

### 3. Ядерный синтез и кавитация

Одной из самых интригующих возможностей использования кавитации является инициирование ядерных реакции синтеза. Как уже отмечалось, до настоящего времени отношение ученых к этой проблеме остается весьма скептическим. Трудно поверить, что вместо циклопических термоядерных установок, которые работают или строятся в настоящее время, можно использовать самое простое оборудование, размещаемое на лабораторном столе. Даже оригинальные экспериментальные работы группы Рузи Талейархана (R. P. Taleyarkhan et. al., 2002; 2006, [1,2]), опубликованные в ведущих физических журналах, не изменили ситуацию. У многих исследователей, например из группы Паттермана, эксперименты по соносинтезу вызвали желание не объяснить полученный феномен, а найти ошибки в методике эксперимента и доказать, что этого не может быть [3-6].

В этой главе обсуждаются некоторые аспекты ядерного синтеза, как правило, не рассматриваемые в работах по стандартным методам управляемого ТЯС. Напомним, что основные (известные) типы реакций ядерного синтеза имеют следующие характеристики (табл.3.1, [7]):

Таблица 3.1

Основные типы термоядерных реакций [7]

Реакция	Тип (условно, для ссылок)	Энерговыве- дение, МэВ	Число реакций в $10^{12} \text{ с}^{-1}$ на 1 Вт
$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma (5,5)$	1В	5,5	1,1
$D + D \rightarrow {}^3\text{He}(0,82) + n(2,45)$	2В	3,27	1,9
$D + D \rightarrow T(1,01) + p(3,02)$	3В	4,03	1,6
$D + D \rightarrow {}^4\text{He} + n(14,1)$	4В	23,8	0,26
$D + T \rightarrow {}^4\text{He}(3,5) + \gamma (23,8)$	5В	17,6	0,36
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	6В	22,4	0,28
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	7В	5,0	1,3
$D + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + n$	8В	3,4	1,8
$D + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + n$	9В	15,1	0,41

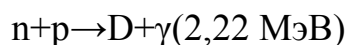
### 3.1. Низкотемпературный ядерный синтез

Работы Флейшмана и Понса [8] и группы Джонса [9] достаточно хорошо известны всем интересующимся проблемой низкотемпературного ядерного синтеза (НТС). Тем не менее, для полноты изложения и дальнейших ссылок целесообразно напомнить основные сведения, касающиеся этих экспериментов.

В работе [8] производилось электролитическое насыщение катода дейтерием в растворе 0,1 моль/л LiOD в смеси 99,5% D<sub>2</sub>O и 0,5% H<sub>2</sub>O. В качестве электродов использовались образцы из Pd в виде фольги, прутков и кубиков. Плотность тока в различных опытах менялась в широких пределах от 0,8 мА/см<sup>2</sup> до 512 мА/см<sup>2</sup>.

Измерения теплового баланса проводились как при низкой (0,8-1,6 мА/см<sup>2</sup>) так и при высокой (до 512 мА/см<sup>2</sup>) плотности тока в сосуде Дьюара, помещенном в резервуар с водой, температура которой поддерживалась на уровне 300К. Температура внутри ячейки и в резервуаре непрерывно измерялась термометрами. По мере необходимости производилось перемешивание раствора.

Спектр квантов, предположительно от реакции захвата нейтронов, образованных в процессе (2В) по табл.3.1:



регистрировался детектором на сцинтиллирующем кристалле NaI. Поправка на фон производилась посредством вычитания спектра, измеренного над идентичным водным резервуаром в 10 метрах от рабочей ячейки.

Поток нейтронов измерялся стандартным дозиметром на BF<sub>3</sub>-счетчиках, эффективность которого к нейтронам в области энергий 2,5 МэВ составляла (включая геометрический фактор)  $\epsilon = 2,4 \cdot 10^{-6}$ . Фон нейтронов измерялся в 50 м от рабочей ячейки. Измерения происходили в подвальном помещении и длились обычно по 50 часов.

Кроме того, измерялась скорость генерации и накопления трития, предположительно по каналу (3В). Для этого каждые 2 дня брались пробы по 1 мл электролита и определялась их  $\beta$ -активность.

Авторы приводят следующие результаты своих исследований:

1) Обнаружен избыток тепла по сравнению с подводимой электрической энергией, причем в ряде случаев избыток тепла превосходил подводимую энергию в несколько раз и в среднем составлял около 10Вт на 1 см<sup>3</sup> Pd. Избыток тепла мог поддерживаться в течение 100 часов работы, за время которой высвобождалось до  $\sim 4$  МДж·см<sup>-3</sup> энергии.

2) Зарегистрированы  $\gamma$ -кванты со спектром, имеющим максимум на 2,2 МэВ, что, по мнению авторов, подтверждало их связь с захватом нейтронов.

3) Дозиметр показал наличие потока нейтронов, интенсивность которого согласуется с интенсивностью гамма излучения и составляет  $N_n \sim 4 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup> (примерно в три раза выше фона).

4) Накопление трития в электролите свидетельствует о протекании реакций (3В), которые идут со скоростью  $N_T = (1-2) \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup> соизмеримой с  $N_n$ .

Поскольку калориметрические измерения для своего объяснения через ядерный синтез по каналу (2В) требуют скорости порядка  $10^{11}$ - $10^{14}$  с<sup>-1</sup>, существенно больше, чем следует из значения  $N_n$ , авторы делают вывод о том, что в их электролитической ячейке основное энерговыделение происходит за счет каких-то других, неизвестных ядерных процессов.

После публикации этой работы сотни исследователей во всем мире занялись изучением полученных результатов и воспроизведением экспериментов. Некоторым из них удалось получить аналогичные результаты, в других лабораториях эффект найден не был. Были обнаружены методические ошибки в экспериментах Флейшмана и Понса, например, недостаточно полный учет влияния электрохимических процессов на тепловыделение. После этого на авторов обрушился целый вал критики.

Нашумевшее открытие Флейшмана и Понса было «закрыто», однако это совсем не означает, что эффекта не существует. Разочарование наступило,

когда выяснилось, что использование холодного синтеза в энергетике невозможно осуществить в течение нескольких лет. Тем не менее, работы в этом направлении продолжают, имеются серьезные успехи в развитии экспериментальных методик, повышается воспроизводимость опытов. Детальный анализ состояния дел в этой области сделан в работе [7]. Приведем основные выводы этой работы:

1. В ряде экспериментальных исследований получены свидетельства в пользу существования явления НТС, т. е. возникновения при комнатной температуре реакций слияния дейтронов, внедренных в кристаллическую решетку металлов.

2. Реакции НТС могут иметь различную скорость и характер протекания и проявляются либо в виде хаотического излучения одиночных нейтронов, которое может продолжаться до нескольких часов со средней скоростью на уровне  $10^{-24}$ - $10^{-22}$  с<sup>-1</sup> (DP)<sup>-1</sup>, либо в виде отдельных «нейтронных вспышек», при которых за короткие промежутки времени (секунды, минуты) может излучаться до  $10^3$ - $10^5$  нейтронов. Зарегистрировано также излучение заряженных продуктов DD-синтеза (p, T, <sup>3</sup>He).

3. Характерной особенностью экспериментов по НТС является плохая воспроизводимость результатов, спорадический характер сигналов и возникновение их только при создании неравновесных условий в системе металл-дейтерий.

4. Несмотря на значительные усилия многих десятков научных групп во всем мире, явление НТС изучено пока лишь на предварительном, качественном уровне. Ряд результатов требует дальнейшей проверки. Прежде всего, это относится к вопросу о соотношении различных каналов и возможности преимущественного протекания НТС по безнейтронному каналу ( $n/T \sim 10^{-8}$  с высокой скоростью). Необходимы также более детальные эксперименты по прямой регистрации заряженных частиц, изучение синтеза в pD и DT системах, корреляционные эксперименты по нескольким каналам регистрации, ис-

следование влияния различных факторов на характер протекания процессов НТС.

5. В настоящее время отсутствует общепринятая точка зрения на механизм НТС. В рамках стандартных представлений ядерной физики и физики твердого тела для равновесных систем не удастся объяснить наблюдаемые в опыте результаты. Наиболее перспективной является, по-видимому, ускорительная модель, связывающая НТС с ускорением дейтронов в сильных электрических полях в микротрещинах. При этом в действительности имеет место не «холодный», а «микроскопически горячий» синтез. В пользу такой модели свидетельствуют спорадический характер НТС, наблюдение «нейтронных вспышек» и в ряде случаев их квазипериодичность, отсутствие линии  $\gamma$  (5,5 МэВ). Однако для более определенных суждений необходимо проведение корреляционных экспериментов с регистрацией «сопутствующих» сигналов (радио, акустическая эмиссия и т. п.) и детальных теоретических расчетов, учитывающих различные твердотельные эффекты (экранирование, усиление диэлектрических свойств и т. п.).

