

## Холодный ядерный синтез. Проблемы и модели.

Ю.Л. Ратис

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
Институт систем обработки изображений РАН  
Самарский научный центр Российской академии наук

### Аннотация

В работе дан обзор современного состояния проблемы холодного ядерного синтеза, и приведены аргументы в пользу новой модели этого явления, полностью согласующейся с известными законами ядерной физики.

### Преамбула

Официальная наука до сих пор считает невозможными превращения химических элементов в различных электроразрядных экспериментах с проволоками и фольгами, изготовленными из стабильных изотопов титана, вольфрама и других металлов. Научная общественность также отрицательно относится к трактовке результатов экспериментов с дейтерированным палладием, к интерпретации опытов по плавлению циркония электронным пучком и т.д. Редколлегия рейтинговых научных изданий обычно объявляют результаты исследований «низкоэнергетической трансмутации химических элементов» и «холодного ядерного синтеза» (ХЯС) лженаучными, или считают ошибкой эксперимента. «Крамольные» работы, как правило, не публикуют. На протяжении 80 лет фактически замалчиваются результаты нестандартных исследований, из которых следует однозначный вывод – и низкоэнергетическая трансмутация химических элементов, и холодный ядерный синтез существуют. И многочисленные группы энтузиастов в различных уголках земного шара продолжают проводить исследования этих феноменов.

Согласно наиболее распространенному в научной и околонуучной литературе определению, низкоэнергетические ядерные реакции (общепринятая аббревиатура LENR, т.е. low energy nuclear reactions) – это такие ядерные реакции, при которых трансмутация химических элементов протекает при сверхнизких энергиях, и не сопровождается появлением жесткого ионизирующего излучения.

Под холодным ядерным синтезом [1] обычно понимают реакцию слияния ядер изотопов водорода при температуре  $T_{cf} \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$  (*cf*- cold fusion), существенно меньшей, чем в термоядерных реакциях  $T_{cf} = T_m \sim 10^8 - 10^9 \text{ }^\circ\text{K}$  (*tn*- thermonuclear). К великому сожалению, основная масса физиков LENR от ХЯС не отличает.

Существует расхожее мнение, что такие процессы строго запрещены законами ядерной физики. Это мнение было даже узаконено решением комиссии по лженауке при Президиуме РАН в конце 90-х годов XX века, и озвучено тогдашним ее руководителем, академиком Э.П. Кругляковым. В результате к разряду лженауки оказались причислены классические научные работы. Например, под определение LENR, данное Комиссией, подпадает электронный захват, открытый Л.У. Альваресом в 1937 году [2]. Обратная ему реакция, так называемый  $\beta$ - распад в связанное состояние, также, несомненно, относится к LENR- процессам. Первое упоминание о нем датировано 1947 годом [3]. Теория  $\beta$ -распада в связанное состояние была создана в 1961 году [4]. Этот процесс был исследован экспериментально коллаборацией GSI в 90-е годы прошлого века [5,6]. Кинетика реакций в холодной радиоактивной плазме, обусловленных  $\beta$ - распадом в связанное состояние, исследована в [7].

Но и это еще не все. В 1957 году в ядерном центре в Беркли было открыто явление  $\mu$ - катализа ядерных реакций синтеза в холодном водороде! Группу экспериментаторов возглавлял все тот же неутомимый Л.У. Альварес [8]. Другими словами, согласно [2] и [8], как «низкоэнергетическая трансмутация химических элементов», так и «холодный

ядерный синтез» (а это не совсем одно и то же) были открыты одним и тем же ученым. За эти открытия он и был удостоен Нобелевской премии по физике в 1968 году. Так что российская Комиссия по лженауке слегка перестаралась в своей борьбе «за чистоту рядов». Случай, когда на столь высоком уровне оказалось де-факто аннулированным решение Нобелевского комитета, не имеет прецедентов в истории науки!

Девиантное поведение научного сообщества в отношении проблем LENR и ХЯС не заканчивается на пренебрежении мнением Нобелевского комитета. Если Вы откроете журнал «Успехи физических наук» т. 71. вып. 4. за 1960 год, то Вы найдете там обзор Я.Б. Зельдовича (академик, трижды Герой социалистического труда) и С.С. Герштейна (академик) под названием «Ядерные реакции в холодном водороде» [1]. В этом обзоре имеется краткое изложение предыстории открытия, а также ссылка на практически недоступную работу А.Д. Сахарова [9]<sup>1</sup>.

В обзоре [1] упоминается, что явление ХЯС (т.е.  $\mu$ -катализ в холодном водороде) было предсказано Ф.Ч. Франком [10] (член Лондонского Королевского общества), а также А.Д. Сахаровым (академик, трижды Герой социалистического труда, лауреат Нобелевской премии мира) [9] и упомянутым выше Я.Б. Зельдовичем [11]. К слову, великое трио советских ученых – создатели отечественного термоядерного оружия. И, несмотря на это, академик Э.П. Кругляков объявил ХЯС лженаукой, хотя о  $\mu$ -катализе и пьезоядерных реакциях в статье «Ядерные реакции в холодном водороде» написано достаточно ясно и подробно для того, чтобы понять, что таковые существуют (см. Приложение 1).

Единственное, что может в какой-то степени служить оправданием чрезмерно вольного обращения с терминологией, используемой Комиссией по лженауке в научной и политической полемике, так это то, что ее нападки на «трансмутаологов» в основном были направлены на пресечение любых исследований в конкретной области ядерной физики – работ по реакциям холодного ядерного синтеза в конденсированных средах (CMNR - condensed matter nuclear reactions). К сожалению, при этом «под раздачу» попали весьма перспективные научные направления. Как показал анализ истории CMNR, уничтожение этого научного направления Комиссия по лженауке при Президиуме РАН осуществляла отнюдь не бескорыстно. Расправа велась с очень опасным конкурентом, победа которого в научном споре могла означать полное прекращение бюджетного финансирования работ по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС). В условиях экономического кризиса 90-х годов это означало бы закрытие многих НИИ, входящих в структуры РАН. Академия наук допустить этого не могла, и не стеснялась в выборе средств борьбы с конкурентами. Но и это – только одна, и, похоже, не самая главная причина, по которой ХЯС оказался «гадким утенком» от ядерной физики. Любой специалист, хорошо знакомый с проблемой УТС, может подтвердить, что теоретические запреты на явления LENR и ХЯС являются столь серьезными, что преодолеть их не представляется возможным. Именно этот аргумент повлиял на отношение большинства физиков к обсуждаемой проблеме. Именно ясное понимание того, насколько серьезны аргументы теоретиков, заставляло многих, даже в высшей степени квалифицированных физиков, с порога отметить любые сообщения об экспериментальном обнаружении LENR, ХЯС или CMNR.

Продолжительное игнорирование большинством физиков экспериментально подтвержденного факта существования низкоэнергетических ядерных процессов является прискорбным заблуждением. Описываемые процессы многие ученые до сих пор относят

---

<sup>1</sup> На отчет 1948 года «Пассивные мезоны» широко ссылаются во всей мировой литературе по мюонному катализу. Этот отчет объемом 5 страниц был немедленно засекречен сразу же после его появления на свет. Первое упоминание о нем появилось в печати в 1957 году в совместной работе Зельдовича и Сахарова «О реакциях, вызываемых мю-мезонами в водороде», а затем в 1960 году в обзоре [1] Зельдовича и Герштейна «Ядерные реакции в холодном водороде». После скоростной смерти Андрея Дмитриевича отчет нашли в архивах ФИАНа. С него сняли гриф секретности, и он был опубликован в 1995 году.

к разряду несуществующих по известному принципу: «этого не может быть, потому, что этого не может быть никогда». К этому следует добавить, что кроме «эффекта шорности», заставлявшего профессиональных физиков-ядерщиков скептически относиться к самой возможности низкоэнергетической трансмутации химических элементов и холодного ядерного синтеза, зловещую роль в прохладном отношении профессионалов к излагаемой тематике сыграли различного рода «трансмутаологи», претендовавшие на изобретение нового «философского камня». Непрофессионализм «новых алхимиков» и вызываемое ими раздражение у профессионалов, хорошо знакомых с сутью проблемы, привели к тому, что исследования в перспективной области человеческого знания оказались замороженными на десятилетия.

Однако в процессе яростной критики работ «трансмутаологов» ученые, высказывавшие официальную точку зрения на проблему холодного ядерного синтеза, нечаянно подзабыли, что термин «лженаука» означает скорее похвалу, нежели осуждение. Ведь давно известно, что вся современная наука родом из лженауки. Физика – из метафизики, химия – из алхимии, медицина – из знахарства и шаманства. Думаю, нет особого смысла перечислять многочисленные конкретные примеры. Но то, что идеи Джордано Бруно, Галилео Галилея и Николая Коперника считались их современниками не просто лженаучными, а сущей ересью, забывать не стоит. Так уже бывало и в новейшей истории. При И.В. Сталине в СССР с генетикой (продажная девка империализма) и кибернетикой (прислужница буржуазии). В настоящее время в похожую историю попала физика холодного ядерного синтеза и низкоэнергетической трансмутации химических элементов, и отнюдь, не в одной России!

Справедливости ради надо отметить, что комиссия по лженауке, аналогичная российской, имеется и в США. Работает она точно так же, как и в РФ. Причем в законопослушной Америке запрет на федеральное финансирование «лженаучных» исследований является абсолютным, а в России эти запреты некоторые особо ушлые деятели науки ухищряются каким-то образом обходить. Впрочем, и в других странах тоже.

Пока официальная российская наука избавлялась от лжеученых, американские, французские и японские конкуренты не теряли времени даром. Например, в Соединенных штатах Америки исследования холодного синтеза были объявлены лженаукой только для гражданских лиц. В лабораториях военно-морского флота США исследования велись с начала 90-х годов XX века. Более 300 физиков и инженеров практически вслепую, не имея сколько-нибудь приемлемой теории ХЯС, почти 20 лет работали в Ливерморе над созданием установок холодного ядерного синтеза. Их усилия увенчались созданием опытных образцов энергетических реакторов ХЯС мощностью около 1 МВт.

В настоящее время в США налажен выпуск промышленных образцов генераторов на палладий-дейтериевых элементах. Они работают на Аляске, и снабжают электрической энергией базовые станции мобильной связи. ХЯС – это уже давным-давно не наука. Это инженерная практика, притом, успешная. И только в России по-прежнему пресекаются любые попытки государственной поддержки научных работ в этом направлении.

Сверхзадачей настоящей работы является демонстрация принципиальной возможности описания LENR, ХЯС и CMNR в терминах ортодоксальной ядерной физики.

## **1. Введение**

Основные особенности процессов низкоэнергетической трансмутации химических элементов (т.е., реакции электронного захвата) общеизвестны [2]. Менее изученный  $\beta$ -распад в связанное состояние (также представляющий собой LENR- процесс) достаточно подробно описан в работах [3-7]. То, что комиссия по лженауке при Президиуме РАН дала определение LENR, согласно которому запрещенным оказался процесс, описанный во всех учебниках физики, - не более чем забавный курьез, свидетельствующий о том, что

люди, слишком долго занимающиеся административной работой, выходят из состояния компетентности. В настоящей работе обсуждается, в основном, проблема ХЯС. Данные по LENR анализируются лишь в той степени, в которой это требуется для исследования ХЯС.

Взгляды научной общественности на проблему LENR и ХЯС сформировались на основе консенсуса в отношении трех стандартных теоретических запретов на явление низкоэнергетической трансмутации химических элементов:

1. невозможность прохождения кулоновского барьера;
2. предельно малые сечения слабых процессов;
3. малые вероятности многочастичных столкновений.

Для того чтобы в последующих рассуждениях опираться только на твердо установленные факты, ниже мы приведем численные оценки вероятностей указанных процессов в приближении «голых ядер», т.е. без учета экранировки положительного заряда ядра облаком отрицательного заряда, образованным орбитальными электронами.

Кулоновский барьер сильно влияет на величину сечения ядерных реакций при низких энергиях:

$$\sigma_r = \% \cdot |\psi_C(\mathbf{R})|^2, \quad (1)$$

где  $|\psi_C(\mathbf{R})|^2$  – квадрат кулоновской волновой функции относительного движения ядер, определяющий вероятность прохождения кулоновского барьера,  $\%$  – сечение ядерной реакции при «выключенном» кулоновском барьере, а  $\mathbf{R}$  - радиус канала.

В наивной кластерной модели [12-14] проницаемость кулоновского барьера в квазиклассическом приближении определяется формулой:

$$|\psi_C(\mathbf{R})|^2 \sim \exp \left[ -2 \int_{\mathbf{R}}^{Z_1 Z_2 e^2 / E} \mathbf{dr} \cdot \mathbf{k}(\mathbf{r}) \right], \quad (2)$$

где  $\mathbf{k}(\mathbf{r})$  - волновой вектор дейтрона под барьером:

$$\mathbf{k}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\mathbf{R}} - E \right)}, \quad (3)$$

$\hbar$  - постоянная Планка,  $m$  - приведенная масса сталкивающихся ядер,  $E$  - их кинетическая энергия в системе центра масс,  $Z_1$  и  $Z_2$  - зарядовые числа ядер,  $e$  - модуль заряда электрона.

Более точная оценка проницаемости барьера гласит [14]:

$$P_I \approx \frac{\rho}{G_I^2(\rho, \eta)} = \zeta_I \cdot \exp(-2 \cdot C_I), \quad (4)$$

где  $G_I(\rho, \eta)$  - нерегулярная кулоновская функция, а  $\zeta_I$  и  $C_I$  рассчитываются по формулам:

$$\zeta_I = \left( L^2 + \frac{1}{4} \mathbf{x}^2 - \rho^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

и

$$C_I = \eta \cdot \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin \left( \frac{\eta - \rho}{\sqrt{\eta^2 + L^2}} \right) \right] - \zeta_I + L \cdot \ln \left( \frac{L \zeta_I + L^2 + \mathbf{x}^2 / 8}{\rho \sqrt{\eta^2 + L^2}} \right), \quad (6)$$

причем  $L = I + \frac{1}{2}$  и  $\mathbf{x} = (8\rho\eta)^{1/2}$ . Кроме того, согласно [14]:

$$\rho = \mathbf{kR} = 0.21954 \cdot m^{1/2} \cdot E^{1/2} \cdot \mathbf{R} \quad (7)$$

$$\eta = 0.158052 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot m^{1/2} E^{-1/2} \quad (8)$$

$$\mathbf{x}^2 = 8\rho\eta = 0.069396 \cdot m \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot \mathbf{R} \quad (9)$$

где  $m = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$  - приведенная масса в единицах массы протона;  $Z_1$  и  $Z_2$  - заряды взаимодействующих частиц в единицах модуля заряда электрона;  $E$  - энергия относительного движения частиц в системе центра тяжести, выраженная в МэВ,  $R$  - радиус канала в единицах ферми.

Для теплового дейтрона  $E \approx 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ MeV}$ , радиус канала  $R \sim 2 \text{ fm}$ ,  $m = 1$ ,  $Z_1 = Z_2 = 1$ . Следовательно  $\rho \approx 6.9 \cdot 10^{-5}$ ,  $\eta \approx 10^3$ ,  $x = 0.373$ . Поэтому в оценочных расчетах следует положить

$$\begin{cases} C_1 \approx \pi\eta \approx 3140 \\ \zeta_1 \approx 0.5 \end{cases}, \quad (10)$$

откуда немедленно вытекает оценка проницаемости кулоновского барьера:

$$P_1 \sim 0.5 \cdot \exp(-6280) \sim 10^{-2730} \quad (11)$$

Вероятность ядерной реакции в единицу времени, отнесенная к одному дейтрон-снаряду, определяется формулой:

$$W_n \approx n v \sigma_r, \quad (12)$$

где  $n$  – концентрация дейтронов-мишеней, а  $v$  – скорость столкновения ядер при энергии  $E$ . При малых (в том числе, тепловых) энергиях  $v \approx \text{const}$ .

Даже если предположить, что для тепловых дейтронов величина  $n v$  не мала, то фактор проницаемости барьера  $P_1$  при  $E \approx 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ MeV}$  все равно настолько мал, что за все время существования Вселенной не может произойти ни одной реакции  $dd$  на тепловых дейтронах. Еще раз подчеркнем, что в оценке (11) не учтен эффект экранировки.

Влияние экранировки на сечение реакции синтеза ядер, входящих в состав атомов в молекулах и мезомолекулах изотопов водорода, исследовалось еще в начале 50-х годов XX века [1]. Расчеты показали, что в холодном газе, состоящем из молекул водорода  $H_2$  или из молекул, содержащих тяжелые изотопы водорода, - дейтерий или тритий - реакция синтеза невозможна. Напротив, в мезомолекулах  $pd\mu$ ,  $dd\mu$  и  $pt\mu$  эффект экранировки электрического заряда ядер мюонным облаком приводит к столь сильному увеличению проницаемости кулоновского барьера для протонов, дейтронов и тритонов, что реакция холодного синтеза наблюдается экспериментально [8].

Оценка влияния экранировки на сечение реакции ХЯС в конденсированных средах в рамках феноменологической модели Киркинского – Новикова была получена в работах [15-18]. Она оказалась весьма значительной, но совершенно недостаточной для того, чтобы без нарушения известных законов физики объяснить явление ХЯС.

Таким образом, общий вывод о радикальном характере кулоновского запрета холодного синтеза на данном этапе рассмотрения остается в силе. Исключение составляют реакции в холодном водороде, протекающие за счет  $\mu$ - катализа, а также так называемые пьезоядерные реакции, идущие при высоких давлениях [1].

Обсудим теперь величину скоростей реальных слабых процессов. Для того чтобы избежать сложных теоретических расчетов, будем исходить из размерных соображений и опытных значений времен жизни радиоактивных ядер, захватывающих электрон. Время жизни многих ядер, нестабильных по отношению к электронному захвату, измеряется годами. Однако существуют и такие ядра, время жизни которых составляет минуты, и даже секунды. Например, ядро вольфрама  $^{173}_{74}\text{W}$  захватывает электрон, и превращается в  $^{173}_{73}\text{Ta}$ , за 16.5 минуты [19]. Для порядковой оценки примем, что скорость электронного захвата составляет один переход в секунду. Выражение для скорости  $\beta$ - перехода в соответствии с принципом физической размерности имеет вид:

$$W_w : \mu \Delta E / \hbar, \quad (13)$$

$\Delta E$  - энергия, высвобождающаяся при переходе, а  $\mu$  - безразмерная константа. Двойные и тройные  $\beta$ - переходы будут определяться второй и третьей степенью  $\mu$ , то есть  $\mu^2$  и  $\mu^3$ . Применим соотношение (13) для анализа результатов работы [20], согласно которой при электровзрыве титановой фольги изотопный состав титана меняется почти на 4%.

Постоянная Планка в единицах МэВ·с равна  $\hbar = 0.65817 \cdot 10^{-21} \text{ MeV} \cdot \text{s}$ . Отсюда для  $W_w = 1 \text{ s}^{-1}$  и  $\Delta E = 1 \text{ MeV}$  мы получаем  $\mu : 10^{-21}$ . Характерное время протекания тока при электровзрыве составляет примерно  $10^{-5} \text{ s}$ . Поэтому даже при такой высокой скорости слабых переходов трансмутировать может не более тысячной доли процента ядер титана. Если же учесть, что по современным представлениям при трансмутации происходит, два слабых перехода на ядро, то скорость двойных переходов составляет :  $10^{-21} \text{ s}^{-1}$ . Этого явно недостаточно для внятного объяснения наблюдавшихся в работе [20] изменений изотопного состава титана.

Последний запрет – кинематический, определяется малым размером ядер даже для трехчастичных соударений. В самом деле, вероятность попадания пары частиц в объем  $V$ , занимаемый третьей частицей, составляет  $V^2/V_{tot}^2$ , где  $V_{tot}$  полный объем, занимаемый  $N$  частицами. Количество двойных комбинаций из  $N$  частиц будет равно  $N^2/2$ . Таким образом, в объеме  $V$  всегда находится  $V^2 n^2/2$  троек частиц. Для оценки порядка частоты трехчастичных соударений нужно последнюю величину разделить на характерное время нахождения в этом объеме:

$$W_k : V^2 n^2 / 2\tau. \quad (14)$$

Поскольку у нас имеется два параметра с размерностью длины: размер  $R$ , определяющий объем  $V$ , и среднее расстояние между частицами  $n^{-1/3}$ , то характерное время  $\tau$  определяется интервалом от  $n^{-1/3}/v$  до  $R/v$ . Для оценок примем завышенную частоту трехчастичных соударений по самому короткому времени  $\tau = R/v$ , и используем это значение для оценки экспериментальных результатов [20]. Оценивая размер ядра  $R$  в  $10^{-12} \text{ sm}$ , кинетическую энергию ядер титана в  $1 \text{ eV}$ , и подставляя в формулы плотность металлического титана, получаем  $W_k : 10^{-14} / \text{сек}$ . Поэтому вероятность трехчастичных столкновений, отнесенная к одному атому, за время эксперимента будет иметь масштаб  $\sim 10^{-19}$ , тогда как наблюдаемое значение  $\sim 0.01$ . То есть трехчастичных соударений также недостаточно для образования наблюдаемого количества элементов – продуктов ядерных превращений.

Из приведенных выше оценок следует однозначный вывод. Для того чтобы ХЯС из несбыточной мечты об источнике даровой энергии превратился в физическую реальность, пригодную для использования инженерами и технологами, необходимо, чтобы, по каким-то причинам, либо размеры атомов дейтерия и их ядер-дейтронов стали близки по порядку величины, либо заряд дейтронов был практически полностью экранирован. Лишь в этом случае волновые функции дейтронов - ядер атомов дейтерия,- входящих в состав дейтерированных веществ, могут перекрыться достаточно сильно даже при тепловых энергиях.

Подводя итоги краткого введения в проблему можно сказать, что перечисленные выше запреты на LENR- и ХЯС- процессы (с некоторыми оговорками) представляются принципиально непреодолимыми! В то же время в настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал, однозначно свидетельствующий о том, что кроме реакции электронного захвата,  $\beta$  - распада в связанное состояние,  $\mu$  - катализа и пьезоядерных

реакций, существуют и другие LENR - и ХЯС - процессы, включая такие, которые можно использовать для создания новых технологий.

В соответствии с вышесказанным в цели настоящей работы входит:

- 1) критический анализ результатов экспериментов, в которых было заявлено обнаружение LENR и ХЯС;
- 2) критический анализ существующих теорий этих явлений;
- 3) объяснение результатов LENR- и ХЯС- экспериментов на основе известных законов физики;
- 4) разработка схем относительно недорогих экспериментов, позволяющих исследовать особенности реакции холодного ядерного синтеза в условиях небольшой лаборатории.
- 5) оценка перспектив использования ХЯС при создании новых технологий в энергетике.

## 2. Разрешенные процессы LENR и ХЯС

Далее везде для краткости будем говорить о LENR и ХЯС в чистом дейтерии и в дейтерированных веществах, хотя многие выводы из дальнейшего анализа применимы и к другим изотопам водорода.

В соответствии с оценками и выводами, сделанными во Введении, имеются следующие «законные» возможности осуществления реакций ядерного синтеза:

а) сообщить взаимодействующим дейтронам скорость, достаточную для преодоления кулоновского барьера. Разогнать дейтроны можно путем нагрева плазмы (неуправляемые термоядерные реакции, управляемый термоядерный синтез), а также с помощью ускорителей заряженных частиц. Термоядерное оружие создано в начале 50-х годов XX века. Проблема УТС не решена и поныне. Затраты энергии на разгон дейтронов на ускорителях настолько велики, что их использование для получения энергии с помощью реакций ядерного синтеза нецелесообразно. КПД таких установок отрицателен.

б) уменьшить размеры атомов настолько, чтобы волновые функции нуклонов в ядрах соседних атомов в молекуле дейтерия перекрылись даже при температуре  $T \sim 300 \text{ }^\circ\text{K}$ , и реакция синтеза пошла с достаточной для практического использования вероятностью. Такую возможность дают мюонный катализ и сверхвысокое давление ( $\sim 10^8 - 10^9 \text{ atm}$ ).

В первом случае энергетический выход реакции не покрывает затрат энергии на создание мюонов на ускорителях (мезонных фабриках) [1].

Во втором случае огромное внешнее давление, необходимое для того, чтобы сжать электронные оболочки атомов до нужных размеров, возникает, как правило, в недрах звезд под действием силы тяжести. С принципиальной точки зрения такое высокое давление в земных условиях можно создать на короткое время с помощью взрывчатых технологий. В частности, процесс «сахаризации» позволил в начале 50-х годов прошлого века создать термоядерное оружие, размеры которого допускают доставку до цели при помощи авиационной или ракетной техники. Однако в термоядерной бомбе протекает неуправляемая термоядерная реакция, не имеющая отношения к проблеме ХЯС. Обжим образцов дейтерированных веществ при помощи взрыва неядерных зарядов в открытой научной литературе практически никогда не обсуждался. О пьезоядерных реакциях при высоких давлениях вкратце упоминается в обзоре [1] (см. ниже). Но самое любопытное – это то, что «лазерный термояд», за создание которого принималась команда советских физиков под руководством лауреата Нобелевской премии, к величайшему сожалению, ныне покойного, бывшего директора всемирно известного ФИАНа, академика Николая Геннадьевича Басова, в гораздо большей степени относится к пьезоядерным реакциям, чем к термоядерным. Ведь главная идея лазерного синтеза состояла как раз в том, чтобы в результате взаимодействия лазерного излучения с облаткой, внутри которой находится

дейтерий, внешние оболочки буллета испарились, а импульс отдачи сжал его содержимое до плотности, необходимой для начала реакций ядерного синтеза с участием дейтронов.

в) любым способом экранировать заряд дейтрона настолько, чтобы он уменьшился до величины, при которой туннелирование теплового дейтрона через кулоновский барьер происходит с достаточной для наблюдения реакции вероятностью<sup>2</sup>.

г) используя известные законы физики, реализовать каким-либо образом комбинацию перечисленных выше механизмов осуществления ядерных реакций при низких и сверхнизких энергиях.

Перейдем к анализу перечисленных выше возможностей.

### 2.1. Мюонный катализ

Впервые на возможность ядерных реакций между изотопами водорода, связанными в мезомолекулу, указал Ф.Ч. Франк [10]. Эта идея была высказана в связи с опытами, в которых были открыты  $\pi$ - мезоны, точнее, установлено их отличие от  $\mu$ - мезонов.

До 1947 г.  $\pi$ - и  $\mu$ - мезоны, наблюдавшиеся в космических лучах, принимались за одну и ту же частицу. В 1947 г. Поуэлл, Латтес и Оккиалини обнаружили на нескольких фотопластинках треки мезонов, у которых из точки остановки выходил новый след, принадлежащий мезону с энергией  $\sim 5 \text{ MeV}$  (рис. 1).



Рис. 1. Следы мезонов в фотоэмульсии, полученный Поуэллом, Латтесом и Оккиалини в 1947 г.

Эти случаи были интерпретированы Поуэллом, Латтесом и Оккиалини на основе гипотезы о существовании двух типов мезонов. Они предположили, что первоначальный след оставил  $\pi$ - мезон, который, после остановки, распался на  $\mu$ - мезон с энергией  $E_\mu \sim 5 \text{ MeV}$  и нейтрино.

Сэр Ф.Ч. Франк рассмотрел различные возможности интерпретации фотографий Поуэлла, Латтеса и Оккиалини. В частности, он отметил, что если бы в эмульсии фотопластинок могли образовываться мезомолекулы  $pd$ , то в них возможна была бы ядерная реакция  $p + d \rightarrow {}^3\text{He}$  с передачей энергии  $5.4 \text{ MeV}$  мезону «внутренней конверсии».

Систематическое изучение ядерных реакций, вызываемых мюонами в дейтерии, начинается с работы А.Д. Сахарова [9]. Он рассмотрел реакцию  $d + d + \mu \rightarrow {}^4\text{He} + \mu$ , и оценил время жизни мезомолекулы  $dd\mu$ , как  $10^{-11} \text{ s}$ . В 1953 г. Я.Б. Зельдович независимо исследовал явление катализа ядерных реакций  $\mu^-$ - мезонами и привел первые подробные оценки связанных с этим процессом явлений [11]. В работе [11] было показано также, что вероятность ядерной реакции на лету мала, а образование мезомолекулы с вероятностью, близкой к единице, приводит к ядерной реакции. В [11] были рассмотрены механизмы и рассчитаны вероятности образования мезомолекул. В нулевом приближении был найден спектр уровней мезомолекул водорода, а также указано на возможность существования резонанса, увеличивающего вероятность образования мезомолекул и ядерной реакции на лету в том случае, когда у нее (мезомолекулы) имеется возбужденный уровень с малой энергией связи.

В 1957 году явление  $\mu$ - катализа было открыто в прямом эксперименте [8].

<sup>2</sup> Разность абсолютных величин заряда дейтрона и экранирующего заряда называют эффективным зарядом.



Геометрия задачи и эффекты экранировки чрезвычайно важны для понимания природы ХЯС. Поэтому мы остановимся на анализе  $\mu$ -катализа более подробно. Основная идея работ А.Д. Сахарова и Я.Б. Зельдовича состоит в том, что в мезомолекуле ядра атомов расположены гораздо ближе друг к другу, чем в молекуле обычного или тяжелого водорода. В самом деле, расстояние между ядрами атомов в обычной молекуле водорода или дейтерия примерно равно:

$$\mathbf{r}_{p-p}^e \sim \mathbf{r}_{d-d}^e \sim 2\mathbf{a}_e \quad (15)$$

где боровский радиус  $\mathbf{a}_e$

$$\mathbf{a}_e = \frac{\mathbf{h}^2}{m_e e^2} = 0.529 \cdot 10^{-8} \text{ sm}, \quad (16)$$

а  $m_e$  - масса электрона. Из (16) ясно видно, что в мезоатоме водорода, в котором электрон замещен мюоном, боровский радиус существенно меньше:

$$\mathbf{a}_\mu = \frac{\mathbf{h}^2}{m_\mu e^2} = 0.256 \cdot 10^{-10} \text{ sm} = 256 \cdot 10^{-13} \text{ sm} = 256 \text{ fm}, \quad (17)$$

и вследствие этого дейтроны в мезомолекуле  $dd\mu$  находятся на расстоянии

$$\mathbf{r}_{p-p}^\mu \sim \mathbf{r}_{d-d}^\mu \sim 2\mathbf{a}_\mu \sim 500 \text{ fm} \quad (18)$$

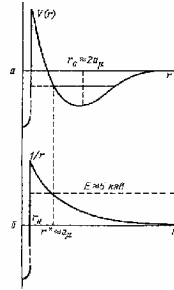
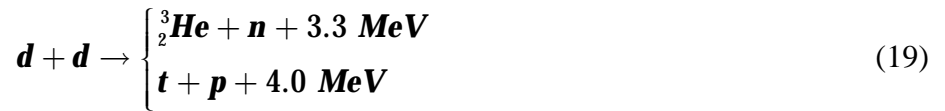


Рис. 2. Схема преодоления кулоновского барьера при синтезе ядер в мезомолекуле (а) и при столкновении ядер (б),  $\mathbf{r}^*$  - классическая точка поворота [21]

Для сближения ядер дейтерия на такое расстояние в ускорительном эксперименте требуется кинетическая энергия относительного движения порядка  $3 \text{ keV}$  (см. рис. 2). В температурной шкале это соответствует  $T \sim 3 \cdot 10^7 \text{ }^\circ\text{K}$ , что близко к критерию Лоусона [2], определяющему порог термоядерной реакции. Поэтому практически мгновенно, сразу после образования мезомолекулы  $dd\mu$ , происходит реакция слияния ядер, обусловленная сильным взаимодействием нуклонов



Характерное время реакции синтеза (19) составляет  $\tau_r \sim 10^{-9} - 10^{-12} \text{ s}$ , что существенно меньше времени жизни мюона  $\tau_\mu = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

$$\tau_r = \tau_\mu. \quad (20)$$

Очевидно, что другие изотопы водорода, входящие в состав мезомолекул, также участвуют в реакциях синтеза. Дополнительным фактором, способствующим повышению вероятности именно реакции  $dd\mu$ , является «рыхлость» дейтрона, в результате которой «хвост» его волновой функции является аномально длинным. В самом деле, дейтрон имеет энергию связи [22]:

$$|E| = 2.22452 \pm 0.00010 \text{ MeV}. \quad (21)$$

В расчетах сечений и вероятностей различных процессов с участием дейтронов чаще всего используют радиальную<sup>3</sup> волновую функцию (ВФ) Хюльтена (см., напр., [23])

$$\chi_d(\mathbf{r}) = [2\alpha(\alpha + \mu)(2\alpha + \mu)]^{1/2} \mu^{-1} \exp(-\alpha r)[1 - \exp(-\mu r)], \quad (22)$$

являющуюся точным решением радиального уравнения Шредингера

$$\left[ \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2m_d}{\hbar^2} (E - V_h(r)) \right] \chi_d(r) = 0 \quad (23)$$

с граничными условиями  $\chi_d(0) = \chi_d(\infty) = 0$ . В уравнении (23)  $m_d = \frac{m_p m_n}{m_p + m_n} \approx \frac{m_N}{2}$  - приведенная масса,  $m_p$ ,  $m_n$  и  $m_N = (m_p + m_n)/2$  - масса протона, нейтрона и нуклона, соответственно, а  $V_h(r)$  - потенциал Хюльтена [23]:

$$V_h(r) = -V_0 \frac{\exp(-\mu r)}{1 - \exp(-\mu r)} \quad (24)$$

где  $\alpha = \sqrt{m_N |E|} / \hbar \approx 0.232 \text{ fm}^{-1}$ ,  $\mu \approx 1.101 \text{ fm}^{-1}$ ,  $V_0 = 71.2 \text{ MeV}$  [23]. Заметим, что глубина потенциала Хюльтена примерно вдвое больше глубины прямоугольной ямы  $V_0 = 35.4 \text{ MeV}$  радиуса  $r_0 \approx 1.7 \text{ fm}$ . Прямоугольная потенциальная яма также нередко используется при проведении оценок сечений процессов с участием дейтронов.

Свойства мезоатомов и мезомолекул к настоящему времени изучены досконально. Исследование  $\mu$ -катализа не входит в цели настоящей работы, поэтому ниже приведены только те справочные данные, которые нам понадобятся в дальнейшем.

