

$$\hat{H} = -\frac{8\pi}{3}(\bar{\mu}_1\bar{\mu}_2)\delta(R) + \left(\frac{[\bar{p}_1 \times \bar{p}_2]}{R} \cdot [\bar{\mu}_1 \times \bar{\mu}_2]\right) + \frac{(\bar{\mu}_1\bar{\mu}_2)}{R^3} - \frac{3(\bar{\mu}_1\bar{R})(\bar{R}\bar{\mu}_2)}{R^5}.$$

### Заключение

Предложено объяснение природы векторного обменного взаимодействия между двумя спинами. Приведено аналитическое выражение для оператора такого обмена  $\hat{G}$ . Это дает возможность оценить из экспериментальных спектров ЭПР величину и направление константы векторного обмена  $G$ .

### Литература

1. *Dobryakov S. N.*//Bioactive Spin Labels. R. I. Zhdanov (Ed). — Berlin-Heidelberg: Springer Verlag. 1992. P. 215.
2. *Добряков С. Н., Маматкулова А. К., Барабанова Н. Н.*//Хим. физика. 1997. Т. 16. № 5. С. 76.
3. *Rakhimov R. R., Turney V. J., Jones D. E., Dobryakov S. N., Borisov Yu. A., Prokofev A. I., Aleksandrov A. I.*//J. Chem. Phys. 2003. V. 118. P. 6017.
4. *Dobryakov S. N., Privezentsev V. V.*//Abstr. Intern. Congr. Mathem. — Madrid.: EMS. 2006. P. 140.
5. *Bencini A. and Gatteschi D.* Electron Paramagnetic Resonance in Exchange Coupled System. — Berlin-Heidelberg.: Springer Verlag. 1990. P. 21.
6. *Боровик-Романов А. С.* Антиферромагнетизм//В кн. Антиферромагнетизм и ферриты: Итоги науки. — М.: АН СССР. 1962. № 4. С. 7.
7. *Дзялошинский И. Е.*//ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 1547.
8. *Moriya T.*//Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 91.
9. *Абрагам А.* Ядерный магнетизм. — М.: ИЛ. 1962. С. 166.
10. *Сликтер Ч.* Основы теории магнитного резонанса. — М.: Мир, 1981.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2007 г.

## To a question on the nature of a vector exchange interaction in two-spin system

*S. N. Dobryakov*

Semenov Institute of Chemical Physics Russian Academy of Science, Moscow, Russia

*V. V. Privezentsev*

Institute of Physics and Technology Russian Academy of Science, Moscow, Russia

*In the present work the explanation of the vector exchange nature is offered. Also analytical expression for a such exchange operator is resulted. It enables to estimate a size and direction of a vector exchange constant from experimental ESR spectra.*

УДК 53.01

## Сонолюминесценция и Sono-Fusion

*О. Б. Хаврошкин*

Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*В. П. Быстров*

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*Сонолюминесценция (СЛ), обоснованность поиска которой следовала из уравнений Релея, после экспериментов Френцеля и Шультеса до сих пор — эффект сложный и отчасти не лишенный таинственности. В определенных условиях проведения эксперимента был обнаружен коротковолновый рентгеновский участок СЛ. На основе этих экспериментов в 1973 г. была предложена термоядерная модель СЛ, а в 1990 г. при кавитации тяжелой воды на дейтерированных титановых зародышах наблюдался выход нейтронов.*

К концу 30-х годов прошлого века различные разделы естествознания пополнились работами, далеко отстоящими друг от друга по масштабам новизны и значимости, а главное, — трудно было судить как об их даже косвенных взаимосвязях, так и об определенных аналогиях.

Точное и простое решение уравнения Рэлея, описывающего динамику кавитационной полости, положило начало многочисленным моделям кавитации при исследовании заключительной стадии — "аннигиляции" кавитационного пузырька. Эксперименты Френцеля и Шультеца, Маринеско и Трилата по интенсивному ультразвуковому (УЗ) воздействию (облучению) чистой, но не обезгаженной воды обнаружили свечение или СЛ зоны кавитации. В это же время Фридман предложил модель нестационарной вселенной, что приводило к понятию космологической сингулярности, а Оппенгеймер и Волков рассмотрели физическую сингулярность или коллапс звезды под действием сил тяжести (гравитации). В 1938—1939 гг. Х. Бете и др. определили термоядерные реакции как основной источник энергии звезд. Насколько тесно объединятся в термоядерной модели (СЛ) математическая и физическая сингулярности, импульсный запуск термоядерных реакций, сложные процессы в схлопывающейся кавитационной полости и кавитирующий объем жидкости как открытая система, покажут последующие эксперименты, однако их логическое сближение уже не лишено эстетической привлекательности.

Возможность термоядерных реакций или Sono Fusion (SF) и попытки создать термоядерную модель сонолюминесценции (ТМ СЛ) почти причудливым образом связали в экспериментах текущего дня прошлое и настоящее физического сообщества как такового [1—32]. Поэтому вначале необходим краткий ретроспективный анализ изучения УЗ-кавитации (УЗК) как части современной физики.

### **Первоначальный этап изучения СЛ: экспериментально информативен, ограничен в теоретических моделях**

Этапы излучения СЛ протекали в следующей временной последовательности.

Открытие сонолюминесценции: эксперименты [19]; работы с фотопленкой и оптическими приемниками [24]. Общезначимые исследования, на основе которых при совместном анализе с работами [19, 23, 24] создание ТМ СЛ было бы возможно: космологическая работа [20]; гидродинамическая "сингулярность" [21]; космологические объекты [26]; ядерные реакции по [14].

Совместное рассмотрение работ [14—21, 23, 24, 26] через модель ТМ СЛ сильно повлияло бы на пути развития ядерной физики.

### **Развитие исследований по УЗК: от традиционных до поисковых (1940—1970 гг.)**

Назовем исследования принципиального характера: получение рекордных по интенсивности УЗ-полей (Розенберг, Сиротюк) [8]; обнаружение ультрафиолетовой части спектра СЛ (Прюдомм и Бюссо) [27]; фотографирование ударных волн при УЗК (Майер) [25]; космофизическая модель кавитационного зародыша (Бриггс) [15]; разработка многочисленных моделей СЛ, обзор Флинна по физике кавитации [12]; а также отсутствие попыток предложить ТМ СЛ, появление первых токмаков, щедрое финансирование.

### **СЛ как объект прикладных и фундаментальных исследований (1970—2000 гг.)**

Наметился поворот к ТМ СЛ, чему способствовали новые задачи физики. Было предположено, что спектр СЛ содержит и вторичное излучение из-за действия первичного рентгеновского, возникающего в момент аннигиляции кавитационного пузырька [9]. Для простейшей экспериментальной проверки использовались стандартные УЗ-источники с концентраторами колебаний и без (частота 18,5 кГц, интенсивность УЗ-поля до 1 Вт/см<sup>3</sup>); объемы воды или солевого раствора от 10<sup>3</sup> до 10<sup>6</sup> см<sup>3</sup>; температура воды 23—64 °С; специальная фотопленка РФ-3, 1100 ед. ГОСТ; герметичная алюминиевая цилиндрическая кассета со свинцовым или медным экраном и со щелевыми прорезями. Время экспозиции  $t = 10—60$  мин; кассета помещалась в центре зоны кавитации или на периферии [5, 9].

Проведенные разнообразные эксперименты дали материал различного качества, некоторые пленки нельзя признать кондиционными, но в большинстве случаев происходила засветка участка пленки, расположенного против щелевой прорези в экране (рис. 1). Помимо бесспорного факта регистрации рентгеновского излучения, заслуживает внимания и другое — эффективность экранов из меди и свинца была одного порядка. Это позволило сделать вывод, что ориентировочно длина

волны излучения  $\lambda \sim \overset{\circ}{\text{A}}$ , следовательно, в соответствии с термической моделью СЛ и законом смещения Вина температура в центре схлопывающегося пузырька  $T_{\max} \sim 10^6—10^7$  К и максимальное давление  $P_{\max} \sim 10^6—10^8$  атм.

Рентгеновское излучение при кавитации (независимо от [13, 14]) было зарегистрировано в работе [1].

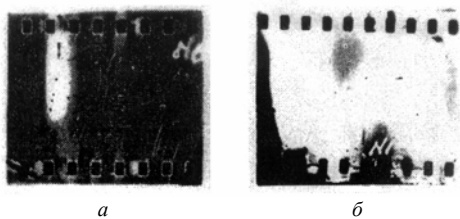


Рис. 1. Образцы пленки РФ-3:

*a* — после воздействия УЗК, с полосой засветки от рентгеновского излучения (на позитиве полоса — белая). Кавитирующая жидкость — вода;  $t_{beg} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{end} = 46\text{ }^\circ\text{C}$ ; длительность экспонирования 10 мин; экран — медный; кассета помещалась в центральную часть кавитационной области; *b* — пример некондиционного образца

Термическая модель рентгеновского излучения кавитационными пузырьками,  $P$ ,  $T$ , параметры стадии схлопывания при длительности последней  $\tau \sim 10^{-6}$  с позволили определить критерий Лоусона ( $L$ ) о возможности запуска термоядерной реакции  $L = nt$  (где  $n$  — число частиц на  $1\text{ см}^3$ ) как  $10^{16} > 10^{14}$  [13, 16]. Это при  $T \sim 10^7\text{ K}$  в плазме из дейтронов позволило ожидать запуск реакции синтеза. Поскольку в обычной воде содержание тяжелой  $\sim 10^{-4}$ , число пузырьков в кавитационной зоне  $\sim 10^3 - 10^5$ , то для очищенной воды локальные неоднородности из  $D_2O$  послужат кавитационными зародышами, и запуск термоядерных реакций станет возможным [10]. Так появилась термоядерная модель СЛ, упомянутая при анализе других моделей [13]. Предложенная ТМ СЛ не учитывала постоянно существующие в воде следы трития, природный и техногенный нейтронный фон, а также зародышей по Бриггсу.

Физичность сингулярности по Рэлею [21] далее была обоснована Е. И. Забабахиным в исследованиях по неограниченной кумуляции [3, 4]; кумуляция энергии в пузырьке может происходить вплоть до молекулярных размеров.

Аномально высокое поглощение дейтронов некоторыми металлами и интерметаллидами, выход нейтронов при механических и других воздейст-

виях на дейтериды металлов [17], дискуссии о физических механизмах этих эффектов [13] позволили модифицировать эксперимент [5, 9, 10].

Кавитация велась в тяжелой воде с концентратом колебаний из титана, а также в суспензии из частиц  $LaNi_5D_x$ , которые заменили кавитационные зародыши из  $D_2O$  [9]; вместо рентгеновской пленки применялся детектор нейтронов [6, 7] (рис. 2). Эффективность детектора составила  $1,5 \pm 0,5\%$ .

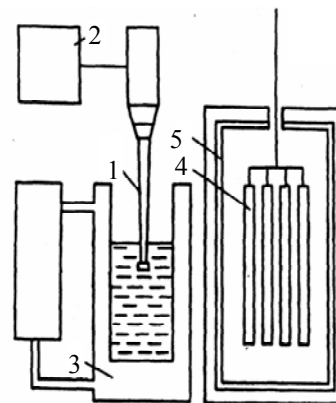


Рис. 2. Блок-схема установки для кавитации с регистрацией нейтронов:

1 — вибратор; 2 — УЗ-регистратор; 3 — термостат; 4 — детектор нейтронов; 5 — бак с маслом

В этом эксперименте необходимо было учитывать нейтронный выход, порождаемый как кавитацией, так и процессом дейтерирования и деструкции твердого тела (титановый волновод). Первоначально процесс взаимодействия дейтронов с титановым волноводом считался превалирующим. Однако приповерхностная дейтерированная часть твердого тела содержит микрополости, которые в интенсивном кавитационном поле могут быть аналогами кавитационных пузырьков. Разумеется, это предположение не исключает поиска механизмов туннелирования при термоядерных реакциях в твердом теле. Основные результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность эмиссии нейтронов при кавитационном воздействии

Параметр эмиссии	Ti + D <sub>2</sub> O		LaNi <sub>5</sub> + D <sub>2</sub> O		LaNi <sub>5</sub> D <sub>x</sub> + D <sub>2</sub> O	
	Кавитация	Пост-эффект	Кавитация	Пост-эффект	Кавитация	Пост-эффект
Без пассивной защиты (фон $n_c = 0,04$ н/с)						
$\underline{N}$ , н/с	0,050	0,043	0,042	0,051	0,051	0,043
$n_D$ , н/с	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
$\bar{N}$ , н/с	0,90	0,40	0,20	1,10	1,16	0,30
$L$ , $\sigma$	4	2	1	5	5	1,5
С пассивной защитой (фон $n_c = 0,01$ н/с)						
$\underline{N}$ , н/с	0,021	0,012	0,013	0,022	0,025	0,011
$n_D$ , н/с	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$\bar{N}$ , н/с	1,1	0,2	0,3	1,2	1,5	0,1
$L$ , $\sigma$	9	2	3	10	12	1

П р и м е ч а н и е:  $n_D$  — чувствительность детектора к нейтронам величиной в два стандартных отклонения ( $2\sigma$ ) выше уровня фона, измеренного за большие промежутки времени,  $n_D = 2(N_b/E^2\tau)^{1/2}$ , где  $N_b$  — уровень фона;  $E$  — эффективность детектора нейтронов;  $\tau$  — время экспозиции;  $L$  — превышение над естественным фоном.  $L = (N - N_b)/(N_b/\tau)^{1/2}$ , где  $N$  — значение эффекта, усредненное по суммарному времени регистрации (экспозиции)  $\tau$ ;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение от уровня фона.

Максимальное превышение сигнала от нейтронного датчика над уровнем фона ( $12\sigma$ ) зарегистрировано при кавитации в суспензии  $\text{LaNi}_5\text{D}_x$ , что подтверждает перспективность ТМ СЛ. Пост-эффекты на титановом волноводе могут быть объяснены по Цареву [17], а в момент кавитации — ударным сжатием микрополостей с  $\text{D}_2$  в приповерхностных структурах волновода, т. е. своего рода твердотельной кавитацией.

Примечателен и другой факт: сопоставление серий экспериментов только с  $\text{D}_2\text{O}$  и с суспензией порошка указывает на резкое падение выхода нейтронов и рост пост-эффекта во втором случае. Вероятно, падение уровня эмиссии нейтронов при кавитации обусловлено первоначальным процессом дейтерирования порошка, а рост эмиссии при пост-эффекте — релаксацией напряжений в зернах с реализацией механизма [13] или из-за эффекта туннелирования.

Однако данные работ [1, 3—7, 9, 10] не привлекли должного внимания международной научной общественности, и исследования по СЛ обогатились новым почти красочным объектом.

#### **Одиночный кавитационный пузырек Крама (КПК) и ТМ СЛ; Sono-Fusion (SF)**

Эксперименты Крама [16] и теоретический анализ Швингера [28] положили начало многочисленным исследованиям и обозначили два менее заметных, но важных момента. То, что в 30-х годах не имело никаких точек соприкосновения, в 90-х годах незаметно слилось без всяких сенсаций: астрофизические процессы, сингулярность, термоядерные реакции почти буквально "высвечивались" из ядра одиночного пульсирующего кавитационного пузырька. И второй чисто технический момент: СЛ, оставаясь предметом академических исследований, послужила основой Sono Fusion, реального, но "не замечаемого" конкурента токамачного ряда. SF относится к столь современному и стремительно развивающемуся направлению, что можно дать ссылки в новом стиле: [http://www.hooked.net/~r\\_george/sonofusion.html](http://www.hooked.net/~r_george/sonofusion.html). Из этих ссылок можно узнать о применении в исследованиях УЗК широкого класса диагностических приборов, в том числе и для анализа рентгеновского излучения.

Анализ исследований КПК и SF — предмет объемных монографий, поэтому отметим лишь некоторые особенности. Если в работах по SF существование ТМ СЛ даже не обсуждается из-за очевидности, в том числе и для случая многопузырьковой кавитации, то нам, по крайней мере, неизвестны публикации, где для КПК рассматривалась бы ТМ СЛ, т. е. существование в обычной воде кавитационных зародышей с  $\text{D}_2\text{O}$  и тем более

из смеси  $(\text{D}_2\text{O})_n$  и  $(\text{T}_2\text{O})_m$  исключается. Не принимаются в расчет и другие внешние факторы, кавитирующий объем в УЗ-поле считается консервативной, а не открытой системой.

Важны особенности экспериментов с КПК. Фаза формирования КПК: ансамбль пульсирующих пузырьков фокальной зоны притягивает другие синфазно пульсирующие пузырьки и в конечном счете как результат общей коагуляции образуется КПК (все это требует определенного подбора параметров УЗ-поля, жидкости, газосодержания определенных газов и т. п.). Большинство пузырьков, образовавших КПК, возникло на кавитационных зародышах — структурных неоднородностях с повышенным содержанием дейтерия, а некоторые — с содержанием и дейтерия-трития. Далее сформировавшийся КПК перерабатывает дейтерий-третиевую компоненту воды, новые порции которой поступают за счет акустических течений. Вероятно, добавки  $^4\text{He}$  с  $10^{-7}$ — $10^{-8}$  и  $^3\text{He}$  улучшают "вымывание" и доставку  $\text{D}_2\text{O}$  к КПК, а  $^3\text{He}$  через реакцию  $d + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + p$  поддерживает КПК.

Другие особенности СЛ КПК также соответствуют ТМ СЛ. Например, моменты излучения при минимальном радиусе пузырька и мощные ударные волны; исключительно малая длительность СЛ вспышки (если для более "четкой" регистрации повышают концентрацию газа, то это приводит к ложному увеличению длительности); максимальные температуры — свыше  $10^6$  К; длительное, но конечное время существования режима КПК ограничивается исчерпанием природных  $d$ ,  $t$  в жидкости. С другой стороны, трудно ожидать регистрацию достоверного выхода нейтронов при КПК, так как по своей природе этот объект не даст заметного превышения излучения над уровнем фона лаборатории ( $\geq 6$ — $7\sigma$ ).

Отметим также, что отсутствие у теоретиков информации об экспериментальных особенностях КПК (жидкость как открытая система с природными  $d$ ,  $t$ ) привело к разработке экзотических моделей [18], что в конечном счете из-за разрушения психологического барьера способствовало поддержке ТМ СЛ и SF. Появились и более взвешенные обзоры [22]. В любом случае КПК должен занять место 2-й "электродной машины" в учебном физическом кабинете.

Возникает вопрос о месте ТМ СЛ для УЗ-кавитации в целом. Вероятно, когда многочисленные наблюдательные данные и теоретические модели по СЛ явно недостаточны, имеет случай доминирования в кавитационном процессе ТМ СЛ. Для множества других кавитационных процессов — гидродинамических, испарительно-паровых, капельных и т. п. ТМ СЛ не может играть заметной роли.

Учитывая существование многочисленных и глубоко проработанных моделей кавитации, вопрос о механизме СЛ вне рамок ТМ СЛ будет успешно решен. Возможно, хорошей жидкостью для подобного поиска станет вода после того, как процесс КПК через несколько часов прекратится, и запасы природных  $d$  и  $t$  будут истощены.

**Некоторые принципиальные направления и схемы технической реализации термоядерных реакций на основе моделей ТМ СЛ и аналогов многопузырьковой кавитации, КПК, SF**

*Термоядерные реакции на основе кавитирующего объема жидкостей, расплавов, эмульсий и взвесей*

ТМ СЛ, как и большинство публикаций по УЗ-кавитации за последние 10 лет, включая новейшие, требуют, помимо осмысления накопленного материала, рассмотреть переход к новому этапу исследований — от экспериментального, демонстративного подтверждения ТМ СЛ, к поиску систем лабораторных масштабов как прообразу тех-

нически действующих макетов термоядерных реакторов.

Введем понятие рабочего вещества или, как это принято в теплотехнике, рабочего тела — носителя дейтерия как наиболее доступного, дешевого и перспективного компонента термоядерных реакций, а также способного быть средой для многопузырьковой кавитации с параметрами плазмы в ядре схлопывающейся кавитационной полости, отвечающей критерию Лоусона. УЗ-исследования и СЛ при кавитации обычной воды с некоторыми зародышами пузырьков на основе  $D_2O$ , а затем и эксперименты с тяжелой водой с достоверным выходом нейтронов сделали  $D_2O$  исторически первым, но, вероятно, не лучшим вариантом рабочего тела. В отличие от тяжелой воды перспективное рабочее тело должно иметь высокую температуру кипения при низкой температуре плавления, малую упругость паров, хорошо растворять и/или содержать значительный процент дейтерия, иметь высокую плотность при незначительной вязкости, быть неагрессивной и нетоксичной средой. Помимо  $D_2$  желательно, чтобы рабочее тело содержало или было химически совместимо с другими возможными компонентами термоядерных реакций (табл. 2) [11].

Таблица 2

Экзоэнергетические реакции между легкими ядрами

№	Реакция	Энерговыделение, МэВ	$\sigma_{max}$ , барн (в области энергий $\leq 1$ МэВ)	Энергия налетающей частицы, соответствующая $\sigma_{max}$ , МэВ
1	$p + p = d + e^+ + g$	2,2	$10^{-23}$	—
2	$P + d = {}^3He + g$	5,5	$10^{-6}$	—
3	$P + t = {}^4He + g$	19,7	$10^{-6}$	—
4	$d + d = t + p$	4,0	0,16 (при 2 МэВ)	2,0
5	$d + d = {}^3He + n$	3,3	0,09	1,0
6	$d + d = {}^3He + g$	24,0	—	—
7	$t + d = {}^4He + n$	17,6	5,0	0,13
8	$t + t = {}^4He + 2n$	17,6	5,0	0,195
9	$d + {}^3He = {}^4He + p$	11,3	0,1	1,0
10	${}^3He + {}^3He = {}^4He + p$	18,4	0,71	0,47
11	$n + {}^6Li = {}^4He + t$	12,8	—	—
12	$p + {}^6Li = {}^4He + {}^3He$	4,8	2,6	0,26
13	$p + {}^7Li = 2 {}^4He + g$	4,0	$10^{-4}$	0,3
14	$p + {}^6Li = {}^7Li + p$	17,3	$6 \cdot 10^{-3}$	0,44
15	$d + {}^6Li = {}^7Li + p$	5,0	0,01	1,0
16	$d + {}^6Li = 2 {}^4He$	22,4	0,026	0,60
17	$d + {}^7Li = 2 {}^4He + n$	15,0	$10^{-3}$	0,2
18	$d + {}^9Be = 2 {}^4He + d$	0,56	0,46	0,33
19	$d + {}^9Be = {}^6Li + {}^4He$	2,1	0,35	0,33
20	$d + {}^{11}Be = 3 {}^4He$	8,7	0,6	0,675
21	$d + {}^{15}N = {}^{12}C + {}^4He$	5,0	0,69 (при 1,2 МэВ)	1,2

Примечание:  $p$  — протон;  $d$  — дейтрон (ядро дейтерия  ${}^2H$ );  $t$  — тритон (ядро трития  ${}^3H$ );  $n$  — нейтрон;  $e^+$  — позитрон;  $\nu$  — нейтрино;  $g$  — фотон. Распределение энерговыделения между продуктами реакции обычно обратно пропорционально их массам.

Как следует из табл. 2, компонентами сплава, помимо основной "матрицы" и  $d$ , должны быть  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{15}\text{N}$ , а элементы  ${}^3\text{He}$ ,  $p$ ,  $n$ ,  $t$  появляются в кавитирующем расплаве при запуске термоядерных реакций. Таким образом, рабочее тело или сплав для термоядерных реакций (СТР) будет многокомпонентным, и даже в лучшем случае трудно ожидать его гомогенности и устойчивости. С другой стороны, можно использовать взвесь, эмульсию или суспензию из необходимых компонентов. Так, для поисковых экспериментов достаточно взять легкоплавкий сплав, например сплав Вуда, в качестве носителя дейтерия, а для кавитационных зародышей — дейтерированную титановую пыль; для повышения энергетического выхода — пыль из соединений свинец—литий ( $t_{sm} \sim 700$  °C). Кавитирующий на дейтерированных зародышах объем легкоплавкого расплава, образующий вместе с вышеуказанными пылевыми компонентами взвесь СТР, позволит начать изучение более реального прообраза термоядерного реактора кавитационного типа. Поскольку в общем случае для расплава упругость паров на порядок меньше, чем для  $\text{D}_2\text{O}$ , вязкость в расплавленном состоянии незначительна, плотность в 2—3 раза выше по сравнению с водой, а температура достигает сотен °C, то параметры в схлопывающемся пузырьке по сравнению с известными экспериментами составят по температуре  $10^7$ — $10^8$  К, а по давлению  $10^7$  атм. Вероятно, это позволит перейти к калориметрическим оценкам выхода термоядерной энергии. Тем самым будет завершён первый этап целенаправленного формирования облика будущего реактора. К его основным признакам следует отнести:

переход на искусственные дейтерированные кавитационные зародыши;

отказ от тяжелой воды и как от носителя дейтерия, и как кавитирующей среды;

переход на расплавы для термоядерных реакций и другие композиции, суспензии на их основе.

Вопрос о замене природного влияния космического внешнего фактора, например помещение в расплав источника нейтронов, требует отдельного рассмотрения. На первоначальном этапе такой источник сыграл положительную роль [31]. Несомненно, следующий этап потребует отказа от внешнего источника УЗ-поля, и начнется поиск расплава с самоподдерживающимися механизмами кавитации.

С этой точки зрения представляют интерес эксперименты на действующем конвертере по производству стали (емкость до 500 т). Как известно, на определенном этапе продувки расплава кислородом возникает режим интенсивной кавитации ("кипения") со следующими параметрами: плотность среды  $\sim 6$  г/см<sup>3</sup>; температура 2000 °C; внешнее (металлостатическое) давление  $\sim 15$ —30 атм. Это по-

зволяет ожидать в схлопывающихся пузырьках подъем температуры до  $10^8$  К. Ввод в зону кавитации  $\text{D}_2$ , а также порошкового  ${}^{11}\text{B}$  технических трудностей не представляет, а эксперименты с добавкой солей  ${}^6\text{Li}$  указали на изменение выхода нейтронов при кавитации тяжелой воды [32]. К тому же конвертер можно исследовать как систему для переработки высокоактивных ядерных отходов [33].

### **Устойчивый запуск термоядерных реакций: от ТМ СЛ к SF [30—32]**

Содержание и результаты экспериментов работы [28] — предмет как официальной полемики [30, 34], так и дискуссий в ведущих физических лабораториях. Поэтому, не касаясь содержания и считая результаты работы [31] статистически достоверными, необходимо дать некоторые комментарии.

Контрольные исследования [30] достаточно вольно повторили экспериментальную схему [31] и только с помощью авторов [31] в результатах работы [30] обнаружен эффект SF [32]. К тому же, если следовать схемам описания установок, приведенных в работах [30, 31], то в [30] используется сосуд для  $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$ , по объему, форме и пространственному расположению отличный от случая, описанного в [31]. Поэтому эксперимент [30] поставлен всего лишь по "мотивам" работы [31], не считая еще и отсутствия проверки по тритию. Вероятно, настоящий поисковый этап исследований и не требует обязательной тщательной и идентичной проверки, гораздо актуальнее наработка и разнообразие перспективных схем.

Необходимо и более общее замечание. При повторных и/или контрольных экспериментах обычно от другого исследователя требуется не меньшее искусство и усилия, чем у предшественника; упоминание о необходимой глубине владения изучаемой проблемой, вероятно, излишне. Так, в экспериментах по КПК и  $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$  остался "за кадром" факт, заслуживающий глубокого внимания — зависимость уровня СЛ от температуры [2]; эффект самодостаточный и необычный.

Если к основным достижениям исследования [6] следует отнести достоверное экспериментальное доказательство существования SF (выход нейтронов при кавитации превышал  $10 \sigma$ ) и введение дейтерированных кавитационных зародышей (дейтерированный порошок), блокирующих гидродинамическую неустойчивость пузырька на заключительном этапе стадии схлопывания, то в работе [31] использованы две новинки (рис. 3). Это — замена тяжелой воды на тяжелый ацетон  $\text{C}_3\text{D}_6\text{O}$  и использование стабильных "калиброванных" кавитационных зародышей, образующихся на треках

при взаимодействии пучка нейтронов\*. Здесь выход нейтронов изменялся при переходе от  $C_3D_6O$  к  $C_3H_6O$ , а также при облучении жидкости нейтронами только (Irr.) и облучении одновременно с кавитацией (Cav). Для  $C_3D_6O$  и  $C_3H_6O$  одно стандартное отклонение составило около 3,5 и 2 имп/мин, соответственно. Интенсивность внешнего импульсного нейтронного генератора была  $\sim 10^6$  н/с. Все измерения проводились при одной и той же конфигурации, объем над исследуемой жидкостью подвергали откачке до  $\sim 10$  кПа. Совместно это привело к более высоким параметрам схлопывающихся пузырьков, что отчасти и объясняется в работе [31]. Отметим, что роль элементарных частиц в формировании кавитационных зародышей ранее изучалась Бриггсом [15, 29], однако авторы [31] впервые применили этот метод при поиске SF.

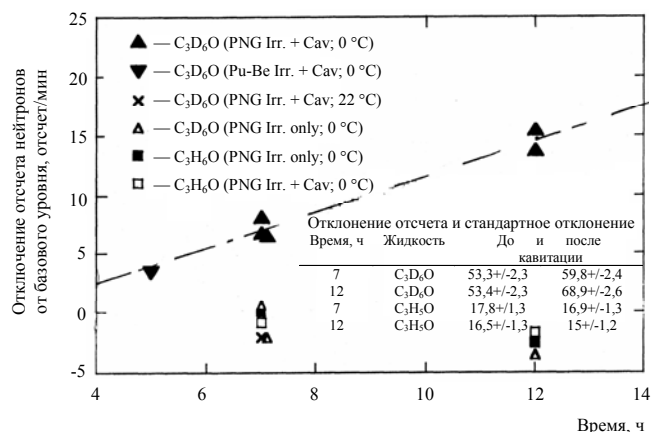


Рис. 3. Временная зависимость отклонения отсчета нейтронов от базового уровня для разных облучаемых жидкостей и при наличии или отсутствии кавитации: PNG Irr — включен внешний импульсный нейтронный генератор; Cav — режим кавитации

Отметим и другую особенность. Анализ [31] позволяет предположить, что два типа воздействия на  $C_3D_6O$  нейтронами в форме пучка или просто от источника такой же интенсивности по своей конечной роли на эмиссию нейтронов могут и не иметь существенной разницы. Действительно, в обоих случаях кавитационные пузырьки растут в течение многих циклов УЗ-колебаний из изначально одинаково сформированных зародышей. Вероятно, сходные механизмы лежат в основе особенностей СЛ при пороговых интенсивностях и так называемой структурной памяти воды [32].

Эта же логика следует из линейной зависимости представления эмиссии нейтронов (см. рис. 3) [31]. Независимо от типа источника нейтронов эмиссия нейтронов пропорциональна только времени воздействия, т. е. точки как при импульсном нейтронном генераторе, так и при обычном источ-

нике нейтронов ложатся на одну прямую. Очевидно, что на результаты экспериментов, особенно при работе с обычной водой и пороговых интенсивностях, оказывают некоторое влияние внешний нейтронный фон и космические лучи.

### Заключение

Оценка КПД всех экспериментальных схем, дающих выход нейтронов, включая токамачный ряд, лежит в пределах  $10^{-7}$ — $10^{-12}$ . Перспективность УЗК и SF на расплавах и взвешах можно выяснить только экспериментально. Будущее SF в отличие от токамаков пока непредсказуемо.

### Литература

1. Голубничий П. И., Беляева Т. М., Олаев К. Ф. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 13. Вып. 2. С. 81—83.
2. Журавлев А. И., Аюбян В. Б. Ультразвуковое свечение. — М.: Наука, 1977. — 133 с.
3. Забабахин Е. И. Кумуляция энергии и ее границы // УФН. 1965. Т. 85. Вып. 4. С. 721—726.
4. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явление неограниченной кумуляции. — М.: Наука, 1988. — 172 с.
5. Лимарь В. В., Позюков Ю. П., Хаврошкин О. Б. О возможном рентгеновском излучении кавитационной полостью // IX всес. акустическая конф. АН СССР. — М., 1977. 3 III. № 6. С. 65—68.
6. Липсон А. Г., Клюев В. А., Дерягин Б. В., Топоров Ю. П., Сиротюк М. Г., Хаврошкин О. Б., Саков Д. М. Наблюдение нейтронов при кавитационном воздействии на дейтерий-содержащие среды // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 19. С. 89—93.
7. Липсон А. Г., Дерягин Б. Г., Клюев В. А. и др. Иницирование ядерных реакций синтеза при кавитационном воздействии на дейтерийсодержащие среды // Журн. техн. физ., 1992. Т. 62. Вып. 12. С. 121—130.
8. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Розенберга. — М.: Наука, 1968.
9. Станюкович К. П., Хаврошкин О. Б. Явление рентгеновского излучения кавитационной полостью: Госкомизобретение; заявка на открытие. ОТ № 8576 от 28.09.1973. — 45 с.
10. Станюкович К. П., Хаврошкин О. Б. Явление возникновения импульсной термоядерной реакции в ядре схлопнувшейся кавитационной полости в обычной воде: Госкомизобретений; заявка на открытие. ОТ № 8589 от 22.10.1973. — 6 с.
11. Термоядерные реакции. Физическая энциклопедия. — М.: Науч. изд-во "Большая российская энциклопедия", 1998. Т. 5. С. 104—106.
12. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкости // В кн.: Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мезона. 1960. Т. 1. Ч. Б. С. 7—138.
13. Царев В. А. Низкотемпературный ядерный синтез // УФН. 1990. Т. 160. № 11.
14. Basic Bethe: Seminal Articles on Nuclear Physics, 1936—1937, 1986.
15. Briggs L. J. Trans. Amer. Soc. Mech. Eng. 1958. № 80. P. 1324.
16. Crum L. A. // Phys. Today. 1994. V. 47 (9). P. 22.
17. Derjaguin B. V., Kluev V. A., Lipson A. G., Toporov Y. P. // Physica B. 1990. V. 167. P. 189—193.
18. Eberlein C. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 3842.

\* Некоторые исследователи сомневаются в существовании таких "трехов".

19. Frenzel H., Schultes H.//Lumineszenz im ultraschall-beschickten Wasser., Zs., phys.//Chem. 1935. B 27. P. 421.
20. Fridmann A.//Zeitschrift für Physik. 1924. V. 21. P. 326.
21. Lord Rayleigh//Phil. Mag. 1917. V. 34. P. 94.
22. Margulis M. A., Margulis I. M. Contemporary review on nature of sonoluminescence and sonochemical reactions// Ultrasonics Sonochemistry 9 (2002) 1—10. ELSEVIER.
23. Marinesco N., Trillat J. J. Action des ultra-sons sur les plaques photographiques//Compt. Rend. 1933. V. 196. P. 858.
24. Marinesco N., Reggiani M. Impression des plaques photographiques par les ultrasons//Ibid. V. 200. P. 548.
25. Mayer E. Some new measurements on sonically induced cavitation//J. Acoust. Soc. America. 1957. V. 29. № 1. C. 4—8.
26. Oppenheimer J. R., Volkoff G. M.//Phys. Rev. 1939. V. 55. P. 374.
27. Prudhomme R. O., Busso R. H. Photogenese ultraviolette dans l'eau soumise aux ultrasons//Compts Rend. 1952. V. 235. P. 1486.
28. Schwinger J.//Proc. Natl. Acad. Sci. 1992. V. 89. P. 4091.
29. Sette D. Proceedings of the 3-rd International Congress on Acoustics — Stuttgart, 1959 (Amsterdam, 1961). P. 330.
30. Shapira D., Saltmarsh M. J. Comments on Reported Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation//Ibid.
31. Taleyarkhan R. P., West C. D., Cho J. S., Lahey R. T., Nigmatulin Jr. R. I., Block R. C. Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation. Science. 2002. V. 295. P. 1868—1873.
32. Абрамов О. В. Личное сообщение. 2004.
33. Полуэктов П. П. Личное сообщение. 2002.
34. Taleyarkhan R. P., Block R. C., West C. D., Lahey R. T.// Comments on the Shapira and Saltmarsh report//Ibid.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2006 г.

## Sonoluminescence and Sono-Fusion

*O. B. Khavroshkin*

Schmidt Institute of Earth Physics, Moscow, Russia

*V. P. Bystrov*

Prokhorov's General Physics Institute, Moscow, Russia

***Sonoluminescence (SL), the necessity of search of which followed from the Rayleigh's equations, after experiments Frenzel H. and Schultes H., till now remains as an effect complex and partly not deprived to mystery. In the certain conditions of experiment realization a short-wave x-ray site was found out. A thermonuclear model of SL was offered in 1973 on the basis of the experiments, and an output of neutrons was observed during cavitation in heavy water in presence of titanium D-germs in 1990.***