6. Энерговыведение в реакциях НТС, соответствующее наблюдаемым потокам нейтронов, слишком мало для того, чтобы представлять интерес с точки зрения промышленной энергетики. Ситуация может стать несколько более интригующей, если получит подтверждение возможность существенно более высокой скорости НТС по безнейтронному каналу. Независимо от этого изучение НТС представляет несомненный интерес для целого ряда дисциплин, таких как физика твердого тела, ядерная физика, геофизика и геохимия, радиационная химия и радиационная акустика и др.

Уже после выхода статьи [7] состоялась конференция [10] по низкотемпературному синтезу, подводя итоги которой Д. Уорледж из Исследовательского института электроэнергетики (США) выделил следующие пункты:

- наблюдаемые явления не есть «нормальный» D-D синтез;
- эксперимент пока недостаточно ориентирует теорию;
- значительно улучшилось качество многих экспериментов;

- много очень разных экспериментов дают схожие результаты;
- развивающаяся область исследований имеет все права на существование и нуждается в поддержке.

Обратим внимание на первый пункт. Под «нормальным» синтезом понимается обычный термоядерный синтез, для запуска которого требуются температуры в десятки миллионов градусов. Поэтому очевидно имеется другой, пока неизвестный механизм НТС, не связанный с необходимостью преодоления кулоновского барьера, либо этот барьер преодолевается каким-либо пока неизвестным способом.

Недавние конференции по проблемам НТС [Tenth International Conference on Cold Fusion (ICCF-10, Cambridge, Massachusetts 24 - 29 August 2003), ICCF11, October 31st – November 5, 2004 Marseilles, France, ICCF12, November 27 – December 2, 2005 Yokohama, Japan] показали, что для НТС существенным является влияние кристаллической решетки насыщенного дейтерием металла (палладий, вольфрам, платина), под влиянием которой величина кулоновского барьера может снижаться (экранировка). Выдвигаются также предположения о роли коллективных явлений.

Предложены механизмы многочастичных (3D, 4D) реакций, которые могут объяснить факт избыточного выделения гелия-4 и трития, в то время как наблюдаемое число нейтронов значительно меньше, чем в классической DD-реакции.

Обнаружены эффекты НТС при лазерном облучении насыщенного дейтерием металла ( $TiH_x$ ,  $TiD_x$ ), а также при кавитационном воздействии.

Следует заметить, что на конференциях по НТС практически не представляются работы по соносинтезу. Очевидно, авторы этих работ склонны считать, что соносинтез относится к обычному, «горячему» термояду.

Таким образом, несмотря на явную неудачу первых опытов по НТС, их результаты привели к широкомасштабному научному поиску новых путей осуществления НТС, изучению возможности новых типов реакций и в ко-

нечном итоге принесли несомненную пользу для разработки в будущем энергетически эффективного реактора.

Нечто подобное описанным событиям в настоящее время происходит с соносинтезом. После работ группы Талейархана и широкой рекламы этого открытия в СМИ появилось огромное число критических статей, в которых авторы либо не смогли получить подтверждающие соносинтез результаты, либо указывают на методические ошибки экспериментов и экспериментальные погрешности в работах Талейархана. Даже один из первых авторов патента по соносинтезу US № 5 659 173 Сет Паттерман (S.J. Putterman), после неудавшейся попытки повторения эксперимента Талейархана (финансирование \$350 000 от Министерства обороны США, DARPA) опубликовал критическую статью [5], с указаниями на использование нестандартных методик и обличениями авторов работ по поиску соносинтеза в игре по принципу «большой риск – большой выигрыш». Аспирант С. Паттермана Брайен Наранджо (Brian Naranjo) опубликовал целую серию статей [3,4,6], в которых утверждается, что полученные Талейарханом нейтронные спектры, вероятно, получены не от соносинтеза, а от хранящегося в лаборатории образца изотопа калифорния  $^{252}\text{Cf}$ . Не совсем ясно в таком случае, каким образом нейтронный поток изменялся пропорционально квадрату расстояния от установки (Образец  $^{252}\text{Cf}$  находился в 15 футах от установки).

Более детально описание экспериментов группы Талейархана и возражения его критиков будет приведено в разделе 3.3.

### **3.2. Наблюдения реакций ядерного синтеза при различных физических воздействиях**

Реакции ядерного синтеза могут инициироваться различными физическими воздействиями. По некоторым данным, еще во время Великой Отечественной войны в Германии проводились эксперименты по инициированию ТЯС с помощью взрыва обычных химических взрывчатых веществ (ВВ).

Идею использования кумулятивных зарядов для подрыва термоядерного боеприпаса «кухонного образца» впервые высказал отец американской водородной бомбы Эдвард Тейлор. По его словам, достаточно взять кусок 2-х дюймовой водопроводной трубы, внутрь поместить ампулу с тритием, а по концам трубы разместить кумулятивные заряды, и кухонный термояд готов. Там же было предостережение: при удачной конструкции кухонного термоядерного боеприпаса экспериментатор рискует испариться вместе с окружающим ландшафтом.

Конечно, это была своеобразная шутка великого ученого.

Посмотрим, почему обычное химическое ВВ не позволяет достигать «термоядерных» условий. В схеме кумуляции энергии с использованием ВВ используется металлическая (или из другого материала) сфера, в центре которой находится сферическая капсула с ядерным топливом (газообразным или твердым). На поверхности металлической сферы равномерно распределяются заряды ВВ. При одновременном подрыве всех зарядов внутри сферы образуется ударная волна (УВ), которая фокусируется на капсуле с ядерным зарядом и создает в нем высокие плотности и температуры, необходимые для протекания реакции ядерного синтеза.

Имеются две основных причины, по которым не удастся осуществить термоядерную реакцию в подобных установках. Первая – трудности фокусировки сходящейся ударной волны. Какие бы быстрые электродетонаторы не применялись, всегда моменты подрыва отдельных зарядов будут несколько различны, хотя бы из-за разницы в составе ВВ. Это приводит к искажению сферической формы УВ, и, как следствие, размыванию фокуса.

Вторая причина – ограниченная скорость горения химического ВВ, а следовательно, импульсной мощности. По оценкам, по этому параметру ВВ должны быть мощнее на порядок.

Однако если речь идет не об энергетическом устройстве, а об инициировании ТЯС (т.е. о «сжигании» только небольшой доли ядерного топлива), то химические ВВ могут быть использованы. В работе [11] для инициирования



ТЯС применялась экспериментальная установка (рис.3.1), в которой с помощью взрыва химического ВВ (2) алюминиевый ударник (1) разгонялся до скорости 5,4 км/с и сталкивался с мишенью (5). Мишень представляла собой свинцовый цилиндр с конической выемкой, заполненной дейтерием при давлении близком к атмосферному. По мысли авторов, конус должен сфокусировать ударную волну в вершине, обеспечивая необходимые температуры и плотности дейтерия для инициирования ТЯС. Регистрация нейтронов осуществлялась сцинтилляционным счетчиком (8), расположенным на расстоянии 80 см от мишени.

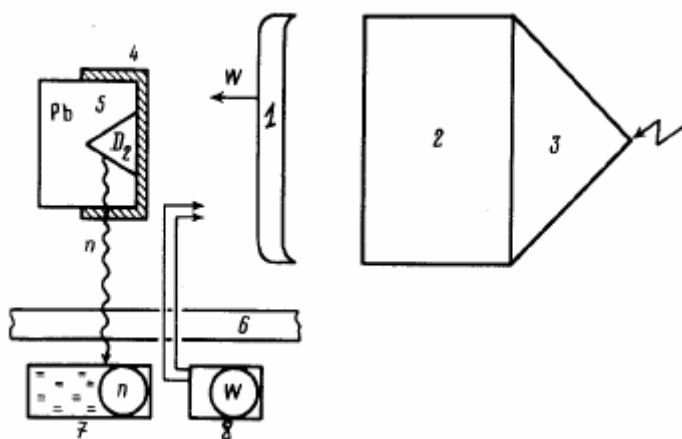


Рис.3.1. Схема экспериментальной установки [11]: 1 – ударник (лайнер), 2 – заряд ВВ, 3 – детонационная линза, 4 – крышка мишени, 5 – мишень, 6 – стальная защита, 7 – блок регистрации нейтронов, 8 – блок измерения скорости полета ударника.

В экспериментах зарегистрирован устойчивый нейтронный выход примерно  $10^6$  нейтронов за взрыв. Авторами проведены оценочные расчеты в приближении одномерной сферической модели. Полученные значения для давления – 50-100 Мбар, температуры – 0,3-0,5 кэВ, отношение плотностей  $\rho/\rho_0 \approx 10^3$ , что соответствует нейтронному выходу  $10^4$ - $10^8$ . Переданная дейтерию энергия ударника составляла около 8%.

Коническая мишень использовалась также в экспериментах при кумуляции энергии лазерного импульса в работе [12]. Энергия лазерного импульса составляла 30 Дж при длительности импульса 5 нс и 80 Дж при длительности 25 нс. Наибольший нейтронный выход  $2,6 \cdot 10^4$  нейтронов был зарегистриро-

ван при воздействии на мишень, заполненную дейтерием при давлении 1 атм, лазерным излучением с энергией 70 Дж и при длительности импульса 25 нс. При сокращении длительности импульса до 5 нс и энергии до 30 Дж генерация нейтронов практически прекращалась.

Согласно проведенным авторами оценкам, степень сжатия газа находилась в пределах  $10^2$ - $10^3$ , а температура составляла 200-300 эВ. Для сжатия газа до таких параметров в условиях экспериментов требуется 5-8 Дж энергии, и, таким образом, доля переданной дейтерию энергии лазера составляет 8-14%.

Приведенные данные экспериментов свидетельствуют о том, что сравнительно небольшая энергия, сконцентрированная (с помощью конической выемки) сферической ударной волной на небольшой объем газообразного дейтерия, способна инициировать реакции синтеза.

В работе [13] выход нейтронов получен при механическом измельчении титановой стружки в присутствии дейтерированных веществ. В качестве объектов исследования использовались титановая стружка, а также  $D_2O$ , дейтерированный полипропилен ПП( $D_6$ ) и дейтерид лития (LiD). Эксперименты по механическому воздействию на титан осуществлялись на лабораторной

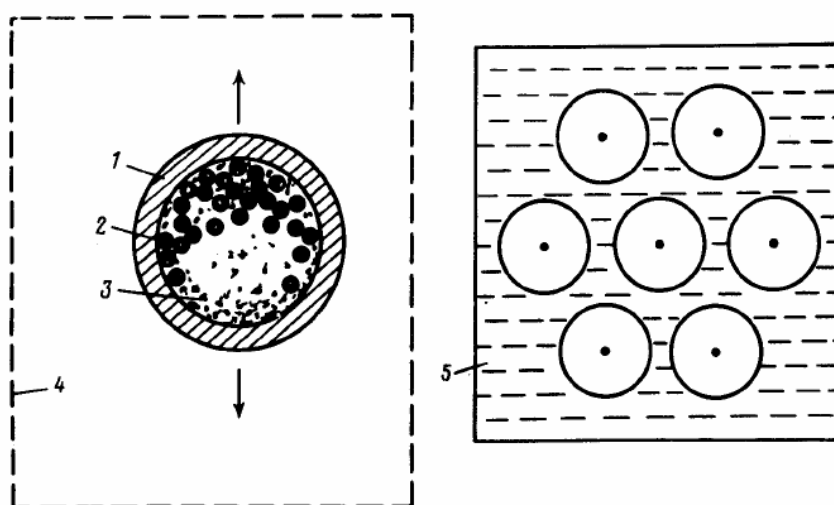


Рис.3.2. Схема эксперимента по наблюдению выхода нейтронов при механическом измельчении титановой стружки [13].

эксцентриковой вибрмельнице М-35 с частотой 50 Гц и амплитудой 5 мм (рис.3.2). Титановая стружка смешивалась с содержащими дейтерий объектами в определенных пропорциях и помещалась в стальной барабан с герметичной крышкой, заполненный на 2/3 стальными шарами диаметром 6 мм. Для контроля экспериментальных данных проводилось измельчение титановой стружки, а также  $D_2O$ , LiD и ПП( $D_6$ ) по отдельности.

Эксперименты показали, что при измельчении только самой титановой стружки, а также дейтерийсодержащих компонент по отдельности, не наблюдается превышения над естественным нейтронным фоном (0,05 отсчет/с). Вместе с тем, при измельчении титановой стружки совместно с 10% тяжелой воды, либо 4-5% дейтерированного полипропилена ( $D_6$ ), а также с обеими этими компонентами вместе интенсивность счета нейтронов, с учетом эффективности детектора, превосходит в 5-6 раз интенсивность космического фона. Максимальная интенсивность счета нейтронов наблюдается для системы Ti + 10%  $D_2O$  + 4% ПП( $D_6$ ) и составляет  $0,31 \pm 0,03$  отсчет/с в процессе диспергирования. Близкое к этому значению превышение над фоновым уровнем наблюдается в течение 8-10 минут после окончания процесса механического воздействия на данную систему ( $0,30 \pm 0,13$  отсчет/с). Наибольший выход нейтронов в системе: Ti + 10% $D_2O$  + 4%ПП( $D_6$ ) регистрируется в процессе замораживания рабочего барабана в жидком азоте через 3-6 минут после окончания механического воздействия и составляет  $0,40 \pm 0,14$  отсчет/с. После 3-4 циклов вибродиспергирования (по 3 мин) интенсивность нейтронного счета падает, становясь неотличимой от естественного нейтронного фона и не восстанавливается при последующем механическом воздействии.

Таким образом, при механическом воздействии на титан в присутствии дейтерированных веществ и некоторое время по окончании его наблюдается слабое нейтронное излучение (10-30 нейтронов/с), связанное, вероятно, с протеканием DD-реакций при насыщении частиц механически разрушенного титана дейтерием. Механизм этого эффекта может быть обусловлен в данном случае с механохимическим разложением дейтерийсодержащих компонент и

диффузией дейтерия через свежесформированную поверхность титана в его кристаллическую решетку в условиях существования значительных контактных давлений в процессе вибродиспергирования. Вследствие того, что титан поглощает до 200% дейтерия и при этом деформация решетки может достигать порядка 25% в ней будут, по-видимому, создаваться условия для эффективного сближения дейтронов в областях с высокой концентрацией энергии в объеме титана, возникающих при механическом воздействии. Кроме того, существенно, что при разрушении кристаллической решетки возникают электрические поля  $\sim 10^7$  В/см, которые могут существенно понизить величину кулоновского барьера дейтронов, способствуя увеличению вероятности протекания DD-реакций.

Наблюдаемое в экспериментах увеличение счета нейтронов при замораживании образцов в жидком азоте может также косвенно свидетельствовать о протекании «твердотельных ядерных реакций» при поглощении дейтерия решеткой титана, поскольку известно, что равновесное фазовое давление водорода (дейтерия) снижается при уменьшении температуры титана, что сопровождается увеличением поглощения дейтерия. Вместе с тем, как указывалось выше, наблюдаемое истощение генерации нейтронов может объясняться тем, что частицы титана становятся размером менее 1 мкм и при этом их поверхность модифицируется полипропиленом, что ведет к прекращению диффузии дейтерия в решетку титана и, таким образом, счет нейтронов приближается к космическому фону.

В последние годы в качестве дейтерийсодержащих мишеней часто применяют мишени с пористой структурой. По мнению авторов [14-16] пористая среда обеспечивает снижение динамических неустойчивостей сферической кумуляции, и тем самым дает возможность увеличить концентрацию энергии.

В работах [14,15] основное внимание сосредоточено на экспериментальных методах исследования электрических разрядов и генерируемых ими

ударных волн и акустических воздействий в электролитах, в том числе и пористых.

В работе [15] развиваются теоретические и экспериментальные исследования процессов, возникающих при ударноволновом воздействии на тяжелую воду (содержащую пузырьки дейтерия), которое создается кольцевым разрядом при взрыве проволоочки. В результате авторам удалось создать устройства для получения микропузырьковой среды в устойчивом состоянии при высоких объемных газосодержаниях  $\varphi = 0,2 \div 0,9$ . Это позволило подобрать условия для воздействия на микропузырьковую среду близкие к однородному сжатию в адиабатическом режиме без разрушения микропузырьков.

Авторами были измерены потоки нейтронов при обжатии ударной волной тяжелой воды, барботированной дейтерием. Зарегистрированы абсолютные величины выхода нейтронов в импульсе в телесном угле  $4\pi$  равные  $10^8 \div 10^{10}$ .

В работе [16] материалы типа пены предлагается использовать для изготовления мишеней для лазерного синтеза. Если использовать такие материалы в качестве абсорбера энергии в сферических мишенях с термоядерным горючим для проблемы лазерного термоядерного синтеза, то физика поглощения и переноса энергии в этих средах при осуществлении сферического сжатия мишеней позволяет существенно уменьшить число облучающих лазерных пучков (вплоть до двух пучков). В традиционных схемах облучения (прямое и не прямое облучение) предполагается использование большого числа (100-200) облучающих пучков, что крайне трудно реализовать в условиях термоядерного реактора.

Перспектива получения хорошей симметрии сжатия мишеней с абсорбером из пены (типа «лазерный парник») при облучении малым числом лазерных пучков основана на том, что характер объемного поглощения в пене сохраняет черты, свойственные задаче об освещенности, а для последней уже доказана формальная возможность построения сферически-симметричного распределения [16].

Еще один метод «нестандартного» проведения реакции ТЯС продемонстрирована в работах [17,18]. Для инициирования реакции ТЯС в экспериментах используются пироэлектрические кристаллы. Система из двух таких кристаллов подвергается нагреву или охлаждению, при этом возникает разность потенциалов в несколько сотен тысяч вольт. Под действием этого электрического поля дейтерий ионизируется и его ионы разгоняются до кинетической энергии порядка 200 кэВ. При столкновении ионов происходит термоядерный синтез с генерацией нейтронов 2,45 МэВ, что и было экспериментально установлено. Выход нейтронов в экспериментах достигал  $10^3$  за цикл, при этом выделяется энергия синтеза, величина которой составляет около  $10^{-8}$  Дж. Авторы работ [17,18] не претендуют на создание энергетической установки на пироэлектрическом принципе, однако установка такого типа может быть полезна как дешевый источник нейтронов для многих технических применений, т.к. существующие в настоящее время импульсные генераторы нейтронов очень дороги (\$ 30 000) и недолговечны (до 300 часов работы).

В работе [19] обнаружена ядерная реакция при воздействии мощного лазерного импульса на искусственно созданный кластер из молекул дейтерия. Нейтральные молекулы дейтерия притягиваются друг к другу в дейтериевом кластере силами Ван-дер-Ваальса, то есть слабыми короткодействующими силами, возникающими из-за взаимной электрической поляризации нейтральных молекул. Типичный радиус дейтериевого кластера, получаемого в экспериментах при истечении пучка молекул дейтерия из сопла, составляет 25-50 ангстрем, то есть каждый такой кластер насчитывает несколько тысяч или десятков тысяч молекул дейтерия, имея, как правило, сферическую форму. Очень короткий и сверхмощный световой импульс, будучи сфокусированным на кластере-мишени, буквально «сдувал» с него все электроны. Кластер превращался в набор положительно заряженных ядер, и затем взрывался под действием электростатических кулоновских сил расталкивания. Ядра из внешних областей кластера разгонялись до очень высоких скоростей и, стал-

квиваясь с другими ядрами, приводили к термоядерной реакции. Этот эффект назван авторами «кулоновским взрывом» (Coulomb Explosion).

В недавней работе [20] авторы провели численное моделирование кулоновского взрыва в случае кластеров метана  $(\text{CH}_4)_n$ , аммиака  $(\text{NH}_3)_n$  и воды  $(\text{H}_2\text{O})_n$  и выяснили, что мощность вспышки, необходимой для их полной ионизации, вполне достижима при современных технологиях. Правда, для того, чтобы энергия ядер при кулоновском взрыве была достаточной для ядерной реакции, необходимо использовать довольно большие кластеры, содержащие несколько миллионов молекул, но и это достижимо при современных технологиях.

Еще один нетривиальный пример ядерной реакции в природных условиях приведен в сообщении [21], где сообщается о наблюдении нейтронов при разряде молнии.

Таким образом, инициирование реакций ТЯС не является уникальным и дорогостоящим процессом. Как показано выше, существует множество способов инициировать реакции ТЯС без использования установок многомиллионной стоимости и огромных размеров. Основная задача состоит в поиске путей увеличения энергетического выхода реакций синтеза, и получения возможности создания энергетических ядерных установок с приемлемым КПД. Немаловажное значение для ряда областей науки и техники имеет также разработка новых типов недорогих нейтронных генераторов.

### 3.3. Соносинтез

Обсуждавшиеся во второй главе эксперименты по изучению однопузырьковой СЛ (SBSL) показали, что при пульсациях одиночного пузырька термодинамические параметры газа могут достигать очень больших значений: температура – 20000-40000К, давление – 3000-5000 атм, плотность – 1000 кг/м<sup>3</sup>. Несмотря на то, что эти впечатляющие значения практически не-

достижимы другими способами, они все же недостаточны для инициирования ТЯС по обычным каналам (табл.3.1).

На это указывают эксперименты, описанные в работе [22]. Авторами в 1995 году были проведены детальные исследования однопузырьковой СЛ на частоте 25 кГц в тяжелой (98,5%) и обычной воде с использованием в качестве насыщающего газа как воздуха, так и дейтерия. Ни в одном случае не было обнаружено нейтронного излучения. Используемый сцинтиляционный счетчик Delta 3 фирмы NE Technology с активной площадью 49 см<sup>2</sup> показал фон 3.4 отсчета/с с флуктуацией выше 9, однако эти показания не изменялись статистически значимо при включении кавитации и образовании SBSL.

Сколько-нибудь значительного увеличения кумуляции энергии в SBSL, по-видимому, ожидать не приходится из-за уже обсуждавшихся ранее неустойчивостей SBSL. Так, предельное акустическое давление, при котором режим еще наблюдается, не превышает 1,5 атм. Некоторое увеличение кумуляции можно получить, используя специально подобранные жидкости, (например серная кислота, фосфорная кислота, глицерин и пр. [23]), однако достижение термоядерных температур и плотностей и в этом случае маловероятно. Поэтому следует обратить внимание на другие, отличные от SBSL принципы концентрации энергии в газовых пузырьках.

В 1977 году появилось сообщение о возможности рентгеновского излучения при обычной многопузырьковой кавитации [24]. Авторы приводят следующее объяснение эффекту. При сжатии кавитационной полости на заключительном этапе схлопывания возникают процессы (например, возросшие радиационные потери которые блокируют развитие гидродинамической неустойчивости стенок полости, и позволяют завершить стягивание пузырька, практически в точечное ядро с локальной температурой  $T_{\max} \sim 10^6 - 10^7$  К и давлением  $P_{\max} \sim 10^6 - 10^8$  атм. При захлопывании кавитационной полости электрические разряды ионизированного газа, расположенного на движущихся стенках, создают мощные неоднородные магнитные поля, которые ус-



коряют заряженные частицы до энергии  $\sim 10 - 30$  кэВ с последующим их торможением в жидкости. Вся кавитационная зона является источником рентгеновских лучей. Высокая температура и давление на заключительном этапе схлопывания пузырька приводят к возможности реакции термоядерного синтеза.

В 1992 году появилось новое сообщение о наблюдении ТЯС при кавитации [25]. Была исследована возможность инициирования реакции ТЯС в процессе ультразвуковой кавитации в тяжелой воде. По утверждению авторов, был зарегистрирован достоверный (максимальное превышение над уровнем естественного фона  $12\sigma$ ) выход нейтронов как следствие инициированных реакций синтеза при кавитации суспензии дисперсных частиц  $\text{LaNi}_5\text{D}_x$  в тяжелой воде  $\text{D}_2\text{O}$ . По утверждению авторов, сферически сходящиеся стенки пузырьков обжимают шаровидные кавитационные зародыши из  $\text{LaNi}_5\text{D}_x$ , при этом разгоняя дейтроны среды. На заключительном этапе вокруг зародыша формируется тонкий высокотемпературный плотный слой плазмы, где и происходит реакция ТЯС с выходом нейтронов.

Процитированные выше сообщения не вызвали особых возражений со стороны исследователей, а эксперименты не были повторены независимыми научными группами. Поэтому их достоверность может вызывать определенные сомнения.

Из последних публикаций по многопузырьковому соносинтезу надо отметить работы японских исследователей [26,27]. В этих работах предлагается использовать микроволновое излучение, которое должно существенно увеличить температуру газа внутри пузырьков. Предлагаемая установка для промышленного получения энергии от многопузырькового соносинтеза показана на рис.3.3. В качестве рабочей жидкости предлагается использовать дейтерированный бензол и ацетон, кроме того, производится барботирование пузырьков инертного газа для усиления эффекта. Мощность ультразвукового генератора составляет 1 кВт, частота 20 кГц. Импульсное микроволновое излучение (2,45 ГГц,  $\sim 1,8$  кВт) и нейтронный пучок, по утверждению авторов,

позволит значительно увеличить выход энергии соносинтеза, а большое число кавитационных пузырьков позволит производить энергию в промышленном масштабе. Результаты испытания установки в литературе к настоящему времени (февраль 2007 г.) опубликовано не было.

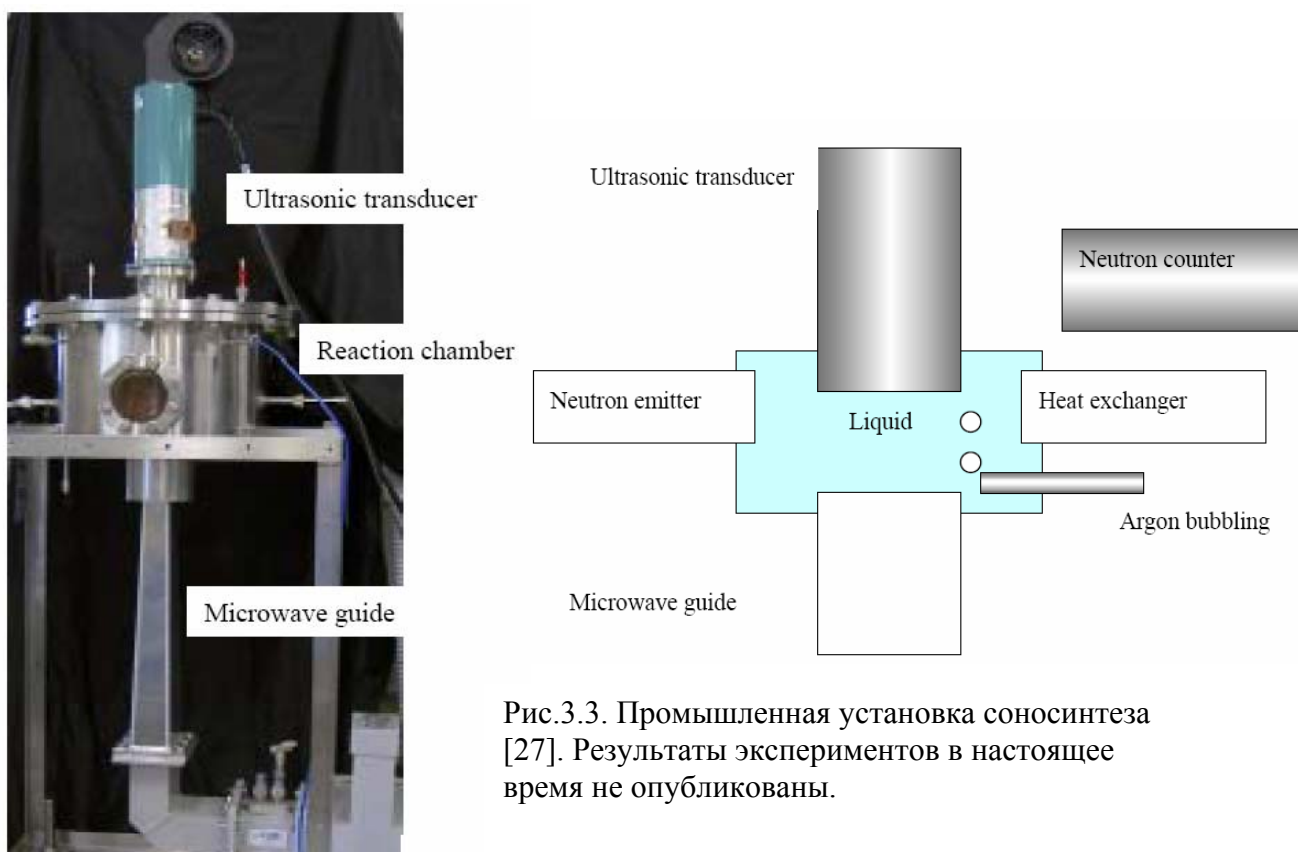


Рис.3.3. Промышленная установка соносинтеза [27]. Результаты экспериментов в настоящее время не опубликованы.

Рассмотрим более детально эксперименты группы Талейархана, описание которых в журнале Science в 2002 [1] году вызвало бурную реакцию как в научных кругах, так и в СМИ. В Голливуде даже был снят фильм, где сюжет был связан с изобретением однопузырькового соносинтеза [28].

В работах этой группы не использовался режим SBSL. Как уже было сказано, достигаемых при SBSL значений термодинамических параметров газа в одиночном устойчивом пузырьке недостаточно для инициирования реакции ядерного синтеза. Поэтому авторы предложили нетривиальное решение задачи увеличения концентрации энергии в газовом пузырьке, позволяющее значительно увеличить скорость схлопывания газовых пузырьков.

По идее авторов, для этого требуется создать зародыши кавитации очень малого размера, а изначально присутствующие в исходной жидкости микропузырьки удалить с помощью вакуумирования. В этом случае появляется возможность увеличить амплитуду акустического давления на порядок, т.к. порог кавитации в дегазированной жидкости намного больше, чем в исходной.

Кроме того, согласно расчетам авторов, динамика кавитационных пузырьков, полученных их зародышей нанометровых размеров, будет отличаться от динамики обычного пузырька. В частности, эти отличия связаны с тем, что подобный пузырек содержит практически только пар жидкости. В фазе роста пузырька пар проникает в пузырек, испаряясь с его стенки. В начале сжатия, когда скорость сжатия еще невелика, пар снова конденсируется на стенку, сохраняя тем самым равновесие фаз жидкость-пар. Однако с возрастанием скорости сжатия пар не будет успевать конденсироваться, и будет вести себя как обычный газ. При этом в пузырьке может возникнуть сферическая сходящаяся ударная волна, нагревающая газ до очень высоких температур. Отразившись от центра сферы, ударная волна возвратится к стенке пузырька, резко снижая при этом скорость его сжатия. Дальнейшее сжатие газа происходит по закону близкому к адиабатическому, при этом резко повышается его плотность. Сочетание высокой температуры и плотности газа должен приводить, по мысли авторов, к термоядерным реакциям, если пар жидкости содержит ядра дейтерия или трития.

Для генерации микрзародышей кавитации в работе [1] использовался импульсный нейтронный пучок с энергией нейтронов 14 МэВ, который, проходя через жидкую среду, оставлял за собой трек из очень маленьких пузырьков, служивших зародышами кавитации.

Схема установки приведена на рис.3.4. Кольцевой пьезоэлектрический преобразователь создавал стоячую акустическую волну (19,3 кГц) в стеклянной цилиндрической колбе с дейтерированным ацетоном  $C_3D_6O$ . Ацетон

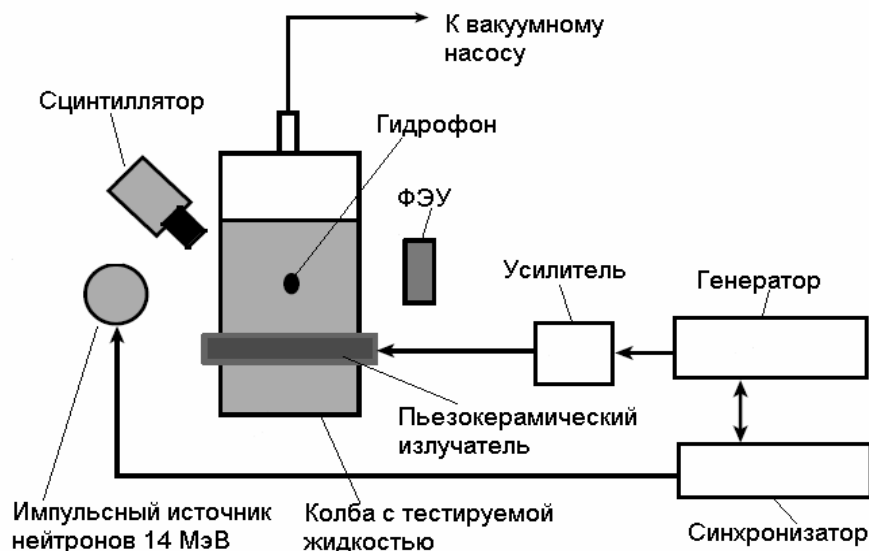


Рис.3.4. Схема экспериментальной установки соносинтеза [1].

предварительно дегазировался и охлаждался до  $0^{\circ}C$ . Синхронизированный с ультразвуковым генератором импульсный источник нейтронов вырабатывал короткий нейтронный импульс, который, проходя через жидкость, образовывал микроскопические зародыши кавитации ( $R_0=10-100$  нм). В фазе разрежения ультразвуковой волны зародыши расширялись и заполнялись паром ацетона, достигая максимального радиуса  $R_{max}=1$  мм. Отношение  $R_{max}/R_0$  достигало, таким образом, значения  $10^5$ , в то время как для режима SBSL характерной является величина  $R_{max}/R_0 \sim 10$ . В фазе сжатия пузырька давление паров практически не препятствует ускорению сжатия, т.к. конденсация паров делает процесс близким к изобарическому, и скорость стенки пузырька может значительно превосходить скорость звука. На последней стадии сжатия движение стенки ускоряется настолько, что пар не успевает конденсироваться, и ведет себя как обычный газ. Сжатие происходит практически по адиабатическому закону (согласно утверждению авторов, образуется сходящаяся ударная волна в газе, дополнительно нагревающая центральную область пузырька) и газ в пузырьке нагревается до десятков миллионов градусов. Высо-

кая температура приводит к инициированию ТЯС, наличие которого устанавливали по генерации потока вторичных нейтронов с энергией 2,45 МэВ, характерных для DD-реакции:



Поток нейтронов регистрировался счетчиком нейтронов на основе жидкого сцинтиллятора. Последовательность физических процессов показана на рис.3.5.

Авторами установлено, что в при использовании в качестве тестовой жидкости дейтерированного ацетона выход нейтронов соносинтеза составляет около  $4\cdot 10^5$  нейтр/с. Дополнительно проведено исследование наработки трития, протекающего по безнейтронному каналу:



который происходит с равной вероятностью с нейтронным каналом (3.1). Скорость накопления трития, по утверждению авторов [1], удовлетворительно согласуется с измеренным нейтронным потоком.

После выхода этой статьи была опубликована работа [29], в которой предпринята попытка повторения эксперимента на аналогичной установке, но статистически значимого превышения выхода нейтронов над фоном авторам обнаружить не удалось. В работе [30] нейтроны от процесса синтеза в лазерном пузырьке в тяжелой воде также не были обнаружены.

В более поздней работе [31] авторы подтвердили результаты экспериментов Талейархана.

В критической статье С. Паттермана, К. Саслика и Л. Крама [5] утверждается, что анализ трития в работе группы Талейархана [1] проводился методически неверно, и результаты по наработке трития являются следствием радиоактивного загрязнения тритием помещения лаборатории.

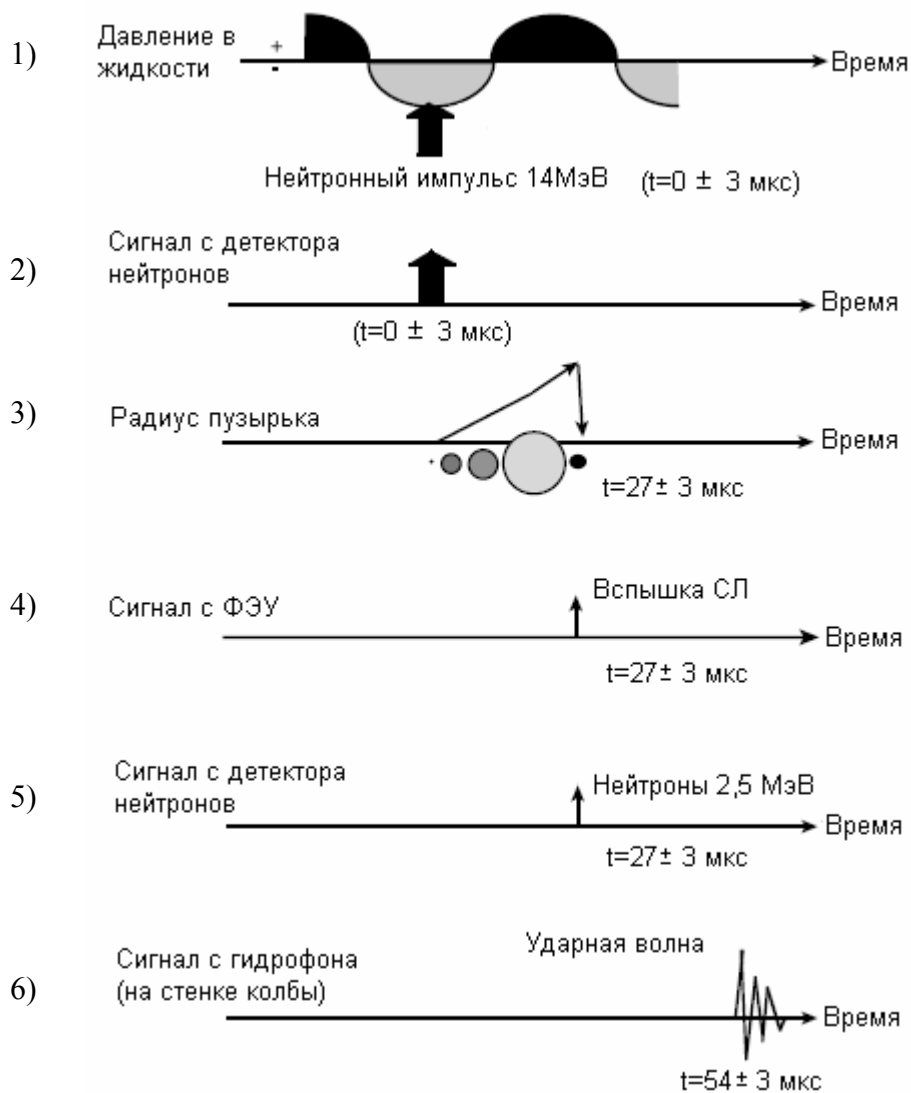


Рис.3.5. Временные диаграммы физических процессов в эксперименте Талейархана. 1 – акустическое давление и нейтронный импульс от нейтронного генератора. 2 – сигнал от первичных нейтронов на детекторе нейтронов. 3 – рост и схлопывание пузырька. 4 – сигнал СЛ на ФЭУ. 5 – сигнал счетчика вторичных нейтронов от соносинтеза. 6 – сигнал пьезодатчика от ударной воны при схлопывании пузырька.

Второе замечание состояло в том, что интервал времени между приходом импульсов СЛ и нейтронов должен составлять наносекунды, а не микро-секунды, как в приведенных данных. Третье замечание заключается в том, что нейтроны 2,5 МэВ должны наблюдаться ниже канала регистрации №10, а не №15-20, как в представленных данных.

Основным же фактором, вызывающим недоверие к результатам группы Талейархана, было использование первичных нейтронов от импульсного источника с энергией 14-МэВ для генерации микророзродышей. По утверждению критиков, зарегистрированные в экспериментах нейтроны с энергией 2,45-МэВ – это всего лишь замедлившиеся в жидкости первичные нейтроны, и не имеют отношения к соносинтезу.

С учетом всех критических замечаний оппонентов, в начале 2006 года группа Талейархана поставила еще один эксперимент [2], в котором отсутствовал источник первичных нейтронов. Вместо нейтронов использовались  $\alpha$ -частицы, получавшиеся при радиоактивном распаде ядер  $^{238}\text{U}$ , соль которого была растворена в тестовых жидкостях (смеси дейтерированных бензола и ацетона, тяжелая и обычная вода). Вместо одного детектора нейтронов в этой работе было использовано четыре, работавшие независимо друг от друга. Для проверки ослабления потока нейтронов с расстоянием, два одинаковых детектора располагались на разных расстояниях от рабочей ячейки (рис.3.6). В контрольных экспериментах использовались обычные (недейтерированные) жидкости.

Результаты снова показали наличие нейтронов соносинтеза, причем стандартное отклонение данных сононейтроны/фон составляло 14, что уже нельзя объяснить случайными факторами. Уменьшение потока нейтронов с расстоянием также показывает, что источник нейтронов расположен в кавитационной зоне.

После опубликования этой работы многие из критиков согласились, что данные эксперимента корректны. Однако не все.

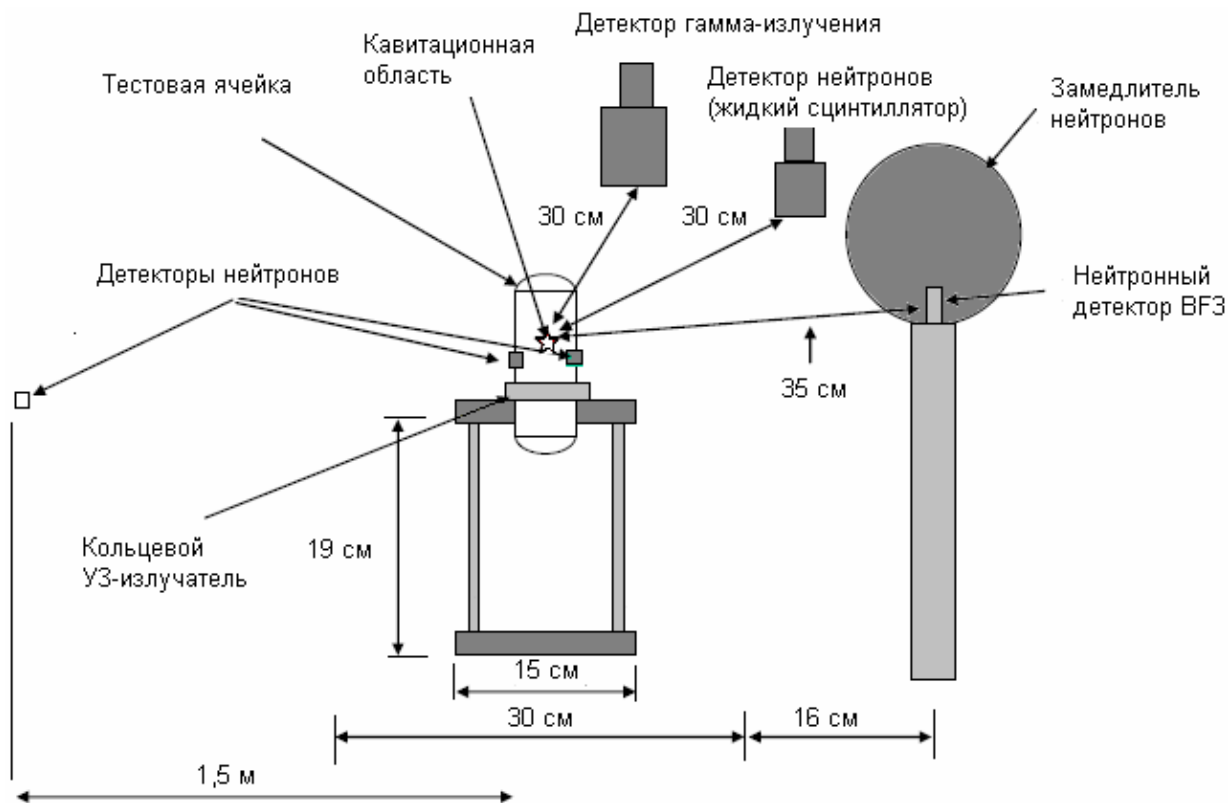


Рис.3.6. Схема экспериментальной установки из работы [14].

Аспирант из группы Паттермана Брайен Наранджо (Brian Naranjo), исследуя спектр нейтронов полученный в эксперименте (рис.3.7), обнаружил, что он очень напоминает спектр нейтронов, испускаемый стандартным источником нейтронов на основе калифорния-252 [2,4,6]. По некоторым частным сообщениям, такой источник действительно находился в лаборатории Талейархана, в шкафу на расстоянии 15 футов от установки. Однако в таком случае неясно, каким образом имело место ослабление нейтронного потока пропорционально квадрату расстояния от установки, как утверждает в работе авторов эксперимента [2].

В последней статье группы Паттермана [35] (февраль 2007) не отвергается принципиальная возможность соносинтеза, однако отмечается, что для его осуществления требуется специальный подбор тестовой жидкости, обладающей низким давлением насыщенных паров. Авторы [35] на основании



проведенных экспериментов утверждают, что нейтронный сигнал в работах Талейархана [1] должен быть в 10 тысяч раз ниже заявленного авторами.

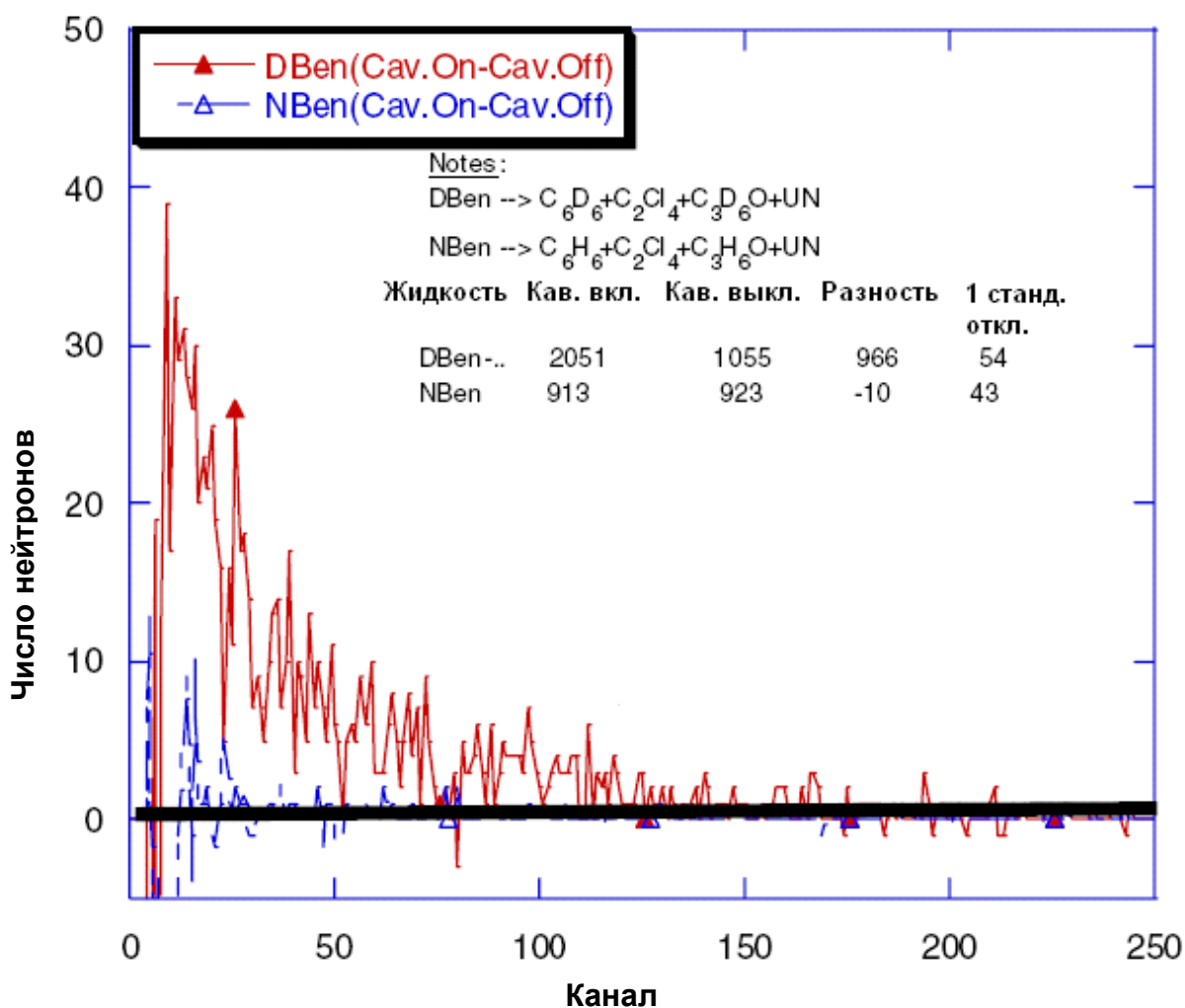


Рис.3.7. Типичные спектры нейтронов, полученные в работе [2] для нормального (NBen) и дейтерированного (DBen) бензола при включенном (Cav. On) и выключенном (Cav. Off) ультразвуке. Интервал сбора данных – 300 секунд.

Что касается механизма реакций соносинтеза, то по умолчанию считается, что его природа – горячий термоядерный синтез по каналам реакций (3.1, 3.2). По-видимому, такое мнение основано на расчетах академика РАН Р.И. Нигматулина (он входит в группу Талейархана), из которых следует, что мощная ударная волна, возникающая в сжатом газе, способна нагреть центральную область пузырька до  $10^8 K$ , т.е. вполне достаточно для инициирования ТЯС по обычным, «горячим» каналам [32,33].

Альтернативный механизм предложен недавно в работе [34]. Для объяснения выхода нейтронов в опытах Талейархана авторы привлекли гипотезу электрического разряда в пузырьке. Рассмотрена простейшая модель пузырька, одна полусфера которого заряжена положительно, а вторая – отрицательно, с плотностью заряда  $10^{10}$ - $10^{11}$  электронов/см<sup>2</sup>. На начальной стадии расширения пузырька давление и температура внутри пузырька велики ( $p \sim 1000$  атм,  $T > 10^3$  К). Высокое давление препятствует электроразряду на этой стадии, а высокая температура увеличивает электропроводность, что способствует релаксации зарядов на стенке пузырька. И только когда радиус пузырька увеличивается настолько, что параметры газа в нем становятся близкими к нормальным условиям (1 атм, 300 К), реализуются условия для пробоя. По расчетам авторов, дейтроны разгоняются в искровом промежутке до 1,8-8,9 кэВ, что достаточно для объяснения наблюдаемого в экспериментах выхода нейтронов. Предложенная гипотеза, безусловно, представляет интерес, однако, согласно ее электроразрядному механизму, нейтроны должны генерироваться в фазе расширения пузырька, а не при максимальном сжатии, как это наблюдалось экспериментально.

Таким образом, ситуация вокруг «ультразвукового термояда» сложилась весьма интригующая. По некоторым сообщениям, взаимоотношения научных групп Талейархана и Паттермана связаны с вопросами приоритета открытия соносинтеза. Напомним, что Паттерман является патентообладателем на соносинтез в режиме SBSL (US № 5 659 173, 1997 г.), который не включает в формулу изобретения методы Талейархана. Таким образом, личные отношения ведущих исследователей соносинтеза, вероятно, и определили форму и содержание их научного спора.

В настоящее время нет ни однозначного опровержения, ни подтверждения возможности соносинтеза. Для ответа на этот важнейший вопрос необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, которые не на статистическом уровне значимости, а совершенно однозначно ответили бы на все поставленные вопросы.

### Список литературы к разделу 3

1. Taleyarkhan R. P., West C. D., Cho J. S., Lahey R. T., Nigmatulin R. I. and Block R. C. (2002). Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation // *Science*. – 2002. – V. **295**. – P.1868-1873.
2. Taleyarkhan R. P., West C. D., Lahey R. T., Nigmatulin R. I., Block R. C. and Xu Y. (2006). Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation // *Phys. Rev. Lett.*- 2006. - V.**96**, 034301.
3. Naranjo B. (2006). Comment on "Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation" // *Phys. Rev. Lett.* 2006. –V. **97**. – 149403;
4. Naranjo B. (2006). Comment on “Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation” // <http://arXiv:physics/0603060>.
5. Putterman S.J., Crum L.A. and Suslick K.. (2002). Comments on “Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation” by R.P. Taleyarkhan et al., *Science* 295, 1868, March 8, 2002 // <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0204065>.
6. Naranjo B. (2006). Supplementary Methods for “Comment on «Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation»” <http://arxiv.org/abs/physics/0609083>;
7. Царев В.А. Низкотемпературный ядерный синтез //УФН. – 1990. - Т.**160**. - №11. - С.1-53.
8. Fleischmann M. and Pans S. (1989). //J. Electroanal. Chem. - 1989. - V.**261**. - P. 301; Erratum, 1989. V.263. P.187.
9. Jones S. E., Palmer E. P., Czirr J. B. et al. // *Nature*. - 1989. - V.**338**. - P. 737.
10. Царев В.А. (1991). Новые данные по низкотемпературному ядерному синтезу (по материалам конференции в Прово, шт. Юта, США, 22 - 24 октября 1990 г.) // *УФН*. – 1991. - Т.**161**. №4. – С.152-177.
11. Анисимов С. И., Беспалов В. Е., Вовченко В. И. и др. (1980). Генерация нейтронов при взрывном инициировании DD-реакции в конечных мишенях //Письма в ЖЭТФ. - 1980. -Т.**31**. - №1. - С.67-70.

12. Вовченко В. И., Гончаров А. С., Касьянов Ю. С. и др. (1977). Генерация термоядерных нейтронов при лазерном воздействии на конические мишени // Письма в ЖЭТФ.-1977. -Т.26. - №9. - С. 628-630.

13. Липсон А.Г., Саков Д.М., Ключев Б.В. и др. (1989). Генерация нейтронов при механическом воздействии на титан в присутствии дейтерированных веществ // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - Т.49. - №11. - С. 588-590.

14. Быков А.А., Великодный В.Ю., Гришин В.Г. и др. (2006). Экспериментальное исследование электрических разрядов в дейтерированных пористых электролитах // XXXIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 13 – 17 февраля 2006г.

15. Александров А.Ф., Батенин В.М., Баранов Д.С. и др. (2006). Экспериментальное определение выхода нейтронов при обжати микропористой тяжелой воды ударной волной при взрыве проволоочки кольцевой конфигурации. // XXXIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 13 – 17 февраля 2006г.

16. Розанов В.Б. (2004). О возможности сферического сжатия мишеней с термоядерным горючим при использовании для облучения двух лазерных пучков //УФН. - 2004. – Т.174. - №4.- С.373-382.

17. Naranjo B., Gimzewski J.K. and Putterman S.J. (2005). Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal // Nature/ - 2005. -V.434. P.1115-1117.

18. Geuther J., Danon Y. and Saglime F. (2006). Nuclear Reactions Induced by a Pyroelectric Accelerator // Phys. Rev. Lett. V.96. – 054803.

19. Zweiback J., Smith R. A., Cowan T. E. et. al. (2000). Nuclear Fusion Driven by Coulomb Explosions of Large Deuterium Clusters // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V.84. - P.2634–2637.

20. Last I. and Jortner J. (2006). Nucleosynthesis Driven by Cluster Coulomb Explosion // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V.97. - 173401.

21. Бабич Л.П. (2006). Генерация нейтронов в гигантских восходящих атмосферных разрядах // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т.84. - №6. - С. 345-348.

22. Haug B. and Högaasen H. (1995). Sonoluminescence from deuterium bubbles in heavy water // UIO/PHYS/95-08. - 1995. - ISSN-0332-5571.
23. Chakravarty A., Georghiou T., Phillipson T. E. and Walton A.J. (2004). Stable sonoluminescence within a water hammer tube // Phys. Rev. E. – 2004. – V.**69**. - 066317.
24. Лимарь В.В., Позюков Ю.П., Хаврошкин О.Б. (1977). О возможности рентгеновского излучения кавитационной полостью // IX Всесоюзная акустическая конференция АН СССР. - М.: 1977. - С. 65-68.
25. Липсон А.Г., Дерягин Б.В., Ключев В.А. и др. (1992). Инициирование ядерных реакций синтеза при кавитационном воздействии на дейтерийсодержащие среды // ЖТФ. - 1992.- Т.**62**. - №12. - С.121-130.
26. Nomura S. and Toyota H. (2003). Sonoplasma generated by a combination of ultrasonic waves and microwave irradiation // Appl. Phys. Lett. – 2003. – V.**83**. – P.4503.
27. Masanori Sato, Hideo Sugai, Tatsuo Ishijima et. al. (2005). Condition of Multibubble Sonofusion and Proposal of Experimental Setup // arXiv:physics/0508191. - 26 Aug 2005.
28. Brenner M. P., Hilgenfeldt S. and Lohse D. (2002). Single-bubble sonoluminescence // Rev. Mod. Phys. –2002. - V.**74**. - P.425–483.
29. Shapira D. and Saltmarsh M. (2002). Nuclear Fusion in Collapsing Bubbles—Is It There? An Attempt to Repeat the Observation of Nuclear Emissions from Sonoluminescence // Phys. Rev. Lett. - 2002. – V.**89**. – 104302.
30. Geisler R., Schmidt-Ott W.-D., Kurz T. and Lauterborn W. (2004). Search for neutron emission in laser-induced cavitation // Europhys. Lett. –2004. V.**66**. – P.435-440.
31. Xu Y. and Butt A. (2005). Confirmatory experiments for nuclear emissions during acoustic cavitation // Nuclear Engineering and Design. – 2005. – V.**235**. - P.1317-1324.

32. Nigmatulin R., Akhatov I., Topolnikov A. et. al. (2005). Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion // *Phys. Fluids*. - 2005. V.17. - 107106.

33. Taleyarkhan R. P., Cho J. S., West C. D., Lahey R. T., Nigmatulin R. I., Block R. C. (2004). Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation // *Phys. Rev. E*. – 2004. V.69. - 036109.

34. Липсон А.Г., Кузнецов В.А., Майли Дж. (2004). Выход DD-реакции в процессе электрического пробоя кавитационных пузырьков в диэлектрических дейтерированных жидкостях // *Письма в ЖТФ*. – 2004. -Т.30. - №10. - С.39-45.

35. Camara C. G., Hopkins S. D., Suslick K. S., Putterman S. J. (2007). Upper Bound for Neutron Emission from Sonoluminescing Bubbles in Deuterated Acetone // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. - V.98. – 064301.