Атомы мезоводорода, мезодейтерия и мезотрития имеют водородоподобный спектр. Энергии нижних уровней указанных мезоатомов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Энергии 1s- уровня мезоатомов водорода (в эВ) [1]

Бесконечно тяжелое ядро	$p\mu$	$d\mu$	$t\mu$
2800	2531	2666	2714

Первые работы, в которых были рассчитаны спектры мезомолекул, датированы серединой 50-х годов XX века (подробности см. в обзоре [1]). В частности, уровни мезомолекул  $pp\mu$ ,  $pd\mu$ ,  $dd\mu$ ,  $pt\mu$ ,  $dt\mu$  и  $tt\mu$  были впервые вычислены в диссертации С.С. Герштейна с помощью аппроксимации потенциалов взаимодействия функцией Морза:

$$V_{a-b}^\mu(\mathbf{x}) = D \cdot [\exp(-2\alpha x) - 2 \cdot \exp(-\alpha x)], \quad (25)$$

где  $\mathbf{a}, \mathbf{b} = p, d, t$ ,  $\mathbf{x} = \mathbf{R} - \mathbf{R}_0$ . Набор параметров потенциала Морза подгонялся для каждого уровня мезомолекулы (см. табл. 2).

Таблица 2

Параметры потенциала Морза для вращательных уровней мезомолекулы  $dd\mu$  [1]

$K$	$R_0$	$\alpha$	$D$
0	2.09	0.67	0.104
1	2.34	0.69	0.080
2	2.76	0.75	0.046

Подчеркнем, что все параметры (энергии и расстояния) в таблице 2 приведены в мезоатомных единицах. Значения энергии связи мезомолекул представлены в таблице 3.

<sup>3</sup> ВФ дейтрона  $\psi_d(\mathbf{r}) = [\chi_d(r)/r] \cdot Y_{00}(\hat{\mathbf{r}})$  не содержит вклада  $d$ -компоненты (т.е., члена с  $l = 2$ ).

Энергии связи мезомолекул<sup>4</sup> (эВ) [1]

Вращательный уровень	$K = 0$	$K = 0$	$K = 1$	$K = 2$
Колебательный уровень	$v = 0$	$v = 1$	$v = 0$	$v = 0$
$pp\mu$	247	-	100	-
$pd\mu$	219	-	92	-
$dd\mu$	323	40	225	85

В обзоре [1] отмечается, что в случае мезомолекулы  $pp\mu$  глубины потенциальной ямы немного не хватает для существования связанного колебательного уровня  $K = 0$ ,  $v = 1$ . Поэтому для мезомолекулы  $pp\mu$  существует виртуальный уровень, приводящий к резонансу в рассеянии мезоатомов  $p\mu$  на протонах. Еще в работе [3] было показано, что наличие связанного или виртуального уровня мезомолекулы с энергией, близкой к нулю, приводит при столкновении частиц малой энергии к резонансу, существенно увеличивающему вероятность образования мезомолекул и возможность ядерной реакции на лету. Из таблицы 3 видно, что уровень  $K = 0$ ,  $v = 1$  в мезомолекуле  $dd\mu$  является резонансом.

За последующие полвека по проблеме  $\mu$ - катализа было опубликовано не менее тысячи работ. Однако ни в одной из них не были опровергнуты качественные выводы и порядковые оценки, полученные в пионерских работах А.Д. Сахарова и Я.Б. Зельдовича. Поэтому при анализе ХЯС мы ссылаемся только на концептуальные работы классиков по проблеме  $\mu$ - катализа.

## 2.2. Ядерные реакции в мезомолекулах

В настоящей работе рассмотрение  $\mu$ - катализа производится лишь в минимальном объеме, необходимом для анализа феномена ХЯС. Поэтому мы приводим оценки сечений и вероятностей только для ядерных реакций с участием дейтронов. Кроме того, в данном параграфе при расчетах вместо теоретических значений матричных элементов мы будем использовать соответствующие экспериментальные данные [1].

При малых энергиях относительного движения сталкивающихся ядер эффективное сечение реакции, идущей с образованием компаунд-ядра, имеет вид:

$$\sigma = C \cdot |\psi(0)|^2 / v, \quad (26)$$

где  $\psi(0)$  - значение волновой функции, описывающей относительное движение ядер для расстояний между ядрами порядка радиуса действия ядерных сил, а  $v$  - относительная скорость ядер на бесконечности (плотность вероятности в падающей волне предполагается нормированной на единицу). В приближении нулевого радиуса действия ядерных сил, для реакций между заряженными частицами при достаточно малой энергии

$$|\psi(0)|^2 = 2\pi\eta(e^{2\pi\eta} - 1)^{-1}; \quad 2\pi\eta \cdot e^{-2\pi\eta}, \quad (27)$$

где  $\eta = Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v$  (см. формулу (1)). Для ядер водорода и дейтерия  $Z_1 = Z_2 = 1$ , а множитель  $e^{-2\pi\eta}$  есть фактор проницаемости кулоновского потенциального барьера.

Если эффективное сечение реакции измерено в области малых энергий, то по экспериментально известному эффективному сечению можно вычислить константу реакции  $C$ . Согласно работе [26], энергетическая зависимость эффективного сечения реакций  $d + d = t + p$  и  $d + d = {}^3\text{He} + n$  при энергиях ниже  $50 \text{ KeV}$  следует формуле (26). При этом оба канала реакции практически равновероятны, и константа реакции равна [1]

$$C_{d-d} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}. \quad (28)$$

<sup>4</sup> Значения получены усреднением результатов расчетов, приведенных в [1].

Зная эту константу, можно оценить вероятность ядерной реакции в мезомолекуле:

$$w = C_{d-d} \cdot |G(0)|^2, \quad (29)$$

где  $G(0)$  - значение волновой функции, описывающей относительное движение ядер в мезомолекуле при  $R = 0$  (не путать с нерегулярной кулоновской функцией  $G_1(\eta, \rho)$ ).

В работах [1, 3] показано, что потенциал  $d-d$  взаимодействия вблизи минимума  $R_0$  можно в грубом приближении заменить осцилляторным потенциалом. Тогда радиальная функция  $g(R) = R \cdot G(R)$  для основного состояния осциллятора должна иметь вид:

$$g(R) = (\alpha / \pi)^{1/4} \exp(-\alpha \cdot (R - R_0)^2 / 2) \quad (30)$$

где в мезоатомных единицах  $\alpha = 2M_{12}E_0$ ,  $M_{12} = M_1M_2 / (M_1 + M_2)$  - приведенная масса ядер (в случае  $dd$ -реакций  $M_1 = M_2 \approx m_p + m_n$ ,  $M_{12} \approx m_N$ ),  $E_0$  - энергия основного уровня, отсчитываемая от дна потенциальной ямы, а  $R_0$  - расстояние, соответствующее минимуму потенциальной энергии. В ВКБ-приближении радиальная ВФ под барьером имеет вид:

$$g(R) = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{1/2} |Q(R)|^{-1/2} \cdot \exp\left(-\int_{R_1}^R |Q(r)| dr\right), \quad (31)$$

где в мезоатомных единицах  $Q(r) = \sqrt{2M_{12}(E - V(R))}$ ,  $R_1$  - классическая точка поворота ( $Q(R_1) = 0$ ), а в  $Q(R)$  необходимо заменить центробежную энергию  $I(I+1)/(2M_{12}R^2)$  на  $(I+1/2)^2/(2M_{12}R^2)$ . Такая замена обеспечивает правильную фазу квазиклассической функции на больших расстояниях, а также ее правильное поведение вблизи  $R = 0$ . Для малых  $R$  потенциальный барьер является кулоновским. Поэтому при замене Лангера  $I(I+1) \rightarrow (I+1/2)^2$  ВКБ-приближение с хорошей точностью применимо к кулоновскому полю отталкивания вплоть до  $R \rightarrow 0$ , а не только для  $R > h^2 / (M_{12}e^2)$ . С учетом этой поправки, радиальная ВФ в подбарьерной области имеет вид [1]:

$$g(R) = \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^{1/2} R \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\lambda(R)\right), \quad (32)$$

причем показатель подбарьерного фактора  $\lambda(R)$  равен

$$\lambda(R) = \int_R^{R_1} \left[ \sqrt{2M_{12}(E_g(r) - E_0) + \frac{1}{4r^2} - \frac{1}{2r}} \right] dr + \ln R_1, \quad (33)$$

где  $E_g(r)$  - потенциал взаимодействия ядер изотопов водорода в мезомолекуле (например, в  $dd\mu$ ), рассчитанный в адиабатическом приближении для состояния, четного по отношению к перестановке ядер [1]. В обзоре [1] приведены результаты расчетов  $\lambda(R_N)$  для мезомолекул  $pd\mu$ ,  $dd\mu$  и  $dt\mu$ . В таблице 4 представлены значения величины  $\lambda(R_N)$  для мезомолекул  $dd\mu$ . При этом в качестве радиуса действия ядерных сил брались значения в мезоатомных единицах  $R_N = 0; 0.02; 0.05$  ( $0; 0.5 \cdot 10^{-12}; 1.2 \cdot 10^{-12}$  см., соответственно).

Таблица 4

Показатель экспоненты в барьерном множителе  $\lambda(R_N)$  [1]

$R_N$	$d + d$
0	8.3
$5 \cdot 10^{-13}$ sm	7.6
$1.2 \cdot 10^{-12}$ sm	6.9

В обычных размерных величинах ВФ  $G(\mathbf{R})$  в области действия ядерных сил имеет вид:

$$G(\mathbf{R}_N) = \frac{1}{(4\pi a_\mu^3)^{1/2}} \left[ \frac{g(\mathbf{R})}{\mathbf{R}} \right]_{\mathbf{R}=\mathbf{R}_N}. \quad (34)$$

Тогда вероятность реакции в единицу времени равна

$$w = \frac{C_{d-d}}{4\pi a_\mu^3} \left( \frac{c\alpha}{2\pi} \right) \exp(-\lambda). \quad (35)$$

Вероятности реакций  $d + d$  в единицу времени представлены в таблице 5.

Таблица 5

Вероятность ядерной реакции в мезомолекулах  $dd\mu$  (в сек<sup>-1</sup>) [1]

$R_N$	$d + d$
0	$0.35 \cdot 10^{11}$
$5 \cdot 10^{-13} \text{ sm}$	$0.7 \cdot 10^{11}$
$1.2 \cdot 10^{-12} \text{ sm}$	$1.41 \cdot 10^{11}$

Вероятность ядерной реакции в мезомолекуле определяется отношением

$$w/(w + \lambda_0) = w\tau / (1 + w\tau), \quad (36)$$

где  $w$  - вероятность ядерной реакции в единицу времени,  $\tau = \lambda_0^{-1} = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  - время жизни  $\mu$ - мезона. Из таблицы 5 видно, что образование мезомолекулы  $dd\mu$  должно практически всегда приводить к ядерной реакции.

Главным недостатком  $\mu$ - катализа ХЯС является энергетическая и экономическая нецелесообразность его использования, как в энергетике, так и в других промышленных и технологических приложениях.

### 2.3. Пьезоядерные реакции

Основные реакции, в которых принимают участие только ядра изотопов водорода:  $p + p = d + e^+ + \nu_e$ ,  $p + d = {}^3\text{He} + \gamma$ ,  $d + d = t + p$ ,  $d + d = {}^3\text{He} + n$ ,  $d + d = {}^4\text{He} + \gamma$ ,  $d + t = {}^4\text{He} + n$ ,  $p + t = {}^4\text{He} + \gamma$  и  $t + t = {}^4\text{He} + 2n$ . Поскольку нас интересуют только реакции с участием дейтронов, постольку мы и будем далее обсуждать процессы  $d + d$ .

Для того чтобы реакция слияния ядер пошла, необходимо сблизить реагирующие ядра на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил. Это, в свою очередь, требует преодоления кулоновского барьера между заряженными частицами. Поэтому реакции синтеза в обычных условиях идут только при сообщении ядрам кинетической энергии. Однако эта энергия значительно меньше, чем высота кулоновского барьера, и реакции начинают идти с заметной вероятностью за счет туннельного эффекта. Действительно, для всех упомянутых выше реакций высота кулоновского барьера составляет сотни КэВ, в то время как реакция  $t + t = {}^4\text{He} + 2n$  наблюдается на ускорителях уже при энергиях порядка  $1 - 10 \text{ KeV}$  и выше. Термоядерные реакции, даже при высокой температуре  $T = 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$ , при которой средняя кинетическая энергия частиц составляет  $\varepsilon \approx 10 \text{ KeV}$ , также идут, в основном, за счет подбарьерных переходов<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Для термоядерной реакции наиболее существенна область распределения Максвелла, которая при учете барьерного фактора  $\exp(-2\pi e^2 Z_1 Z_2 / \hbar v)$  дает максимум в экспоненте  $(-Mv^2 / 2kT - 2\pi e^2 Z_1 Z_2 / \hbar v)$ , т.е. вблизи скорости, равной  $v_0 = (2\pi e^2 Z_1 Z_2 kT / M\hbar)^{1/2}$ . Значение «эффективной» энергии  $\varepsilon_0 = Mv_0^2 / 2$  для  $d + d$ - реакции при  $T = 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$  равно  $30 \text{ KeV}$ , что значительно ниже высоты кулоновского барьера.

Отметим важную особенность подбарьерных переходов. В работе [1] показано, что ВКБ-фактор проницаемости барьера гораздо более чувствителен к изменению ширины барьера, нежели к изменению его высоты. В самом деле, общеизвестно, что коэффициент прохождения потенциального барьера равен:

$$B = \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2M(U(x) - E)} dx \right] = \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2M\bar{U}} \cdot (x_2 - x_1) \right], \quad (37)$$

где  $\bar{U}$  - некая средняя высота барьера. Из (37) видно, что показатель экспоненты линейно зависит от ширины барьера, и только как квадратный корень от его высоты. Поэтому ядерные реакции начинают идти с заметной вероятностью уже при таких энергиях, когда высота барьера практически еще не снижена, однако наиболее трудная для прохождения область больших расстояний преодолена за счет кинетической энергии частиц. В силу этого реакции синтеза в водороде могут идти при весьма малой кинетической энергии относительного движения взаимодействующих ядер, если они сближаются на достаточно малое расстояние за счет внешнего давления, либо других внешних воздействий.

Из (37) следует, что при обычных межатомных расстояниях в молекуле водорода ядерная реакция невозможна. В самом деле, барьерный множитель в этом случае, грубо говоря, равен

$$B \approx \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} (2Me^2 r_0)^{1/2} \right], \quad (38)$$

где  $M$  - приведенная масса ядер водорода,  $r_0$  - расстояние между ядрами в молекуле. По порядку величины  $r_0$  равно боровскому радиусу электрона  $a_e = \hbar^2 / m_e e^2$ . Следовательно

$$B = \exp \left[ -k\sqrt{M/m_e} \right], \quad (39)$$

причем  $\hbar$ , и  $e$  сокращаются, а  $k$  - численный множитель порядка 3 – 3.3. Таким образом, проницаемость кулоновского барьера в обычных молекулах водорода крайне мала.

Подсчет вероятности ядерной реакции в молекуле  $HD$ , проделанный в работе [1] Я.Б. Зельдовичем и С.С. Герштейном, дает для  $1 \text{ m}^3$  жидкого водорода/дейтерия  $HD$   $10^{-21}$  реакций в год. Однако если бы расстояние между ядрами водорода было всего в 5 – 10 раз меньше, чем в молекуле водорода, то выход реакции мог бы составить вполне заметную величину. Например, в  $1 \text{ kg}$  дейтерия при давлении  $P \approx 6 \cdot 10^8 \text{ atm}$  (которому соответствует плотность  $80 \text{ g/sm}^3$  и среднее расстояние между частицами всего в два раза меньше, чем в молекуле  $H_2$ ) должна наблюдаться одна реакция в минуту. Однако сжать чистый водород до такой плотности в земных условиях абсолютно нереально. В этом случае химия также бессильна, так как во всех известных химических соединениях водорода расстояние между ядрами водорода больше, чем в молекуле  $H_2$ . Из этого факта был сделан вывод о том, что межатомные расстояния в обычных молекулах чрезмерно велики для того, чтобы выход подбарьерных ядерных реакций между изотопами водорода мог иметь сколько-нибудь заметную величину [1].

В то же время, Яков Борисович Зельдович в работах по астрофизике неоднократно возвращался к проблеме пьезоядерных реакций, так как именно они «зажигают звезды» [27]. Кроме того, в оценках, проделанных классиками отечественной физики в 50-х годах прошлого века, не учитывался ни эффект экранировки электрического заряда дейтронов электронами в конденсированных средах, ни электрически нейтральные метастабильные промежуточные состояния типа атомов динейтрона, которые образуются в результате реакции захвата дейтронами электронов из непрерывного спектра.

## 2.4. Резюме

Даже в самых ранних оценках вероятности реакции холодного синтеза, в которых еще не учитываются физические эффекты, обнаруженные гораздо позже, не отрицается возможность ядерных реакций в холодном водороде. Более того, хорошо известного  $\mu$ -катализа оказывается вполне достаточно для того, чтобы преодолеть немислимый фактор запрета в  $2730$  порядков!!! Из этого факта следует абсолютно неопровержимый вывод: кулоновский барьер, препятствующий ядерным реакциям в холодном водороде, чрезвычайно уязвим. Поэтому скоростью реакции холодного синтеза можно управлять, изменяя внешние условия, в которых находится макроскопическое количество изотопов водорода. При этом, с принципиальной точки зрения, не только хорошо известный  $\mu$ -катализ, но и другие управляющие воздействия, могут привести к осуществлению ядерного синтеза при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{K} < T < 1500 \text{ }^\circ\text{K}$ , достаточно близкой к комнатной. Поэтому вопрос состоит не в том, существует ХЯС, или нет, а в том, можно ли предложить какой-нибудь мало-мальски технически приемлемый способ повышения проницаемости кулоновского барьера при энергиях дейтрона менее  $1 \text{ eV}$ .

## 3. Подвиг инженера Филимоненко

Советские ученые, как всегда, оказались впереди планеты всей, много лет тому назад создав опытно-промышленную энергетическую установку «теплого синтеза» [28]. Эта установка появилась на свет в результате исследований, проводившихся в 50-х годах в СССР в рамках государственной программы научно-технического прогресса.

Молодой, энергичный и очень талантливый физик И.С. Филимоненко создал гидролизную энергетическую установку, предназначенную для получения энергии от реакций «теплого» ядерного синтеза, идущих при температуре всего  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Топливом для реактора служила тяжелая вода. Реактор представлял собой металлическую трубу диаметром 41 мм и длиной 700 мм, изготовленную из сплава, содержавшего несколько граммов палладия.

В 1962 году И.С. Филимоненко подал заявку на изобретение СССР № 717239/38 «Процесс и установка термоэмиссии». Государственная патентная экспертиза ВНИИГПЭ отказала в признании данного технического решения изобретением на том основании, что всем было известно, что термоядерные реакции не могут идти при столь низкой температуре [29, 30].

Основной результат работ Филимоненко состоял в том, что он экспериментально установил, что после разложения тяжелой воды электролизом на кислород и дейтерий, растворяющийся в палладию катода, в катоде происходят реакции ядерного синтеза. При этом отсутствует как нейтронное излучение, так и радиоактивные отходы. Филимоненко предложил идею экспериментов еще в 1957 г, работая в оборонной промышленности. Идея была воспринята и поддержана его непосредственным руководством. Было принято решение о начале исследований, и в кратчайшие сроки получены первые положительные результаты.

Революционные эксперименты Ивана Степановича Филимоненко высоко оценили академики И.В. Курчатов и С.П. Королев, а также маршал Г.К. Жуков. Авторитет этих людей был непререкаем. В результате усилий этого трио, направленных на укрепление обороноспособности СССР, на свет появилось секретное Постановление Совмина СССР и ЦК КПСС № 715/296 от 23.07.1960 г., в котором предписывалось на базе предложений Филимоненко осуществить «разработку стратегически значимых принципов»:

- 1) получения энергии;
- 2) получения тяги без отброса массы;

3) защиты от ядерных излучений.

По ходу экспериментов И.С. Филимоненко обнаружил, что его реактор при работе испускает какое-то излучение, которое резко сокращает период полураспада радиоактивных изотопов. Отсюда и появился третий пункт Постановления.

Конструкция и принцип действия установки до сих пор остаются засекреченными.

Из вышесказанного следует, что советские учёные на полвека обогнали американских специалистов в решении проблемы ХЯС. Более того, вскоре после публикации скандально известных результатов М. Флейшмана и С. Понса выяснилось, что «американец» С. Понс вплоть до 80-х годов был гражданином СССР. В 1970 г. он был экспертом по новейшим советским ядерным установкам, и привлекался к обсуждению работ И.С. Филимоненко.

Работы по «теплому термояду» остановились, когда И.С. Филимоненко в 1968 г. был отстранен от работ по холодному ядерному синтезу за политическую нелояльность, как «выскочка», «переступивший дорогу» научным авторитетам по развитию управляемого термоядерного синтеза [31].

Прошли годы, и скандальная пресс-конференция М. Флейшмана и С. Понса подвигла руководство СССР на реабилитацию опального ученого. В 1989 г. было принято решение воссоздать в подмосковном НПО «Луч» 3 термоэмиссионные гидролизные энергетические установки мощностью по 12.5 кВт каждая. Это решение было мгновенно претворено в жизнь под руководством И.С. Филимоненко. Все три установки были сданы в опытную эксплуатацию в 1990 г. При этом на каждый киловатт, вырабатываемый энергетическими установками «теплого синтеза», приходилось всего 0.7 грамма палладия, на котором, как выяснилось позже, свет клином не сошелся.

В 1991 г. Волгодонское отделение Ядерного общества (исполнительный секретарь Бакумцев Н.И.) организовало координационное совещание с ПО «Атоммаш», Ростовской АЭС и международным фондом «Перестройка Естествознания» по вопросу создания опытно-промышленной установки И.С. Филимоненко на Ростовской АЭС, которая в тот период была законсервирована на волне «радиофобии» и политической борьбы [32]. На нем были приняты все мыслимые и немыслимые положительные решения. Однако через пару дней случилось ГКЧП. Великая держава распалась. Лишившись государственной поддержки, наука и промышленность надолго остановились в своём развитии.

Но, несмотря на всяческие передрыги начала 90-х, Иван Степанович Филимоненко, будучи настоящим бойцом и подвижником, продолжал интенсивно работать в условиях катастрофического обвала экономики. Решения упомянутого выше координационного совещания были выполнены, и в результате в 1992 году на свет появилось сообщение «Демонстрационная термоэмиссионная установка для ядерного синтеза» [33]. Похоже, что это была последняя попытка Ивана Степановича достучаться до разума властей.

В настоящее время И.С. Филимоненко отошел от активной деятельности в науке, связанной с работой на оборонную промышленность.

#### 4. Эксперименты Б.В. Дерягина

Эффект аномального увеличения выхода нейтронов неоднократно наблюдался в опытах по колке дейтериевого льда. В 1986 году академик Б.В. Дерягин с сотрудниками опубликовал статью [34], в которой были приведены результаты серии экспериментов по разрушению мишеней из тяжелого льда с помощью металлического бойка. В этой работе сообщалось, что при выстреле в мишень из тяжелого льда  $D_2O$  при начальной скорости бойка 100 – 200 м/с регистрировалось  $0.4 \pm 0.08$  отсчета нейтронов. При выстреле в мишень из обычного льда  $H_2O$  регистрировалось всего  $0.15 \pm 0.06$  отсчета нейтронов. Указанные значения были приведены с учетом поправок, связанных с наличием фонового потока нейтронов. В экспериментах Дерягина космический фон составлял 0.17 отсчета



на выстрел. Авторы статьи связывали рождение нейтронов с реакцией  $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ . Возможность этой реакции обосновывалась в работе [34] наличием в зоне разрушения твердого тела электрических полей напряженностью  $10^6 - 10^7 \text{ V/sm}$ . По мнению Б.В. Дерягина и сотрудников, эти поля ускоряют дейтроны до достаточно больших энергий. Но это не так, потому что, даже при энергии дейтрона-снаряда  $10 \text{ KeV}$ , выход нейтронов в реакции  $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$  составляет всего порядка  $10^{-11}$  на дейтрон. Даже приняв среднюю длину разгона дейтрона равной  $10^{-6} \text{ sm}$  (на самом деле, на порядок меньше), мы приходим к оценке энергии ядра-снаряда  $1 - 10 \text{ eV}$ . Поэтому электрические поля в кристалле принципиально не способны разогнать дейтроны до энергий, при которых ХЯС протекает со скоростью, достаточной для экспериментального обнаружения.

Для того чтобы как можно точнее позиционировать пионерские работы академика Б.В. Дерягина по проблеме ХЯС, отметим, что для типичных «горячих» ядерных реакций характерны энергии порядка нескольких МэВ. Поскольку энергия  $10 \text{ KeV}$  соответствует температуре всего около  $10^8 \text{ }^\circ\text{K}$ , постольку ядерные реакции при таких энергиях все еще следует относить к разряду «холодных». Для осуществления «горячей» реакции ядерного синтеза в чистой дейтерии температура должна быть на порядок выше.

В дальнейшем качественные результаты работы [34] были подтверждены в работе [35]. Для объяснения этих результатов авторы работ [34, 35] использовали гипотезу о том, что электрические поля в кристалле не только ускоряют дейтроны, но и понижают высоту кулоновского барьера. Очевидно, что вероятность протекания реакции ХЯС заметно увеличивается за счет этого эффекта. Однако расчеты показывают, что и в этом случае проницаемость барьера все еще очень мала, и явно недостаточна для того, чтобы объяснить наблюдаемый выход нейтронов. Поэтому даже с поправкой на «электростатическую» интерпретацию экспериментов Б.В. Дерягина и его сотрудников, эту работу можно смело отнести к числу важнейших решающих экспериментов, подтверждающих сам факт существования низкоэнергетических ядерных реакций. Другими словами, если не принимать во внимание ранней работы [36], результаты которой так никогда и никем не были воспроизведены, и закрытых работ И.С. Филимонова, то можно считать, что холодный ядерный синтез был официально открыт именно в России.

К сожалению, научная общественность с недоверием отнеслась к результатам работ [34, 35]. И это несмотря на то, что Б.В. Дерягин был академиком, результаты были опубликованы в Письмах в ЖЭТФ, а уровень превышения сгенерированного потока нейтронов над фоном в экспериментах [34, 35] исключал возможность объяснения полученных результатов статистической погрешностью эксперимента. В конце концов, рождение загадочных нейтронов при колке дейтериевого льда было полностью отнесено на счет электростатического ускорения дейтронов и повышения прозрачности барьера. В конце прошлого века никто так и не смог найти более вразумительного объяснения результатов решающего эксперимента в физике, осуществленного советскими учеными.

Справедливости ради к вышесказанному надо добавить, что первые результаты советских ученых в области физики ядерного синтеза были получены в начале 50-х годов прошлого века. В связи с этим дословно приведем выводы академика Игоря Васильевича Курчатова, озвученные на лекции, прочитанной 25 апреля 1956 года на эпохальной конференции в английском научно-исследовательском атомном центре в Харуэлле: «Было обнаружено, что импульсный разряд является источником не только нейтронов, но и жестких рентгеновских лучей. Жесткое рентгеновское излучение возникает при прохождении больших токов через водород, дейтерий и гелий. Излучение при разрядах в дейтерии всегда состоит из коротких импульсов. Импульсы, вызываемые нейтронами и рентгенов-

скими квантами, могут быть точно сфазированы на осциллограммах. При этом оказывается, что они возникают одновременно. Энергия рентгеновских квантов, появляющихся при импульсных электрических процессах в водороде и дейтерии, достигает 300 - 400 КэВ. Следует отметить, что в тот момент, когда возникают кванты с такой большой энергией, напряжение, приложенное к разрядной трубке, составляет всего лишь 10 кВ. Оценивая перспективы различных направлений, которые могут привести к решению задачи получения термоядерных реакций большой интенсивности, мы не можем сейчас полностью исключить дальнейшие попытки достигнуть этой цели путем использования импульсных разрядов» [37].

В историческом докладе И.В. Курчатова были доложены результаты, относящиеся к области энергий, необходимых для осуществления управляемых термоядерных реакций. Однако 10 КэВ по ядерным масштабам – это все еще область низких энергий. Кроме того, рентгеновское излучение в области **300 – 400 KeV** является жестким лишь в том смысле, что оно является ионизирующим. Каналы фотоядерных реакций чаще всего открываются при более высоких энергиях.

### 5. Эксперименты М. Флейшмана и С. Понса

Первое упоминание о явлении «низкоэнергетической трансмутации химических элементов» датировано 1922 годом [36], однако эта работа С. Айриона и Дж. Вендта не была воспринята научным сообществом, в том числе и потому, что Э. Резерфорду так и не удалось воспроизвести полученные ими результаты [38].

Непродолжительный интерес к чрезвычайно важным с сегодняшней точки зрения результатам, полученным сотрудниками (и соратниками) И.В. Курчатова быстро затух после безвременной кончины Игоря Васильевича в 1960 году. В дальнейшем все усилия физиков были направлены на решение проблемы управляемого термоядерного синтеза, а также мюонного катализа [1, 21]. Упомянувшиеся чуть выше результаты работ группы академика Б.В. Дерягина не имели широкого резонанса в мировой научной печати.

Ажиотажный взрыв интереса к обсуждаемой проблеме возник только после того, как М. Флейшман и С. Понс на пресс-конференции 23 марта 1989 года сообщили об обнаружении ими нового явления в науке, известного сейчас как холодный ядерный синтез (или синтез при комнатной температуре) [39]. Они электролитическим путем насыщали палладий дейтерием (попросту, воспроизвели результаты серии работ И.С. Филимоненко, доступ к которым имел С. Понс) - проводили электролиз в тяжелой воде с палладиевым катодом. При этом наблюдалось выделение избыточного тепла, рождение нейтронов, а также образование трития. В том же году было сообщение об аналогичных результатах, полученных в работе С. Джонса, Е. Палмера Дж. Цирра и др. [40].

За прошедшее время было опубликовано более 300 статей и предложено около 25 теоретических моделей для интерпретации полученных результатов. В многочисленных статьях описаны эксперименты, в которых наблюдались изменения элементного состава вещества при таких слабых внешних воздействиях на дейтерированные материалы, что по современным представлениям теоретической физики не может быть и речи об объяснении наблюдавшихся явлений ядерными реакциями в конденсированных средах. Тем не менее, в экспериментах с дейтерированными веществами выделяется тепло, регистрируется эмиссия нейтронов, трития и гелия. Элементный состав вещества при этом меняется. Эти факты могут подтвердить лишь немногочисленные счастливицы - те, кому повезло. Другим же экспериментаторам не удастся получить каких-либо устойчивых результатов. Малейшие вариации параметров экспериментальной установки приводят к кардинальным изменениям результатов измерений.

В экспериментах нет повторяемости, поэтому считается, что ахиллесовой пятой ХЯС и LENR является плохая воспроизводимость результатов.

## 6. Эксперименты И.Б. Савватимовой

Однако далеко не все эксперименты, в которых исследовались явление ХЯС и LENR, являются невоспроизводимыми. Например, не вызывает никаких сомнений достоверность представленных в работе [41] результатов регистрации остаточной радиоактивности методом автордиографии поверхности катодных фольг **Pd**, **Nb**, **Ti**, **Ag** и их сочетаний после облучения ионами дейтерия в тлеющем разряде для плотности тока  $10 - 50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  и напряжения  $50 - 500 \text{ V}$ . Она составляла  $5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$   $\beta$ - частиц в первые 2-20 ч после эксперимента. Спустя 2-4 ч после окончания облучения в работе [41] наблюдалось возрастание активности в 2-10 раз для первых двух слоев сложных катодов, состоящих из набора **Ti**- и **Pd**- фольг толщиной  $\sim 100$  мкм. Авторы работы [41] полагали, что активность связана с распадом изотопов.

Для сложного составного катода **Ti – Pd – Ti – Pd** в работе [41] было отмечено, что (см. рис. 3):

1. Возрастание активности в 2-10 раз для первых двух слоев составных катодов, состоящих из набора фольг толщиной  $\sim 100$  мкм каждая (на облучаемом **Ti**- и лежащем ниже **Pd**- образцах) спустя 2-4 ч после прекращения разряда до  $5 \cdot 10^5$  и  $5 \cdot 10^6 \beta \cdot \text{cm}^{-2}$  для **Ti** и **Pd**, соответственно.
2. Спустя 100 часов после окончания облучения активность катодов снижалась до  $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$   $\beta$ - частиц для **Ti** и **Pd**, соответственно.
3. Превышение на порядок активности палладиевой фольги (второй слой, экранированный от непосредственного воздействия разряда).
4. На основании результатов измерений, проведенных через 2-4 часа после окончания облучения электродов, была получена оценка периода полураспада искомого изотопа ( $T_{1/2} \approx 13.8$  часов). Согласно имеющимся данным [19],  $\beta$ - активность облученных фольг обусловлена  $\beta$ - распадом изотопа  $^{109}_{46}\text{Pd}$ .
5. Выявление в зоне облучения пятен с довольно большей интенсивностью излучения, до  $5 \cdot 10^5 \beta \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  и  $5 \cdot 10^6 \beta \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  для **Ti** и **Pd**, соответственно.

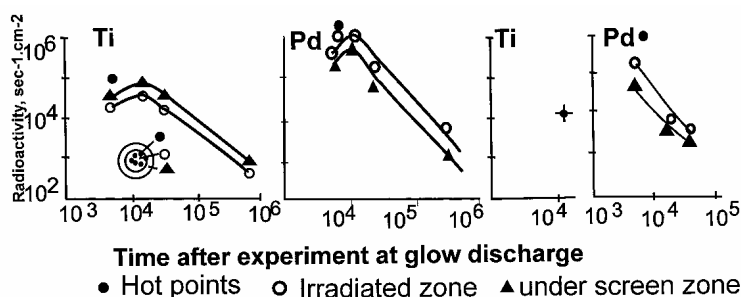


Рис. 3. Остаточная радиоактивность фольг составных катодов (**Ti – Pd – Ti – Pd**) после облучения ионами дейтерия: а, в – **Ti**; б, г – **Pd**; 1' – облученная центральная часть образца; 2' – площадь под экраном; 3' – пятна с большей активностью.

Для сложного катода **Nb – Pd – Nb – Pd – Nb – Pd** были выделены следующие характерные особенности [41] (см. рис. 4):

1. Наличие активности только для первого образца ниобия, подвергавшегося непосредственному облучению, и отсутствие активности – почернения пленки (в пределах чувствительности метода) – для лежащих ниже третьего и пятого **Nb**- образцов.
2. Близкие по величине и возрастающие значения активности второго, четвертого и шестого от поверхности образцов **Pd** после 6,38 ч и уменьшающиеся после 12,5 часов по мере удаления от облучаемой поверхности (рис. 4), причем для шестого образца активность в 5-10 раз меньше, чем для второго.

3. Разброс значений активности по мере удаления от облучаемой поверхности также увеличивается, т.е. для шестого образца величина разброса активности составляет более порядка.

4. Активность облученной ионами фольги ниобия приблизительно на два порядка меньше, чем лежащего ниже необлученного палладия. Для одной и той же серии образцов проведено облучение ионами водорода, дейтерия, водорода и дейтерия, а также аргона. Эксперименты этой серии проводили с близкими параметрами разряда. Исследования остаточной радиоактивности палладиевых катодов после облучения ионами аргона показали, что активность образцов была выше, чем после облучения ионами водорода и дейтерия и составляла  $\sim 7 \cdot 10^5 - 10^6 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Причем зона разряда давала очень слабое почернение пленки, а максимальная активность  $7 \cdot 10^5 - 10^6 \beta \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$  была характерна для экранированной зоны.

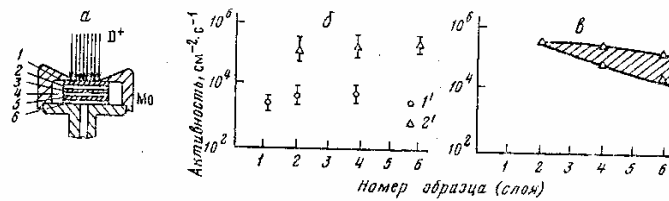
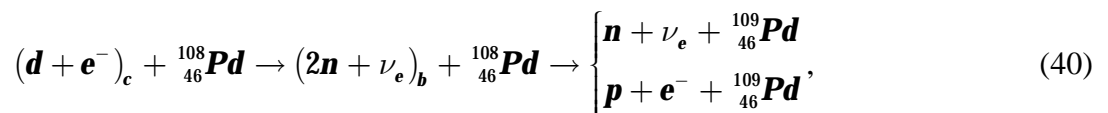


Рис. 4. Остаточная радиоактивность фольг составных катодов ( $\text{Nb} - \text{Pd} - \text{Nb} - \text{Pd} - \text{Nb} - \text{Pd}$ ) после облучения ионами дейтерия. а – Схема эксперимента: 1,3,5 –  $\text{Nb}$ , 2,4,6, –  $\text{Pd}$ ; 1 – облученный образец, 2-6 – необлученные образцы; б –  $2,3 \cdot 10^4$  с после эксперимента, в –  $4,5 \cdot 10^4$  с после эксперимента, 1' – Облучаемая площадь, 2' – экранированная площадь.

Фактор проницаемости кулоновского барьера в опытах И.Б. Савватимовой и А.Б. Карабута ( $P_f \sim 10^{-870}$  без учета экранировки, поскольку для ядра  $\text{Pd}$  заряд  $Z = 46$ ) гораздо меньше, чем в экспериментах академика Б.В. Дерягина. Его значение ничтожно мало для объяснения обнаруженного уровня  $\beta$ - активности облученных электродов.

Результаты работы [41] были подтверждены в независимых экспериментах. Они легко воспроизводимы, и однозначно свидетельствуют в пользу существования процессов типа LENR и ХЯС. Но самое замечательное в экспериментах И.Б. Савватимовой и А.Б. Карабута состоит в том, что они относятся к числу решающих. Ниже будет показано, что за явление холодного слияния ядер отвечает реакция электронного захвата, в результате которой образуется новая нейтральная частица – динейтроний. Многослойные электроды в эксперименте Савватимовой и Карабута представляли собой набор листов металлической фольги, в числе которых были палладиевые, содержащие природную смесь изотопов  $^{104}_{46}\text{Pd}$ ,  $^{105}_{46}\text{Pd}$ ,  $^{106}_{46}\text{Pd}$  и  $^{108}_{46}\text{Pd}$ . Дейтерирование палладиевых электродов в плазме тлеющего разряда приводило к тому, что в результате реакции электронного захвата образовывался короткоживущий динейтроний<sup>6</sup>, который и вступал в реакцию с изотопом  $^{108}_{46}\text{Pd}$ :



сопровождаяющуюся появлением  $^{109}_{46}\text{Pd}$ . Именно этот изотоп и был обнаружен в [41].

<sup>6</sup> Индекс  $c$  означает, что состояние электрона принадлежит непрерывному спектру, а индекс  $b$  означает, что динейтроний является связанным состоянием двух нейтронов и нейтрино.

## 7. Эксперименты Йосиаки Араты

### 7.1. Методика

Весной 2008 года заслуженный профессор в отставке Йосиаки Арата (Yoshiaki Arata, рис. 5) из университета Осака, и его китайский коллега Юэчан Чжан (Yue-Chang Zhang) из Шанхайского университета продемонстрировали широкой общественности красивый эксперимент. В этом демонстрационном эксперименте было зафиксировано не предусмотренное известными законами физики выделение энергии и образование гелия.



Рис. 5. Y. Arata, почетный профессор Университета Осака. Лауреат Императорской премии по физике. В Японии эта премия котируется выше Нобелевской премии.



Рис. 6. Реакторная ячейка Араты. Не прошло и 20 лет с начала исследований, как у Й. Араты и Ю. Чжан заработал один из первых на Земле реакторов холодного ядерного синтеза.

В эксперименте Араты - Чжан в специальную ячейку (см. рис. 6) был помещен размолотый до размеров 50 ангстрем порошок, состоящий из палладиевых нанокластеров, диспергированных внутри  $ZrO_2$  – матрицы. Исходный материал был получен посредством отжига аморфного сплава палладия с цирконием  $Zr_{65}Pd_{35}$  (см. рис. 7). После этого в ячейку под высоким давлением был закачан газообразный дейтерий.

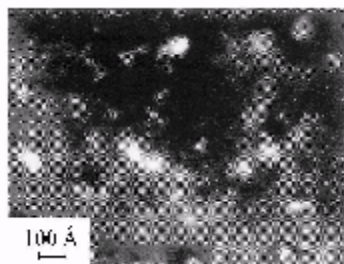


Рис. 7. Электронно-микроскопическая фотография палладиевых нанокластеров (~ 50 Å в диаметре), диспергированных внутри  $ZrO_2$  – матрицы.

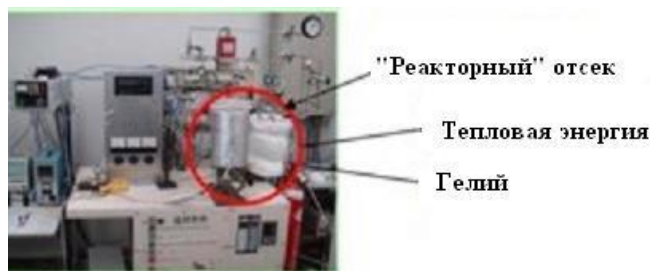


Рис. 8. Смесь внутри ячейки абсорбировала дейтерий. В результате абсорбции внутри нанокластеров  $Pd$  образовался сверхплотный руспnodeuterium.

Таким образом, в реактор Араты было введено некоторое количество вещества, состоящего из сверхнасыщенных дейтерием наночастиц. В описываемом опыте в каждой частице порошка на 1 атом палладия приходилось примерно 3 атома дейтерия.

После подачи дейтерия в экспериментальную ячейку температура внутри нее поднялась с 20 до 70 градусов по Цельсию. После того, как поступление газа прекратилось, температура вещества, заключенного в ячейке, оставалась выше комнатной в течение 50 часов. Кроме того, Арата и Чжан обнаружили, что по ходу эксперимента внутри ячейки появилось некоторое количество гелия-4, который принципиально не может образоваться из палладия и дейтерия в результате химической реакции. На основании этих фактов ими было сделано заключение: внутри экспериментальной ячейки протекает реакция ядерного синтеза. По мнению Араты и Чжан, реакция холодного ядерного синтеза с образованием гелия и выделением энергии начинается потому, что дейтроны в палладиево-дейтериевых кластерах расположены очень близко друг к другу.

Поскольку эксперименты Й. Араты относятся к числу решающих экспериментов в физике, постольку ниже мы детально опишем его методику, изложенную в работе [42].

a) Измерение количества водорода/дейтерия ( $H_2 / D_2$ ), поглощенного кластерами палладия, внедренными в частицы порошка диоксида циркония ( $ZrO_2$ ), находящегося в вакуумированном сосуде.

Эксперимент проводился в две стадии.

На первой стадии эксперимента порошок, содержащий наночастицы палладия, (т.е. **Pd** - кластеры диаметром  $\sim 50 \text{ \AA}$ ) выдерживался в течение двух суток в вакуумированном сосуде из нержавеющей стали при давлении приблизительно  $10^{-7}$  Торр, после чего этот сосуд помещался в воду при комнатной температуре  $22.2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

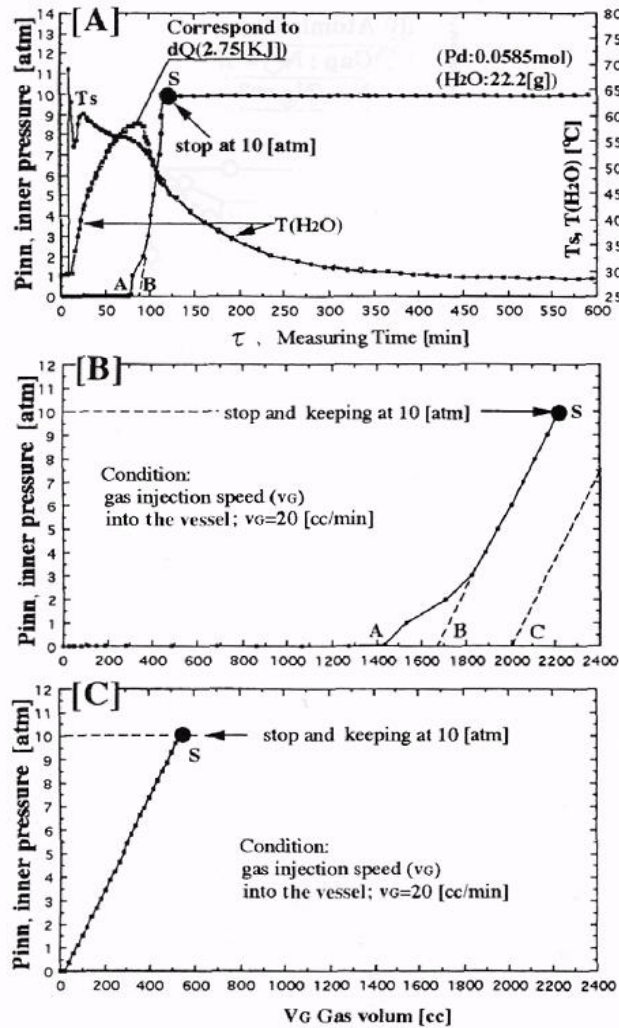


Рис. 9. Абсорбция водорода/дейтерия в нанокластерах **Pd** ( $\varnothing \sim 50 \text{ \AA}$ ), содержащихся в порошке диоксида циркония  $ZrO_2$ , заключенного внутри сосуда из нержавеющей стали, погруженного в воду при начальной температуре  $T(H_2O) = 22.2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

[A] Давление газа внутри сосуда  $P_{inn}$ , температура порошка ( $T_s$ ), энергия, выделяющаяся в результате химической реакции абсорбции ( $dQ$ ), и температура воды ( $T(H_2O)$ ), как функции времени  $\tau$ .

[B] Зависимость между давлением  $P_{inn}$  и объемом газа  $V_G$ , абсорбированного нанокластерами палладия, при постоянной скорости подачи  $v_G = 20 \text{ cc/min}$ .

[C] Зависимость между давлением  $P_{inn}$  и объемом газа  $V_G$ , введенным в сосуд с диоксидом циркония  $ZrO_2$  без примеси **Pd**.

На второй стадии эксперимента смесь газов  $H_2/D_2$  с постоянной скоростью  $v_G = 20 \text{ cc/min}$  поступала в эвакуированный сосуд ( $1 \text{ cc} \equiv 1 \text{ sm}^3$ ). При этом давление внутри сосуда ( $P_{inn} [\text{atm}]$ ), температура палладиевых кластеров ( $T_s [^\circ\text{C}]$ ) и температура охлаждающей воды ( $T(H_2O) [^\circ\text{C}]$ ) изменялись с течением времени ( $\tau [\text{min}]$ ), как показано на рис. 9А. Так как вводимый газ немедленно поглощался кластерами  $Pd$ , давление внутри сосуда оставалось практически нулевым ( $P_{inn} \sim 0$ ) вплоть до начала насыщения кластеров палладия атомами  $H_2/D_2$ , внедряющимися в наночастицы металла. Давление нарастало до момента полного насыщения кластеров, что соответствует точкам **A** ( $P_{inn} = 1 \text{ atm}$ ) и **B** ( $P_{inn} \sim 3 \text{ atm}$ ) на рис. 9А. Полный объем введенного в сосуд газа ( $V_G [\text{cc}]$ ) равен  $v_G [\text{cc/min}] \times \tau [\text{min}]$ . Поэтому объем газа, поглощенного кластерами, равен  $V_G = v_G \cdot \tau_A$  и  $V_{GB} = v_G \cdot \tau_B$ , соответственно (здесь  $\tau_A$  и  $\tau_B$  соответствует времени  $\tau$  в точках **A** и **B** на рис. 9А).

Концентрация атомов газа, поглощенных кластерами металла-абсорбента, может быть найдена следующим образом. Точке **A** на рис. 9А (72 минуты, при  $P_{inn} = 1 \text{ atm}$ ) соответствует точка **A** на рис. 9В (1440 cc), а точке **B** на рис. 9А (83.5 минуты при  $P_{inn} \sim 3 \text{ atm}$ ) – точка **B** на рис. 9В (1670 cc). Тогда объемам поглощенного газа  $V_{GA} = 1440 \text{ cc} = 1.44 \text{ l}$  и  $V_{GB} = 1670 \text{ cc} = 1.67 \text{ l}$  соответствует количество молей молекулярного газа  $n_{MA} = \frac{1.44 \text{ l}}{22.4 \text{ l/mol}} \approx 0.0643 \text{ mol}$  и  $n_{MB} \approx 0.0745 \text{ mol}$ , соответственно,

и/или вдвое большее количество молей атомарного газа ( $n_A = 2n_{MA} \approx 0.128 \text{ mol}$  и  $n_B = 2n_{MB} \approx 0.149 \text{ mol}$ ). Упомянутые выше  $Pd$ -кластеры поглощали большое количество  $H/D$ -атомов, в то время как содержащий эти кластеры порошок диоксида циркония  $ZrO_2$  не поглощал их вообще (см. в рис. 9С).

Из рис. 9А и 9В видно, что кластеры  $Pd$  поглощали большое число молекул  $H_2/D_2$ , в то время как из рис. 9С явствует, что порошок  $ZrO_2$  не поглощал их вообще.

Если на число молей  $n [\text{mol}]$  поглощенных атомов  $H/D$  ( $n_A$  и  $n_B$  в точках **A** и **B**) приходится  $n_H [\text{mol}]$  молей атомов палладия в кластерах металла-абсорбента ( $n_H = 0.0585 \text{ mol}$  для использовавшегося образца  $Pd$ ), то соотношение между этими числами дается формулой  $n^* = n/n_H$ , где  $n_A^* = n_A/n_H$  и  $n_B^* = n_B/n_H$ , и при давлении внутри сосуда менее  $10 \text{ atm}$  оно имеет вид:

$$n_A^* = 2.18, \text{ or } n_A^* \geq 200\%, P_{inn} = 1 \text{ atm} . \quad (41)$$

$$n_B^* = 2.55, \text{ or } n_B^* \geq 250\%, P_{inn} \approx 3 \text{ atm} . \quad (42)$$

Этот результат показывает, что молекулы  $H_2/D_2$  быстро поглощаются кластерами палладия. Концентрации атомов водорода/дейтерия в них достигает от 200% до 250%. Если давление  $P_{inn}$  значительно меньше атмосферного, то величина  $n_A^* \approx 200\%$ . При давлении около трех атмосфер концентрация  $n_B^*$  возрастает до 250%. И, более того, она продолжает расти до 300%, что соответствует точке **C** (2000 cc) на рис. 9В при давлении  $P_{inn}$ , превышающем  $100 \text{ atm}$ .

b) Измерение зависимости веса кластеров палладия от давления газа  $H_2 / D_2$ .

Вес частицы, находящейся в газовой среде  $H_2 / D_2$  под давлением  $P_{inn}$ , возрастает вместе с числом внедрившихся в нее  $H / D$  атомов по закону Зивертца (Sievertz). Была исследована зависимость веса  $Pd$ - кластера от давления. Изменение веса  $Pd$ - кластера было измерено и калибровано по отношению концентрации<sup>7</sup> внедрившихся в частицу атомов к концентрации атомов в частицах металла-абсорбента  $n^* = H / Pd, D / Pd$ .

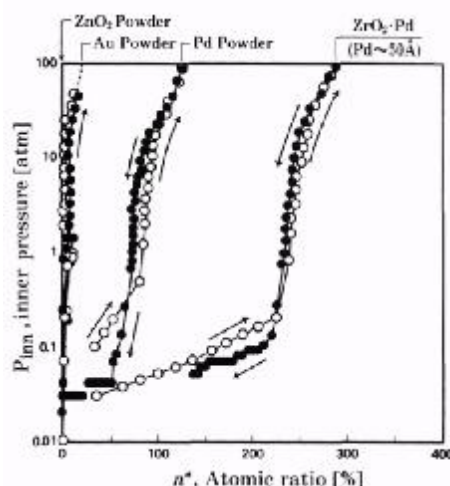


Рис. 10. Зависимость между давлением газа и отношением числа абсорбированных атомов водорода/дейтерия к числу атомов в исходной частице металла-абсорбента (атомным отношением).

На рис. 10 представлена зависимость между давлением в сосуде и атомным отношением. Из рисунка видно, что при давлении около **100 atm** почти **300%** атомов  $H / D$  поглощаются кластерами палладия. На основании этого можно заключить, что результаты экспериментов, представленные на рис. 9 и рис. 10, практически совпадают.

## 7.2. Сверхплотный металлический дейтерий/водород

a) Решетка металлического дейтерия (водородная решетка).

Процесс формирования решетки металлического дейтерия (далее под дейтерием подразумевается смесь дейтерий/водород) показан на рис. 11. На этом рисунке в качестве типичного примера решетки металла-абсорбента изображена **fcc** (face-centered cubic, т.е. кубическая гранецентрированная) решетка. На рис. 11В показано расположение «межатомного промежутка», т.е. свободного пространства между узлами кристаллической решетки металла-абсорбента. Местоположение, занимаемое атомами дейтерия/водорода (рис. 11С - 11Г) соответствует положению «межатомных промежутков» на рис. 11В. На рис. 11С приведен пример расположения атомов дейтерия для случая, когда их число равно числу молей атомов металла-абсорбента ( $n^* = 100\%$ ). Точно также, на рис. 11D, 11E, 11F и 11G указано расположение атомов дейтерия для случаев  $n^* = 200\%$ ,  $n^* = 250\%$ ,  $n^* = 300\%$  и  $n^* = 400\%$ , соответственно. Специфической особенностью заполнения атомами дейтерия ячеек кристаллической решетки, изображенных на рисунках 11F ( $n^* = 300\%$ ) и 11G ( $n^* = 400\%$ ) является то, что возможны 3 варианта их внедрения в межатомное пространство, а именно: (a), (b) и (c). Достижение экстремально высокой концентрации в **300%** и **400%** наиболее вероятно для решетки типа (a). Однако наиболее вероятно, что концентрация **300%** достигается в смеси состояний **200%**-, **300%**- и **400%**- решеток. Точно так же, случай  $n^* = 250\%$ , представленный на рис. 11E, скорее всего, реализуется в виде смеси решеток (**200%**) и (**300%**) типов.

<sup>7</sup> В данном случае под концентрацией понимается число молей вещества в единице объема.



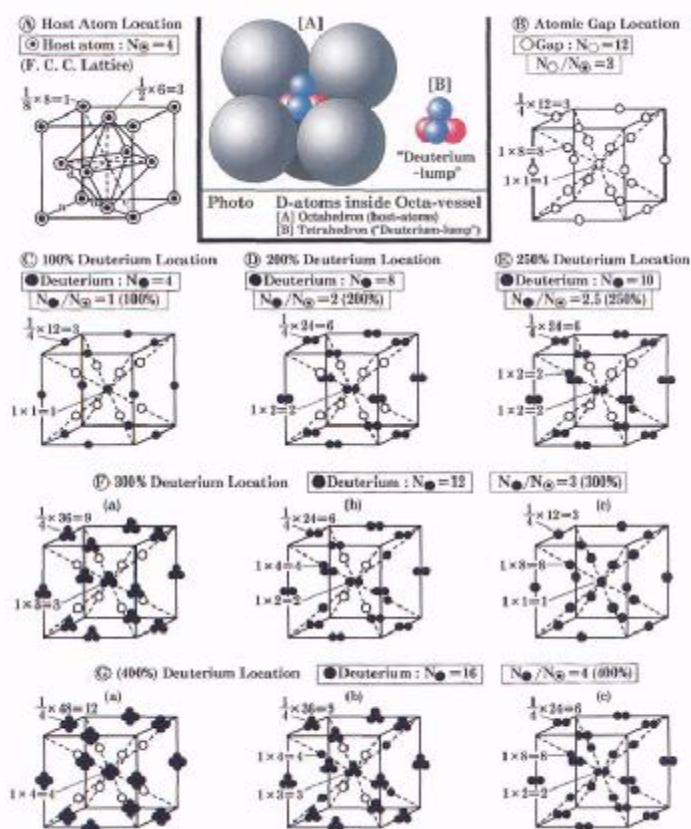


Рис. 11. Модель октаэдральной структуры отдельной ячейки кристаллической решетки металла-абсорбента и «глыбы дейтерия» сверхвысокой плотности (просто «глыбы пикнодейтерия»), имеющей форму тетраэдра, сосредоточенного внутри октаэдра, на гранях которого находятся атомы металла-абсорбента. В данной модели использованы реальные пропорции между диаметрами атомов **Pd** и **D**.



Рис. 12. Формирование конденсированного состояния – кристаллической решетки металлического дейтерия, имеющей объемно-центрированную кубооктаэдральную структуру ( $14 = 8 + 6$  поверхностей). Черный круг (●) соответствует грани октаэдра. На каждой такой грани может находиться от 1 до 4 атомов дейтерия (этот случай мы назовем окта-сосудом). Грани тетраэдра обозначены белыми кругами (○). Каждая грань такого тетра-сосуда может принять не более 1 атома дейтерия, и удерживает его там с трудом. См. фото на рис. 11.

Из рис. 12 видно, что плотность атомов в металлическом дейтерии намного выше, чем плотность атомов металла-абсорбента. Это обусловлено тем, что каждая отдельная ячейка «решетки металлического дейтерия», которая включает в себя локальные «глыбы пикнодейтерия», образует правильную объемно-центрированную кубооктаэдрическую структуру ( $14 = 8 + 6$  поверхностей), встроенную в палладиевоподобную **fcc** ячейку кристаллической решетки металла-абсорбента. Такая «глыба пикнодейтерия» - коагулят внутри «решетки металлического дейтерия», - является главной причиной возникновения реакции холодного синтеза, в то время как отдельные ячейки кристаллической решетки металла-абсорбента выполняют функцию поддержания этой реакции. Вспомогательная роль **Pd** - матрицы обусловлена большим количеством электронов внутри каждой ячейки кристаллической решетки металла-абсорбента. Они существенно уменьшают объемный положительный заряд «глыбы пикнодейтерия». Если бы не столь сильное влияние электро-

нов на процессы в ячейке кристаллической решетки металла-абсорбента, то невозможно было бы создать не только «глыбы пикнодейтерия», но и сами ячейки «решетки металлического дейтерия», так как для удержания «глыбы пикнодейтерия» необходимо создать внутри ячейки давление порядка  $10^9 \text{ atm}$ .

На рис. 12 каждый черный круг в отдельной ячейке кристаллической решетки дейтерия в металле указывает положение граней октаэдра, а каждый белый круг – положение граней тетраэдра. Если пространство вокруг каждого черного и белого кругов обозначить, просто как окта-сосуд и тетра-сосуд, соответственно, то окта-сосуд вмещает от 1 до 4 атомов дейтерия, а в тетра-сосуде помещается не более 1 атома дейтерия.

Специфика окта-сосуда состоит в том, что возможность его заполнения 1 ~ 2 атомами дейтерия практически такая же, как и 3 ~ 4 атомами, но вероятность присутствия в нем 3 ~ 4 атомов гораздо меньше, чем в предыдущем случае (1 ~ 2). В общем случае, атомы дейтерия могут перемещаться внутри тетра-сосуда, но маловероятно, что они находятся там постоянно. Если выполняются условия, при которых атом может устойчиво оставаться в тетра-сосуде, то 4 атомам гораздо легче проникать в окта-сосуд, и оставаться внутри него, как «глыба пикнодейтерия». В этом случае «глыба пикнодейтерия» должна иметь форму тетраэдра, вложенного в октаэдр (окта-сосуд), как показано на фото вверху рис. 11. Плотность дейтерия в ней может считаться сверхвысокой, и по оценкам она равна примерно  $10 \text{ g/cc}$ . Столь высокая плотность пикнодейтерия более чем 50 раз превышает плотность твердого кристаллического дейтерия, имеющего при сверхнизкой температуре гексагональную решетку. Похоже, что эта плотность близка к ожидаемому порогу, при котором начинается реакция искусственного пикноядерного синтеза. В соответствии с этим холодный ядерный синтез под действием «решеткотрясения» (т.е., взаимодействия дейтронов с **Pd**-фононами) легко протекает в конденсированной «глыбе пикнодейтерия», расположенной локально внутри элементарной ячейки кристаллической решетки металла-абсорбента. Как будет показано далее, именно по этой причине, при протекании реакций ядерного синтеза в твердом теле каждая отдельная ячейка решетки металла-абсорбента представляет собой мини-реактор ХЯС.

#### *b) Механизм формирования решетки металлического дейтерия*

Хорошо известно, что параметры, характеризующие физико-химические свойства наночастиц (атомных кластеров металла-абсорбента, или просто кластеров абсорбента), сильно отличаются от аналогичных параметров обычных металлов. Например, если мы рассмотрим поведение сплава, в котором при комнатной температуре протекает процесс замещения атомов металла-абсорбента **Au** атомами **Cu**, то оказывается, что скорость диффузии атомов **Cu** в **Au**-кластерах более чем в  $10^9$  раз выше скорости диффузии атомов меди в макроскопическом слитке золота [43]. Скорость диффузии при этом столь высока, что  $> 300\%$  атомов **Cu** могут мгновенно раствориться в кластере **Au**-абсорбента [44]. Это явление получило название «эффекта мгновенного сплавления» в металлических кластерах. Эксперимент показал, что атомы **D/H** влияют на кластеры металла-абсорбента сильнее, чем на слиток обычного металла, и большее количество атомов **D/H** внедряется в **Pd**-матрицу. Кластеры металла-абсорбента, в пересчете на количество молей вещества, поглощают  $> 300\%$  атомов **D/H** (см. выше). Так как коэффициент заполнения элементарной ячейки гранецентрированной кубической кристаллической решетки (**fcc**) атомами абсорбента для обычного металла составляет  $0.74$ , то для того, чтобы достичь столь высокой плотности **D/H**, необходимо существенное разупорядочивание атомов абсорбента (растяжение решетки) в большей части объема кристалла. В работе [45] сообщается, что в кластерах абсорбента (т.е. наночастицах металла) коэффициент заполнения элементарной ячейки **fcc**-решетки уменьшается от  $0.74$  до приблизи-

тельно  $0.64$ . То есть, доля свободного пространства между атомами абсорбента увеличивается от  $0.26$  до  $0.36$ , и как локальная объемная энергия связи, так и локальная поверхностная энергия существенно изменяются от центра кластера к его периферии. При этом барьер, препятствующий распространению атомов раствора ( $D/H$ ) значительно уменьшается за счет смягчения фононных мод, и, таким образом, зигзагообразные цепочки атомов динамически группируются вокруг некоторого среднего положения. В результате, атомы раствора (большое количество атомов  $D/H$ ) мгновенно проникают в кластеры атомов абсорбента-растворителя. Предложенная концепция образования сверхплотного металлического дейтерия хорошо согласуется экспериментальными данными (см. выше рис. 9 и рис. 10).

Поверхность металлического слитка ведет себя наподобие совокупности тонких двумерных кластеров, образованных атомами металла-абсорбента. Эти кластеры имеют минимальную толщину (не более нескольких атомных слоев). В силу этого объем зоны поверхностной кластеризации чрезвычайно мал по сравнению с полным объемом слитка. Отсюда вытекает вывод о том, что в качестве кластеров металла-абсорбента необходимо использовать металлический порошок, состоящий из наночастиц диаметром менее  $150 \text{ \AA}$  (реально  $\varnothing \sim 50 \text{ \AA}$  во вкраплениях абсорбента в матрицу). Однако только поверхностная зона частиц порошка диаметром  $200 \text{ \AA}$  или чуть более ведет себя наподобие двумерных кластеров металла, и она не абсорбирует дейтерий в таких же количествах, как кластеры абсорбента размером  $\varnothing \sim 50 \text{ \AA}$ . Так что крупинки металла диаметром  $200 - 500 \text{ \AA}$  - это своего рода «серая зона» между металлическими кластерами и монокристаллическим металлом.

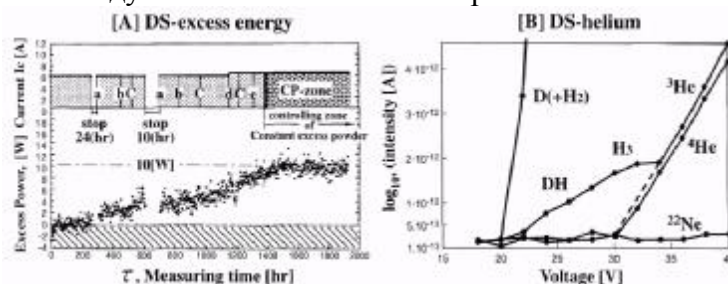


Рис. 13. Выход энергии и изотопов ( ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ), образующихся внутри «ДС- катода открытого типа», для которого можно проводить непрерывное измерение внутрикатодного давления, называемый для краткости «ДС – выход энергии» и «ДС- гелий». [A] ДС- выход энергии; [B] ДС- гелий. Примечание. Левая часть диаграммы: а) текущая остановка; б) тест внутрикатодного газа; в) тест внутрикатодного газа; д) добавка  $20 \text{ cc}$ ; е) добавка  $10 \text{ cc}$ ; CP зона - это контролируемая зона, в которой происходит выделение энергии при постоянной мощности.

В опытах Араты в качестве кластеров металла-абсорбента наилучшие результаты показали наночастицы  $Pd$  размером  $\varnothing \sim 50 \text{ \AA}$ , внедренные в  $ZrO_2$ - матрицу. Поэтому ожидается, что наибольшее количество «глыб пикнодейтерия» ультравысокой плотности образуется внутри отдельной ячейки кристаллической решетки металлического дейтерия с концентрацией  $n^* = 400\%$  (как показано на рис. 11G) при высоком давлении газа  $D_2$ , в диапазоне от нескольких сотен до тысяч атмосфер. В своем эксперименте Йосиаки Арата и Юэчан Чжан использовали именно такие  $Pd$ - кластеры в качестве абсорбента внутри DS- катода с  $D_2O$ - электролитом. На рис. 13 представлен один из последних результатов, определенно указывающих на протекание «ядерного синтеза в твердом теле». Рис. 13А демонстрирует DS- выход избыточной энергии, а на рис. 13В показано образование DS- гелия. С другой стороны, из сказанного следует, что в монокристаллическом палладии невозможно

образование «глыб пикнодейтерия», и, следовательно, осуществление «ядерного синтеза в твердом теле».

В заключение этого раздела следует упомянуть еще об одном чрезвычайно важном результате описываемых исследований. В ходе эксперимента Араты–Чжан установлено, что процессы ХЯС, протекающие в реакторной ячейке, практически не сопровождаются рождением нейтронов. Этот результат вполне согласуется с результатами экспериментов Савватимовой - Карабута.

## 8. Феноменология Киркинского

Модель динамической деформации электронных орбит (ДДЭО) была предложена В.А. Киркинским и Ю.А. Новиковым [15-17]. Она позволяет описать процессы холодного ядерного синтеза в дейтериде палладия на феноменологическом уровне. В основу этой модели положена гипотеза о том, что заряд дейтронов, внедрившихся в кристаллическую решетку металла-абсорбента, экранируется электронами внешних электронных оболочек атомов металла. При расчетах в [15-17] использовались следующие постулаты:

- Электроны на атомных оболочках движутся по непрерывным траекториям  $\phi(\mathbf{r}, \mathbf{t})$  в течение длительного времени. Вероятность присутствия электрона<sup>8</sup> в объеме  $d\Omega$  равна пределу отношения времени  $\Delta t(\phi(\mathbf{r}, \mathbf{t}))$  пребывания электрона в этом объеме к полному времени наблюдения  $T$ :

$$\int_{d\Omega} |\psi|^2 d\mathbf{r} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{\phi(\mathbf{r}, \mathbf{t}) \in d\Omega} \Delta t(\phi(\mathbf{r}, \mathbf{t})). \quad (43)$$

- Кулоновский потенциал описывает взаимодействие всех заряженных частиц – электронов, дейтронов и ядер атомов металла.
- В расчетах эффекта динамического экранирования учитываются только валентные электроны атомов металла. Роль электронов внутренних оболочек атомов металла-абсорбента сводится к тому, что в расчетах присутствует эффективный заряд ядер этих атомов.
- Движение электронов, дейтронов и т.д. описывается с помощью классических уравнений динамики со стохастическим членом  $\Delta \mathbf{F}_{stoch}^{\mathbf{r}}(\mathbf{r}_e(\mathbf{t}))$ , который учитывает случайное взаимодействие с внешними (по отношению к уже учтенным в модели в явном виде) атомами и электронами:

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}_{\{e_i, D_j\}}}{dt^2} = \sum_k \left[ (1 - \delta_{k\{e_i, D_j\}}) \mathbf{F}_{k\{e_i, D_j\}}^{\mathbf{r}}(\mathbf{r}_k(\mathbf{t}), \mathbf{r}_{\{e_i, D_j\}}(\mathbf{t})) \right] + \Delta \mathbf{F}_{stoch}^{\mathbf{r}}(\mathbf{r}_e(\mathbf{t})). \quad (44)$$

В (44)  $\mathbf{r}_{\{e_i, D_j\}}(\mathbf{t})$  означает координату  $i$ -го электрона или  $j$ -го дейтрона в момент  $\mathbf{t}$ ,

$\delta_{k\{e_i, D_j\}}$  -  $\delta$ -символ Кронекера,  $(1 - \delta_{k\{e_i, D_j\}})$  - фактор, позволяющий исключить самодействие частиц,  $\Delta \mathbf{F}_{stoch}^{\mathbf{r}}(\mathbf{r}_e(\mathbf{t}))$  - это случайная внешняя сила, действующая на  $i$ -й экранирующий электрон на внешних оболочках атомов металла,  $\mathbf{F}_{k\{e_i, D_j\}}^{\mathbf{r}}$  - сила, которая действует на  $i$ -й электрон или  $j$ -й дейтрон со стороны  $k$ -й заряженной частицы (электрона, дейтрона или эффективного заряда ядра атома металла):

$$\mathbf{F}_{k\{e_i, D_j\}}^{\mathbf{r}}(\mathbf{r}_k(\mathbf{t}), \mathbf{r}_{\{e_i, D_j\}}(\mathbf{t})) = \frac{Z_k Z_{\{e_i, D_j\}}}{|\mathbf{r}_{\{e_i, D_j\}}(\mathbf{t}) - \mathbf{r}_k(\mathbf{t})|^3} (\mathbf{r}_{\{e_i, D_j\}}(\mathbf{t}) - \mathbf{r}_k(\mathbf{t})) \quad (45)$$

<sup>8</sup> Интеграл от квадрата модуля волновой функции электрона  $|\psi|^2$  по объему  $d\Omega$ .

Интегрируя систему уравнений (44) при различных начальных условиях (т.е., значениях координат  $\mathbf{r}_{\{i,j\}}^0 = \mathbf{r}_{\{e,D_j\}}^0(\mathbf{t} = 0)$ , и скоростей электронов и дейтронов  $\mathbf{v}_{\{i,j\}}^0 = \mathbf{v}_{\{e,D_j\}}^0(\mathbf{t} = 0)$  при  $\mathbf{t} = 0$ ), можно рассчитать наиболее вероятное расстояние максимального сближения двух дейтронов  $\mathbf{r}_{\min}$ .

Для оценки скорости реакции ядерного синтеза при сближении двух дейтронов на расстояние  $\mathbf{r}_{\min}$  можно воспользоваться модельным потенциалом взаимодействия  $V_{D-D}$  – кулоновским потенциалом, уменьшенным на величину энергии экранировки  $E_{\text{screening}}$ :

$$\begin{cases} V_{D-D} = \frac{e^2}{r} - E_{\text{screening}} \\ E_{\text{screening}} = \frac{e^2}{r_{\min}} - \frac{m_D}{2} \left( |\mathbf{v}_{D_1}^0|^2 + |\mathbf{v}_{D_2}^0|^2 \right) \end{cases} \quad (46)$$

Скорость реакции  $\lambda_1$  для результирующего потенциала имеет вид:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{\mu}} \cdot \int_0^{\infty} \sqrt{\varepsilon} f(\varepsilon) \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (47)$$

$n_1$ ,  $n_2$  – плотности, а  $\mu$  – приведенная масса изотопов,  $\varepsilon$  обозначает кинетическую энергию относительного движения сближающейся пары,  $f(\varepsilon)$  – функция распределения пар по энергиям (здесь используется распределение Больцмана), сечение  $\sigma(\varepsilon) = \frac{S_0}{\varepsilon} \cdot P(\varepsilon)$ ,  $S_0$  – обычный спектроскопический фактор для соответствующего типа реакции [46, 47],  $P(\varepsilon)$  – фактор проницаемости барьера в приближении ВКБ:

$$P(\varepsilon) = \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{r_n}^{r_0} \sqrt{2\mu(V_{D-D}(r) - \varepsilon)} dr \right]. \quad (48)$$

где  $r_0$  соответствует классической точке поворота для модельного потенциала  $V_{D-D}(r)$  при энергии  $\varepsilon$ , а  $r_n$  – радиус действия ядерных сил.

Вероятность единичной реакции в работах [17-19] по отдельности вычислялась для каждого значения, полученного в результате вычислительного эксперимента, после чего проводилось усреднение по всем событиям. При вычислении скорости реакции в рамках предложенной модели принималось во внимание то, что в стационарном состоянии в ней участвуют только частицы, способные преодолеть потенциальный барьер между ямами.

Формула, определяющая долю таких частиц – «странников» имеет вид:

$$f_{\text{тин}} = \exp \left[ -\beta \left( \Delta\Phi - \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\Phi''}{m_D}} \right) \right] \quad (49)$$

где  $m_D$  – масса дейтрона,  $\Delta\Phi$  – высота потенциального барьера между соседними ямами, и  $\Phi''$  – кривизна потенциала в окрестности локального минимума в яме, – параметры поля однородной кристаллической решетки, значения которых для некоторых металлов даны в работе [48],  $\beta$  – температурный коэффициент  $1/kT$ .

Эффективный заряд атома-остатка в кристаллической решетке металла и вероятность движения электрона по конкретной траектории для заданных начальных условий вычислялись по формуле (43) с учетом данных по электронной структуре металлов [48]. Компьютерное моделирование было выполнено для дейтерида палладия, так как для него имеются экспериментальные данные по выходу избыточной энергии (см. [42, 49-55]).

Для сокращения времени вычислений использовался метод предварительного компьютерного моделирования [16, 17], с помощью которого в рамках модели ДДЭО были определены наиболее благоприятные начальные условия сближения двух дейтронов в

кристаллической решетке палладия. Оказалось, что эта область расположена на границе двух соседних граней октаэдра (**O**- граней), если частицы симметрично приближаются друг к другу относительно ребра, которое разделяет **O**- грани ячейки кристаллической решетки. Все вычисления были выполнены для малой окрестности начальных условий, наиболее благоприятных для сближения частиц. Далее, была найдена относительная доля частиц в дейтериде палладия, которые удовлетворяют этим выбранным благоприятным условиям. Рассчитанная в рамках ДДЭО- модели скорость реакции была скорректирована на фактор, пропорциональный вероятности возникновения упомянутых благоприятных условий. В рассматриваемом случае почти симметричного сближения частиц относительно границы двух **O**- граней и отклонении их начального положения от оптимума менее чем на  $\pm 0.1 \text{ \AA}$ , поправочный фактор приблизительно равен  $\chi = 10^{-10} - 10^{-12}$ .

С учетом этой поправки скорость реакции, усредненная по множеству случайных модельных событий, равна

$$\lambda = \frac{f^2 \cdot \chi}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (50)$$

В работе [17] моделировалось движение двух дейтронов, находящихся на **O**- гранях в эффективном поле двух атомов **Pd**, расположенных на границе соседних **O**- граней. Каждый из этих атомов **Pd** участвовал в динамическом экранировании одним из своих **4d** электронов. Начальная траектория **4d** электрона задавалась в виде эллипса, в одном из фокусов которого находился атом **Pd** с эффективным зарядом  $Z_{Pd}$ . Большая и малая оси эллипса вычислялись по потенциалу ионизации. При этом предполагалось, что усредненный по времени максимум плотности электронов экранировки соответствует максимуму радиальной плотности **d**- электронов в **Pd**.

При расчете траекторий заряженных частиц для различных начальных условий присутствовали следующие параметры:

- 1) эффективный электрический заряд пассивного остова атомов металла-абсорбента;
- 2) начальные условия для эллиптических траекторий электронов экранировки, включая отличные от наиболее вероятных;
- 3) координаты и скорости сближающихся дейтронов.

Начальные условия для уравнения (44) задавались генератором случайных чисел в диапазоне значений, близких к наиболее благоприятным для максимального сближения дейтронов.

Для того чтобы вычислить возможную скорость **D – D**- реакции синтеза, в работе [17] было проделано три серии вычислительных экспериментов (> 40000 событий) при различных условиях сближения дейтронов. Дейтерий является наиболее интересным из всех изотопов водорода с точки зрения сравнения результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

В первой серии вычислительных экспериментов была рассчитана вероятность сближения дейтронов при энергии  $0.23 \pm 0.005 \text{ eV}$  (высота потенциального барьера для случая диффузии дейтерия в палладию) для начальных условий, максимально близких к наиболее благоприятным (случай сближения, почти симметричного относительно ребер, разделяющих **O**- грани) для случайных начальных координат **4d** электронов. Результаты расчетов в этой серии служат основой для сравнения с результатами расчетов второй и третьей серии.

Среднее расстояние максимального сближения дейтронов составляло  $0.676 \text{ \AA}$  во всех сериях. В пределах точности вычислений, оно соответствовало среднему расстоянию между дейтронами в молекуле **D – D**. Однако около 19% всех событий, разыгранных в

монте-карловском вычислительном эксперименте, соответствовало сближению дейтронов на расстояние менее  $0.1 \text{ \AA}$ . При этом средняя скорость реакции синтеза для первой серии экспериментов составляла  $10^{-10} - 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  на одну  $D - D$  - пару.

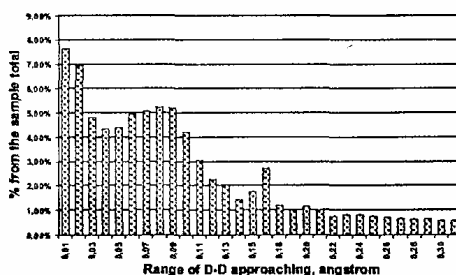


Рис. 14. Распределение  $D - D$  - пар по величине минимального расстояния друг от друга в случае наиболее благоприятных начальных условий.

Во второй серии монте-карловских расчетов в модели ДДЭО условия первой серии дополнялись стохастическим возмущением траекторий электронов экранировки. Среднее расстояние максимального сближения дейтронов во всех сериях составляло  $0.676 \text{ \AA}$ , что соответствует положению минимума молекулярного потенциала  $D - D$  - взаимодействия. Более 19% событий, наблюдавшихся в вычислительном эксперименте, соответствовало сближению дейтронов на расстояние менее  $0.1 \text{ \AA}$ . Вычисленная средняя скорость реакции также составляет  $10^{-10} - 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  на одну  $D - D$  - пару. Это означает, что в среднем влияние стохастических возмущающих факторов на результаты моделирования эффекта динамического экранирования заряда взаимодействующих дейтронов  $4d$  - электронами атомов палладия в рамках ДДЭО- модели является несущественным.

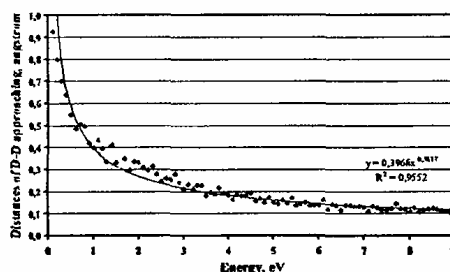


Рис. 15. Усредненный экранированный потенциал  $D - D$  взаимодействия в дейтериде палладия согласно ДДЭО- модели (для наиболее благоприятных начальных условий).

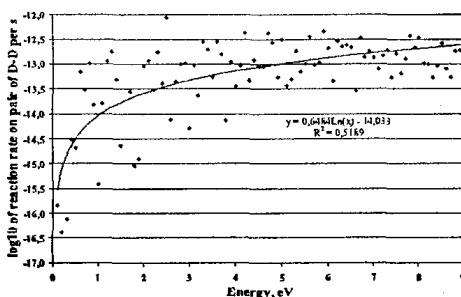


Рис. 16. Энергетическая зависимость скорости  $D - D$  реакции в дейтериде палладия согласно расчетам на основе ДДЭО- модели (для наиболее благоприятных начальных условий).

В третьей серии (в дополнение ко второй серии вычислительных экспериментов) была смоделирована энергетическая зависимость расстояния максимального сближения дейтронов в диапазоне энергий  $0.001 - 9.0 \text{ eV}$ .

На рис. 14 представлено распределение дейтронов по расстоянию максимального сближения. Отдельные исходы стохастических расчетов расстояния максимального сближения и скорости  $D - D$ -реакции в ДДЭО - модели были разбиты на однородные группы событий с шагом  $0.1 \text{ eV}$  по начальным кинетическим энергиям дейтронов, и затем усреднены. Усредненные данные по расстоянию максимального сближения двух дейтронов на границе граней октаэдра в дейтериде палладия, полученные в результате модельных расчетов, показаны на рис. 15. Энергетическая зависимость скорости  $D - D$ -реакции синтеза в дейтериде палладия представлена на рис. 16. На упомянутых рисунках 14-16 представлены результаты расчетов для случая наиболее благоприятных начальных условий без учета поправочного фактора  $\chi$  в формуле (50).

Суммируя результаты работ [15-17], можно с уверенностью сказать, что в них дано четкое доказательство того, что экспериментальные данные по выходу энергии и гелия в реакции ХЯС в дейтериде палладия можно смоделировать в приближении динамической деформации электронных орбит. Однако сама модель Киркинско-Новикова основана на гипотезах ad hoc, поскольку в явном виде содержит подгоночные параметры. Наиболее уязвимыми особенностями модели ДДЭО являются:

- экспоненциальная чувствительность результатов расчетов к вариациям параметров экранированного потенциала дейтрон - дейтронного взаимодействия;
- пренебрежение законами квантовой механики.

### 9. Несостоятельность существующих теоретических подходов

Перечисленные во Введении теоретические запреты на LENR- и ХЯС- процессы убедили основную массу физиков в ошибочности работ по экспериментальной проверке «сумасшедших» идей. Однако в стандартных рассуждениях теоретиков имеются огрехи, обусловленные тем, что оценки вероятности реакций LENR и ХЯС вплоть до последнего времени основывалась на постулате об одноступенчатом туннельном механизме реакций. Исключение составляют теоретические работы П. Хагельстейна [56], а также А. Видома и Л. Ларсена [57] и более поздние работы упомянутых авторов. Однако предположения, использованные в работах [56], [57], также являются ошибочными.

Например, для объяснения результатов эксперимента [39] П. Хагельстейн в работе [56] использовал гипотезу, согласно которой реакция передачи нейтрона от ядра-донора к ядру-акцептору происходит через промежуточное виртуальное состояние непрерывного спектра. Согласно [56] виртуальный переход нейтрона, находящегося в ядре-доноре, из связанного состояния в непрерывный спектр, обусловлен низкочастотными электрическим и магнитным полями. Последующий захват упомянутого виртуального нейтрона ядром-акцептором возможен по причине делокализации волновой функции нейтрона, обусловленной его взаимодействием с кристаллической решеткой. Основным недостатком работы [56] состоит в использовании многочисленных гипотез ad hoc. Если бы механизм Хагельстейна действительно реализовывался в Природе, то он проявил бы себя, в первую очередь, в спонтанных реакциях ХЯС в металлическом литии-6. В ядре  ${}^6_3\text{Li}$  вокруг имеющего огромную энергию связи  $\alpha$ -остова формируется слабо связанное нейтронное гало. В этом случае делокализация волновой функции внутриядерного нейтрона максимальна, и если уж речь зашла о поиске нового физического эффекта, то искать его следует в системах, в которых он может проявиться наиболее ярко. Например, в металлическом образце  ${}^6_3\text{Li}$ , помещенном в сильное магнитное поле. Однако изотоп лития-6 используется в качестве одного из компонентов дейтерида лития, являющегося основным реагентом в неуправляемой реакции ядерного синтеза, протекающей при термоядерном взрыве. Все основные свойства веществ, являющихся компонентами оружейных систем, изучены досконально. Любое упоминание о том, что «начинка» термоядерного устройст-



ва «фонит» сама по себе, за 55 лет, прошедших со времени первого испытания термоядерного оружия, наверняка просочилось бы в печать. Однако информация о самопроизвольных реакциях холодного синтеза в дейтериде лития отсутствует. Но самое главное - по оценкам, проделанным Хагельстейном в работе [56], частота виртуальных переходов в дейтериде палладия составляет порядка  $\omega_{cold\ fusion} \sim 10^{-60} \text{ sec}^{-1}$ , что совершенно недостаточно для объяснения обсуждаемого феномена.

В еще большей степени подвержены критике работы А. Видома и Л. Ларсена (см. [57] и последующие работы этих авторов). Для объяснения результатов экспериментов Й. Араты [42] в работе [57] (и в дальнейших работах) было сделано предположение о том, что электрон внутри кристалла пикнодейтерия «тяжелеет» настолько, что может быть захвачен протоном. В результате реакции электронного захвата образуется нейтрон и электронное нейтрино. Весь дефицит энергии, необходимой для того, чтобы открылся канал реакции  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ , авторы [57] списывают на перенормировку массы электрона. К сожалению, подход Видома и Ларсена не согласуется с общеизвестным фактом отсутствия  $\beta$ -активности у обычной дистиллированной воды высокой степени очистки. В силу этого банального обстоятельства гипотеза Видома - Ларсена не может быть признана правильной. Другими словами, концепция этих авторов является изначально ошибочной.

Несколько лучше выглядит феноменологический подход, предложенный в работах В.А. Киркинского и Ю.А. Новикова [17-19]. Но, как уже упоминалось ранее, и эти работы содержат гипотезу ad hoc. По мнению авторов, ослабление кулоновского отталкивания ядер дейтерия в палладиевой матрице связано с эффектом экранировки. Однако оценки эффекта экранировки сделаны с использованием абсолютно неочевидных допущений, требующих дополнительного обоснования. Другими словами, теоретическое объяснение реакции холодного синтеза, предложенное в работах [17-19], не может быть признано адекватным физике изучаемого явления.

За последние 20 лет кроме упомянутых выше теорий холодного ядерного синтеза было предложено два-три десятка подходов, ни один из которых никак не вписывается в известные законы ядерной физики. В рамках современных теоретических представлений процессы низкоэнергетической трансмутации химических элементов в принципе не могут быть объяснены, поскольку доля изменяющихся ядер столь ничтожна, что не может быть обнаружена экспериментально.

Суммируя результаты теоретических работ, посвященных проблеме ХЯС, можно сказать, что в настоящее время в научной литературе отсутствуют публикации, в которых было бы дано приемлемое объяснение накопленных за десятилетия экспериментальных данных на основе общепринятых подходов. К сожалению, в запале отнюдь не научной бурной полемики была упущена практически единственная возможность нормального объяснения явления ХЯС в рамках ортодоксальной ядерной физики. По непонятной до сих пор причине никем не рассматривались ядерные процессы, в которых принимают участие метастабильные нейтральные составные частицы, долгоживущие по ядерным масштабам времени. Именно с этих позиций мы и обсудим возможность объяснения ХЯС на основе известных законов физики.

## 10. Полумикроскопическое описание ХЯС

Факт существования метастабильных химических элементов, которые образуются в результате ядерных реакций, установлен давно и надежно. В ядерной физике к таковым относятся, прежде всего, радиоактивные изотопы, принадлежащие семействам урана и тория, а также трансураны. Всемирно известные научные школы и направления в ядерной физике занимаются теоретическими предсказаниями [66], а также экспериментальной проверкой существования так называемых «островов стабильности» [67]. В рамках этих

научных направлений изучаются ядерные реакции и распады, в которых метастабильным оказывается либо «голое» положительно заряженное ядро, либо атом с частично или полностью заполненными электронными оболочками. В научной литературе нет работ, посвященных проблеме образования метастабильных электрически нейтральных атомов, в которых роль электрона выполняет нейтрино, удерживаемое в течение определенного времени слабым взаимодействием внутри нуклонного кластера (ди- или тринейтрона).

Реакция электронного захвата относится к числу очень хорошо изученных слабых процессов. Однако в настоящее время теория электронного захвата разработана лишь для реакции  ${}^A_Z\mathbf{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\mathbf{Y} + \nu_e$ , то есть для случая, когда в конечном состоянии регистрируется ядро отдачи. Если говорить о проблеме ХЯС, то даже в наиболее близких по идеологии работах Видома и Ларсена в расчет принимаются только реальные нейтрино в конечном состоянии [57]. В то же время не существует каких-либо принципиальных запретов на возможность образования связанных состояний  $({}^A_{Z-1}\mathbf{Y} + \nu_e)_b$  в слабых процессах [69]. Эти процессы элементарно выкидываются из рассмотрения в силу того, что все специалисты в области ядерной физики всегда выполняют расчеты в приближении нейтрино нулевой массы, которые принципиально не могут образовывать связанных состояний. Волновые функции безмассовых нейтрино всегда считаются плоскими волнами.

Что касается многоступенчатых ядерных реакций, то такие процессы идут через виртуальные промежуточные состояния. Причем у ядерных процессов, обусловленных слабым взаимодействием, имеется редко встречающаяся в ядерной физике специфика. Основная проблема экспериментального исследования многоступенчатых процессов, в которых виртуальное промежуточное состояние ядра образуется в результате реакции виртуального захвата электрона с электронной оболочки материнского атома, состоит в том, что в итоге регистрирующие приборы могут обнаружить только ничтожно малое изменение первоначального химического состава вещества. Эти реакции, как правило, не сопровождаются появлением жесткого ионизирующего излучения. Зарегистрировать же низкоэнергетические нейтрино, которые рождаются в обсуждаемых слабых процессах в строгом соответствии с законами физики, невозможно в принципе. Эта ненаблюдаемость нейтрино обусловлена небольшой интенсивностью их потока, а, главное, невообразимо малой величиной сечения реакции  $\nu_e + {}^A_Z\mathbf{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\mathbf{Y} + e^-$ . Учитывая данную особенность слабых процессов, мы начнем изложение нового взгляда на проблему ХЯС с анализа мысленного эксперимента с химически чистым дейтерием.

При нормальных условиях дейтерий находится в газообразном состоянии. Этот газ состоит из двухатомных молекул  ${}^2_1\mathbf{H}_2$  (по-другому  $\mathbf{D}_2$ ). Химически чистый газообразный дейтерий при температуре приблизительно  $T \approx 21 \text{ K}^\circ$  испытывает фазовый переход, и переходит в жидкое состояние, а при  $T \approx 14 \text{ K}^\circ$  сжиженный дейтерий кристаллизуется. Брусок твердого дейтерия представляет собой поликристалл с гексагональной решеткой.

Рассмотрим инклюзивную реакцию электронного захвата:



Пусть родительский дейтрон находится в узле кристаллической решетки в кристалле твердого дейтерия. В результате реакции (51) образуется связанное состояние динейтрона с электронным нейтрино (назовем его динейтроном). Образование связанного состояния электронного нейтрино с нуклонами не запрещено законами ядерной физики, поскольку это нейтрино имеет отличную от нуля массу покоя  $m_{\nu_e} \sim 2 \text{ eV}$  [58]. Этот необычный компаунд не испытывает электростатического отталкивания со стороны соседних узлов кристаллической решетки, ибо имеет нулевой электрический заряд. Электростатическое взаимодействие перестает удерживать динейтроны в узле кристаллической решетки, и он

начинает свободно блуждать по кристаллу. В этом случае мы имеем полную физическую аналогию между поведением динейтрона в кристаллах твердого дейтерия и движением куперовских пар в сверхпроводниках.

Как реакция образования атома динейтрона  $\mathbf{d} + \mathbf{e}^- \rightarrow (2\mathbf{n} + \nu_e)_b$  (для краткости далее мы опускаем слагаемое  $\mathbf{X}$ , обозначающее нерегистрируемые частицы в конечном состоянии реакции (51)), так и реакция распада  $(2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{d} + \mathbf{e}^-$ , обусловлены слабым взаимодействием. Поэтому характерное время пребывания атома дейтерия в состоянии  $(2\mathbf{n} + \nu_e)_b$  достаточно велико по сравнению с характерным временем протекания ядерных реакций, обусловленных сильным взаимодействием.

Предварительные теоретические оценки и анализ имеющихся экспериментальных данных показывают, что время жизни динейтрона столь велико ( $\tau_{(2n+\nu_e)_b} \sim 10^{-6} - 10^{-8} \text{ s}$ ), что за это время он успевает сместиться на заметное расстояние от своего равновесного среднестатистического положения - узла решетки кристаллического дейтерия. При этом смещение центра масс динейтрона относительно исходного положения материнского дейтрона оказывается соизмеримым с периодом кристаллической решетки. Этого вполне достаточно для того, чтобы его волновая функция перекрылась с волновой функцией дейтрона, находящегося в соседнем узле кристаллической решетки. В результате резко возрастает сечение ядерной реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{n} + \nu_e$ , которая сопровождается значительным выходом энергии  $E_r \approx 3.25 \text{ MeV}$ . Тот же механизм работает и в реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{p} + \mathbf{e}^-$ , в которой примерно  $3 \text{ MeV}$  высвобождающейся энергии приходится на заряженные частицы. В дальнейшем  $\beta^-$ -распад ядра трития приводит к появлению  ${}^3_2\text{He}$ , который неоднократно регистрировали экспериментаторы, работавшие с образцами дейтериевого льда, и к дополнительному выделению энергии.

Особо отметим, что существенный вклад процесса  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{p} + \mathbf{e}^-$  в сечение реакции синтеза трития с участием динейтрона приводит к резкой асимметрии выхода трития и нейтронов, наблюдаемой в реакциях холодного ядерного синтеза.

Необходимо также отдельно указать на то, что для дейтрона, закрепленного в узле кристаллической решетки, в отличие от свободного дейтрона, открыт канал инклюзивной реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\text{He} + \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} = \mathbf{e}^-, \nu_e, \gamma \dots$ . Столь «наглое» нарушение законов сохранения в этой экзотической реакции обусловлено тем, что взаимодействующие дейтроны, образующие кристалл, погружены в «море» коллективизированных электронов. Поэтому они могут взаимодействовать как два ядра атома дейтерия, а также как дейтрон и динейтроний, и как два атома динейтрона. Следовательно, образование  ${}^4_2\text{He}$  из двух соседних «узловых» дейтронов, сопровождающееся рождением перечисленных выше лептонов, не запрещено законами сохранения электрического или лептонного зарядов. Кроме того, при низких температурах весь импульс отдачи может принимать кристалл льда. Поэтому в инклюзивной реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\text{He} + \mathbf{X}$  законы сохранения энергии и импульса не нарушаются. Другими словами, мы имеем полную физическую аналогию с эффектом Мёссбауэра, когда импульс отдачи целиком передается кристаллу. Существенное отличие реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\text{He} + \mathbf{X}$  на уединенном дейтроне от эффекта Мёссбауэра состоит в том, что эта реакция не запрещена законами сохранения энергии и импульса. Например, если энергия дейтрона-снаряда превышает порог реакции, то в реакциях с выходом мюонов ее сечение не равно нулю. Оно просто невелико из-за

малости масс нерегистрируемых лептонов. Поглощение импульса отдачи кристаллом дейтерия приводит к резкому увеличению сечения реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\mathbf{He} + \mathbf{X}$ .

Характерными особенностями реакции синтеза  ${}^4_2\mathbf{He}$  в кристалле дейтерия также являются:

1) отсутствие нейтронной компоненты в потоке частиц, рождением которых сопровождается образование ядер  ${}^4_2\mathbf{He}$ ;

2) огромный удельный выход энергии, составляющий приблизительно  $24 \text{ MeV}$  на один атом гелия [22].

В рамках развиваемого подхода результаты Араты и Чжан получают естественное объяснение. Механизм этой реакции абсолютно идентичен механизму генерации нейтронов в блоке дейтериевого льда. Единственное существенное отличие состоит в том, что в эксперименте Араты - Чжан дейтериевые кластеры удерживает в связанном состоянии не низкая температура льда, образовавшегося из тяжелой воды, а палладиевая матрица. В результате атомы динейтрона успевают вступить в реакцию с дейтронами за время его жизни  $\tau_{(2\mathbf{n} + \nu_e)_b}$ .

Отсутствие потока нейтронов обусловлено тем, что холодный синтез в реакторной ячейке происходит в результате реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\mathbf{He} + \mathbf{X}$ . Нейтроны в выходном канале этой реакции отсутствуют, а низкоэнергетические нейтрино обнаружить в условиях эксперимента Араты абсолютно нереально. Да их там никто и не искал!

И последнее очень важное обстоятельство. Соотношение между вкладом основных каналов в сечение реакции холодного ядерного синтеза  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{n} + \nu_e$ ,  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^3_2\mathbf{He} + \mathbf{p} + \mathbf{e}^-$  и  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\mathbf{He} + \mathbf{X}$  определяется средним расстоянием  $\langle l_d \rangle$  между атомами дейтерия в веществе-абсорбенте. В опытах Й. Араты это расстояние существенно меньше, чем в экспериментах Б.В. Дерягина  $\langle l_d \rangle_{arata} = \langle l_d \rangle_{deryagin}$ . Именно с этим обстоятельством связано то, что в одном случае не было зафиксировано рождения нейтронов, а в другом случае дейтериевый лед не испускал  $\alpha$ -частиц.

Еще одним важным фактором, повлиявшим на отличие механизмов реакций Б.В. Дерягина и Й. Араты, является различие в массах ядер кислорода и палладия. Тяжелый палладий может поглотить весь избыток импульса, появляющийся в реакции  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\mathbf{He} + \mathbf{X}$ , а легкий кислород не в состоянии принять на себя большой импульс при малой передаче энергии. Эксперименты Араты и Дерягина проводились при температурах, достаточно близких к комнатной. Поэтому механизм поглощения импульса кристаллической решеткой (эффект Мёссбауэра) в этих реакциях, в отличие от реакций в кристаллическом дейтерии, не работал. Именно поэтому в опытах по колке дейтериевого льда открытыми оказались только каналы реакций  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{n} + \nu_e$  и  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^3_2\mathbf{He} + \mathbf{p} + \mathbf{e}^-$ . Рождение  $\alpha$ -частиц в этих реакциях строго запрещено законами сохранения энергии и импульса.

Следует отметить, что ядерные реакции, аналогичные описанным выше, протекают и в газообразном, и в жидком дейтерии. Однако в этом случае вероятность реакций синтеза трития  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{n} + \nu_e$ ,  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow \mathbf{t} + \mathbf{p} + \mathbf{e}^-$  и изотопов гелия  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^3_2\mathbf{He} + \mathbf{n} + \mathbf{e}^-$  и  $\mathbf{d} + (2\mathbf{n} + \nu_e)_b \rightarrow {}^4_2\mathbf{He} + \mathbf{X}$  существенно меньше, чем в кристаллическом дейтерии. Столь необычная зависимость вероятности элементарного процесса от агрегатного состояния дейтерия связана с тем, что время жизни динейтрона  $(2\mathbf{n} + \nu_e)_b$  достаточно велико только по ядерным меркам. Характерная длина его пробега

$$I_{\text{eff}} = p_r \cdot \langle v \rangle \cdot \tau_{(2n+\nu_e)_b}, \quad (52)$$

где  $\langle v \rangle$  - средняя скорость динейтрония, а  $p_r$  - вероятность реакции синтеза, соизмерима с периодом кристаллической решетки  $a$ . Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, косвенно подтверждающие факт существования холодного ядерного синтеза.

Плотность дейтронов-мишеней в жидкой, и, в особенности, в газообразной фазе, гораздо меньше, чем в твердой фазе. Поэтому волновая функция динейтрония-снаряда не успевает достаточное число раз перекрыться с волновой функцией дейтрона-мишени за время его жизни  $\tau_{(2n+\nu_e)_b}$ . Другими словами, поскольку среднее расстояние  $\langle l_d \rangle$  между дейтронами-мишенями слишком велико ( $\langle l_d \rangle \gg I_{\text{eff}}$ ), то для осуществления реакции ХЯС с достаточной для ее осуществления вероятностью необходимо, чтобы было выполнено условие

$$I_{\text{eff}} \geq \langle l_d \rangle. \quad (53)$$

В заключение этого раздела отметим, что вероятность реакции холодного синтеза можно регулировать, сообщая ускорение образцу дейтерированного вещества. В этом случае силы инерции приводят к росту скорости движения динейтронов относительно дейтронов, и, следовательно, к увеличению длины их пробега  $I_{\text{eff}} = p_r \cdot \langle v \rangle \cdot \tau_{(2n+\nu_e)_b}$ . Это обстоятельство делает реакцию холодного ядерного синтеза управляемой!

## 11. Критерии оценки результатов эксперимента

### 11.1. Что есть истина?

Одной из причин, по которым научное сообщество в течение продолжительного времени отвергало «трансмутаологическую» интерпретацию экспериментов Й. Араты и других исследователей, являлось отсутствие (или чрезвычайная малость) выхода нейтронов в заявленных реакциях холодного синтеза.

Физики настолько привыкли к тому, что в ядерных реакциях деления и слияния практически всегда рождаются нейтроны, что не проводили оценки вклада конкретных каналов в сечения реакции ХЯС по принципу «и так все ясно». А ясно далеко не все.

Дело в том, что экстраполяция наших интуитивных представлений, сложившихся на основе опыта работы с ядерными реакциями в области энергий порядка нескольких МэВ, в область низких и сверхнизких энергий, является заведомо некорректной. Это обусловлено существенным различием энергетической зависимости сечений реакций синтеза  $d + d \rightarrow {}^4_2\text{He} + X$ ,  $d + d \rightarrow t + n + \nu_e$ ,  $d + d \rightarrow {}^3_2\text{He} + p + e^-$  в области низких энергий, связанным, в первую очередь, с наличием порога у анализируемых реакций.

Пороговые эффекты по самой своей сути проявляются лишь при низких энергиях, в частности, в реакциях холодного синтеза в конденсированных средах. Именно поэтому критерием истины – есть эффект, или нет эффекта – в области сверхнизких энергий (ХЯС) должны служить не только потоки нейтронов, но и других частиц, например,  $\alpha$ - частиц. В экспериментах Араты они фиксировались – в катоде его установки был обнаружен  ${}^4_2\text{He}$ . В этой связи имеет смысл напомнить историю рождения ядерной физики.

### 11.2. Гелий и трансмутация

В 1908 году Шведская академия наук удостоила родоначальника ядерной физики Эрнста Резерфорда Нобелевской премии по химии.

В ответ на поздравительные тосты на банкете в королевском дворце «с простотой, полной грации» он произнес речь: «Мне приходилось иметь дело с весьма различными трансмутациями, обладавшими разной продолжительностью во времени, но быстрейшая из всех, какие я встречал, это моя собственная трансмутация из физика в химика - она произошла в одно мгновение...».

... каждый лауреат должен был выступить в Стокгольме с лекцией по своей научной дисциплине. И на следующий день, 11 декабря, Резерфорду предстояло в самом деле обернуться химиком - не на мгновение, а на целый лекционный час<sup>9</sup>.

Еще в Манчестере он решил говорить, конечно же, об альфа-частице - о десятилетней истории ее открытия и изучения. Надо было только сделать химикоподобным название лекции. Это не составило труда: «Химическая природа альфа-частиц радиоактивных веществ».

Вообще-то говоря, суть такого сообщения могла быть исчерпана коротким словом: «гелий». Но только слово коротко, а смысл долог.

Как нельзя более кстати, за месяц до отъезда в Стокгольм он сумел получить безусловное доказательство полной идентичности газа из альфа-частиц и обыкновенного гелия. Не косвенное, не расчетное, не логическое, а самое вещественное доказательство - как для суда. Со временем оно сделалось в физике притчей - притчей о гении и простоте.

Это была одна из работ, проведенных Резерфордом совместно с магистром Ройдсом, к которому он питал особые чувства: подобно ему самому, молодой Ройдс был стипендиатом 1851 года. Но что крайне важно - два физика сотрудничали в этой работе со стеклодувом. То был случай, когда от фантастического мастерства весьма ограниченного ремесленника зависел весь исход задуманного эксперимента. