$ нейтронов в секунду (н/с). Тем самым создавались условия увеличения геометрической эффективности регистрации искомых нейтронов относительно интенсивного фона НГ за счёт существенной разницы в телесных углах. Величина эффекта, которая определялась как разность больших чисел, составила около $\delta = 2\%$ общего числа нейтронов, зарегистрированных детектором.

Оценка интенсивности гипотетического D–D-источника, сделанная авторами [1], дала удивительно высокое значение: $\Phi_{DD} = 10^5$ н/с, а в более поздних работах даже 4×10^5 н/с [2, 3]. Такие уровни нейтронных выходов в холодном ацетоне вполне согласуются со скоростью наработки трития, эквивалентной интенсивности нейтронного поля 5×10^5 н/с [1, 3]. Приведённые числа крайне важны. Действительно, в условиях принятой в [1–3] геометрии поток нейтронов НГ на поверхности кюветы не превышал $\Phi_1 = 10^4$ н/с. Отсюда следует, что в дейтерированном ацетоне, подверженном акустическому воздействию, поток нейтронов увеличивается с коэффициентом $K = \Phi_{DD}/\Phi_1 = 10$ (!). Увеличение объёма среды должно увеличить коэффициент K , а значит, и энерговыделение со всеми вытекающими последствиями. Однако вновь обратимся к числам. Если принять верным авторское значение $\Phi_{DD} = 10^5$ н/с [1], которое соответствует лишь двум процентам общего числа нейтронов, зарегистрированных детектором, то интенсивность фоновой источника нейтронов — в основном прямых от НГ и рассеянных на водородсодержащей кювете — должна составить $\Phi_2 \sim \Phi_{DD}[\varepsilon/(1-\delta)]$. Здесь $\varepsilon \sim 10$ — отношение геометрических эффективностей регистрации нейтронов синтеза и нейтронов НГ. Итоговое значение $\Phi_2 = 5 \times 10^7$ н/с на два порядка превышает полное возможное число нейтронов в системе. Столь абсурдный результат связан с явным занижением авторами "открытия" [1–3] уровня собственной эффективности регистрации нейтронов детектором NE213. Авторы [1–3] получили значение эффективности регистрации всего около 0,1 %, что сильно отличается от реалистичной величины порядка 10 % (см. обзор [4]).

С тем же заниженным значением эффективности авторами [1–3] анализируются результаты [5], полученные независимой командой из Окриджа, созданной по решению руководства лаборатории для проверки результатов [1]. Контрольные эксперименты этой группы не обнаружили никаких D–D-нейтронов в постановке, аналогичной таковой в [1]. Однако в интерпретации авторов [3], основой которой является "притягивание" к чужому детектору собственной оценки "нужной" эффективности регистрации, окриджские результаты блестяще подтверждают существование интенсивного нейтронного излучения реакций синтеза.

В связи с этим отдельно надо отметить работу [6], формально, на словах, подтверждающую данные [1], однако дающую больше оснований для скепсиса по поводу существования явления в принципе, чем оптимизма или доверия. В работе [6] аккуратно приведены как первичные, так и разностные амплитудные спектры с детектора NE213, показывающие в низкоэнергетической области (ниже 2,5 МэВ (см. рис. 5 статьи [6])) отчётливые разнонаправленные флуктуации с соизмеримой амплитудой. Такое явление вполне характерно для плохо стабилизированного электронного тракта детектора,

особенно в экспоненциальной области спектра. Исходя из этого следует отнести результаты [6], так же как и [5], к разряду опровержений результатов [1–3].

Устранение ошибки в определении эффективности регистрации нейтронов даёт верхнюю границу разностного эффекта на уровне, требующем интенсивности источника гипотетических нейтронов лишь 10^3 н/с, что находится в явном противоречии с данными [1–3] по наработке трития (5×10^5 н/с). Надо отметить, что по данным [1] всё наблюдаемое возрастание активности "трита", регистрируемое штатной дозиметрической гамма-камерой, составляет лишь одну треть собственного фона прибора. Причём этот фон втрое различался в исследованиях облучённых проб дейтерированного и обычного ацетона. К сожалению, авторы [1] не проанализировали возможные причины возникновения трития в дейтерированном ацетоне, не связанные с синтезом D–D. А ведь они очевидны. Водородсодержащий макрообразец является замедлителем, что приводит к радиационному захвату медленных нейтронов ядрами дейтерия и образованию трития. Возможно, ультразвуковые колебания влияют на объёмное распределение трития или его соединений в кювете, создавая "обогащённые" зоны, из которых и отбирались пробы (1 см^3). Как следствие, возникает впечатление массовой генерации трития за счёт синтеза. Впрочем, подобных фантазий может быть немало, и все они до постановки внятного и профессионального эксперимента имеют право на жизнь.

Представленная выше совокупность критических замечаний не позволяет признать наблюдение реакций синтеза доказанным фактом. Более того, внутренние противоречия исследований [1–3] скорее опровергают существование кавитационного термояда, во всяком случае в постановке с внешним источником нейтронов. Принципиальная перспективность такой постановки может быть оценена на основе довольно простых соображений энергетического баланса. Самым энергоэффективным внешним нейтронным источником нереакторного и нетермоядерного типа является реакция расщепления (spallation) протонов высоких энергий на тяжёлых ядрах. Энергозатраты на 1 нейтрон составляют всего 50 МэВ (электрических) пучка. Для того чтобы вернуть в систему хотя бы эту энергию, необходимо получить за счёт реакций синтеза не менее 750 МэВ (тепловых), учитывая к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую (33 %) и к.п.д. трансформации электроэнергии в энергию пучка (20 %). Это означает, что на один нейтрон источника рабочая среда должна откликаться $M = 100$ нейтронами. На языке ядерных реакторов, эффективный коэффициент размножения нейтронов в среде должен составлять $K_{\text{eff}} \sim 0,99$. Для сравнения, условие энергетического паритета для электроядерной (ADS — Accelerator Driven System) технологии удовлетворяется уже при $K_{\text{eff}} \sim 0,9$. Для конкуренции гибридной системы на основе ускорителя с традиционными атомными реакторами или термоядерными аппаратами коэффициент усиления энергии должен превосходить 50–100. В этом случае умножение нейтронов в кавитационном реакторе должно достигать $M = 10^4$, а не $M = 0,1$, как можно с большими допущениями определить из данных обсуждаемых работ [1–3]. Проблема поиска пяти порядков не выглядит решаемой.

3. О принципиальной достижимости пузырькового синтеза

Перейдём теперь от анализа эксперимента к обсуждению принципиальной достижимости термоядерных параметров плазмы пара при схлопывании пузырька. Если даже основные надежды сторонники пузырькового термоядерного синтеза возлагают на кумулятивные процессы при схлопывании пузырьков в некоторой жидкости, то имеет смысл привести нижеследующую оценку для кумуляции ударных волн (УВ), возникновение которых вполне возможно в процессе схлопывания. Допустим, что пузырьки при их множественном рождении располагаются друг от друга достаточно далеко для того, чтобы не возникало искажение сферической симметрии. Также предположим, что неоднородные неустойчивости гидродинамического процесса схлопывания могут быть подавлены. Рассмотрим сферически-симметричную кумуляцию сходящейся ударной волны. В данном рассмотрении, во-первых, имеет место автомодельное решение [7–9], а во-вторых, это решение реализуется в достаточно малой окрестности центра симметрии при произвольном начальном толчке. Итак, в частности, температура за фронтом УВ зависит от радиуса фронта r_f , согласно автомодельному решению

$$T_f \sim r_f^{2(1-k)} = r_f^{-0,911} \quad (1)$$

для простейшего уравнения состояния с показателем адиабаты $\gamma = 5/3$. Здесь $k = 1,453$ — показатель автомодельности ($r_f^k \sim -t$, где t — время, отсчитываемое от момента кумуляции УВ). Соотношение (1) определяет, можно сказать, темп кумуляции и даёт возможность сразу найти значение радиуса фронта УВ, у которого температура достигает характерных значений (T_f^{TF}) термоядерного синтеза (TF — Thermonuclear Fusion). Конечно, мы должны в такой оценке задать исходные значения температуры T_0 и радиуса r_0 в начальных условиях применимости автомодельного решения. Грубо говоря, T_0 и r_0 должны быть одного порядка с такими величинами на поверхности пузырьков. Примем значения $T_0 = 300 \text{ К}$, а $r_0 = 1 \text{ см}$ в соотношении, следующем из (1):

$$\frac{r_f^{\text{TF}}}{r_0} = \left(\frac{T_0}{T_f^{\text{TF}}} \right)^{1,098}, \quad (2)$$

где $T_f^{\text{TF}} = 3 \times 10^6 \text{ К}$. Подставляя в (2) три указанных значения, получим $r_f^{\text{TF}} = 0,4055 \text{ мкм}$, т.е. очень малую величину, порядка 1 мкм. Эта крошечная сфера, согласно решению (1), будет содержать очень мало частиц (10^7) с энергией не менее 0,3 кэВ и иметь ничтожную полную энергию (10^{-9} Дж), если начальную концентрацию водяного пара в пузырьке задать в 10^2 раз меньшей концентрации молекул воды.

Далее приходится сделать вывод и о невозможности сохранять автомодельный режим кумуляции УВ с изменением её радиуса более чем в 10^4 раз. В самом деле, предел этого режима связан с диссипативными процессами в плазме за ударным фронтом [10]. Гидродинамическое решение с учётом диссипативных процессов было весьма детально рассмотрено в указанной работе на основе численных расчётов с учётом диссипативных процессов (ионной вязкости, электронной и ионной

теплопроводностей, а также с отрывом температур электронов и ионов) (см. также литературу, цитируемую в [10]). Таким образом, процесс кумуляции фактически разбивался на три этапа: этап начального "толчка", этап автомоделного режима и этап диссипативного "обрезания" неограниченной кумуляции. В данной статье мы не считали необходимой (хотя и возможной) численную реализацию всех трёх этапов, но сделаем решительный вывод о наступлении третьего этапа при намного большем значении радиуса УВ: $r_f^{DP} \gg r_f^{TF} \approx 1$ мкм — со всеми вытекающими следствиями, свидетельствующими о невозможности достижения термоядерных параметров плазмы.

Отметим, тем не менее, следующее обстоятельство. На физическом уровне строгости в работе [10] показано отсутствие неограниченной кумуляции автомоделного процесса. Но математически строго доказана только ограниченность радиальной производной для электронной температуры, хотя численное решение продемонстрировало ограниченность всех других радиальных производных (термодинамических и гидродинамических величин), в том числе, заметим, и на последнем, четвёртом, этапе — этапе отражения ударного фронта от центра симметрии. Возвращаясь к полной постановке задачи, снова специально подчеркнём реальную роль в ограничении кумулятивного процесса в схлопывании пузырьков неоднородных неустойчивостей сферически-симметричного процесса [11].

4. Заключение

Проведённый выше анализ экспериментальных данных и поддерживающих его расчётов схлопывания пузырька,

приведённых в [1], свидетельствует о бесперспективности надежд на энергетические применения пузырькового термояда. Можно приводить ещё много соображений о низкой плотности энергосвечения, об отступлении от симметрии схлопывания, составе пара и т.д., но это будут вторичные факторы, только усиливающие главный вывод. Однако если отвлечься от рассуждений о пузырьковой энергетике и сосредоточиться на физике схлопывания пузырька, то следует признать, что мы имеем дело с интересным объектом, достойным исследований сложных процессов при схлопывании отдельного пузырька.

Список литературы

1. Taleyarkhan R P et al. *Science* **295** 1868 (2002)
2. Taleyarkhan R P et al. *Phys. Rev. E* **69** 036109 (2004)
3. Nigmatulin R I et al. *J. Power Energy* **218** 345 (2004)
4. Klein H, Brooks F D *PoS (FNDA2006)* 097 (2006)
5. Shapira D, Saltmarsh M *Phys. Rev. Lett.* **89** 104302 (2002)
6. Xu Y, Butt A *Nucl. Eng. Design* **235** 1317 (2005)
7. Guderley G *Luftfahrtforschung* **19** 302 (1942)
8. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Физматгиз, 1963) [Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (New York: Academic Press, 1966 – 1967)]
9. Брушлинский К В, Каждан Я М *УМН* **18** (2) 3 (1963) [Brushlinskii K V, Kazhdan Ja M *Russ. Math. Surv.* **18** (2) 1 (1963)]
10. Имшенник В С *ПМТФ* (6) 10 (1980) [Imshennik V S *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **21** 748 (1980)]
11. Забабахин Е И *Письма в ЖЭТФ* **30** 97 (1979) [Zababakhin E I *JETP Lett.* **30** 87 (1979)]

On prospects for bubble cavitation induced fusion

A.A. Goverdovskii

State Scientific Centre of the Russian Federation "A.I. Leypunskii Institute for Physics and Power Engineering",
pl. Bondarenko 1, 249033 Obninsk, Kaluga region, Russian Federation
E-mail: gaa@ippe.ru

V.S. Imshennik

M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences,
Miusskaya pl. 4, 125047 Moscow, Russian Federation
E-mail: imshenik@itep.ru

V.P. Smirnov

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
ul. Izhorskaya 13/2, 125412 Moscow, Russian Federation
E-mail: vpsmirnov@rosatom.ru

Experimental and theoretical work on cavitation-induced fusion reactions in bubbles is critically analyzed. It is shown that the existing data are internally inconsistent. The yield of hypothetical thermonuclear neutrons is found to be at least three orders of magnitude overestimated and thus inconsistent with the tritium yield observed. A simple estimate shows the infeasibility of any power system using the principle discussed.

PACS numbers: **28.90.+i**, **52.90.+z**, **78.60.Mq**

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201304k.0445

Bibliography — 11 references

Received 14 February 2013

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **183** (4) 445–448 (2013)

Physics – Uspekhi **56** (4) (2013)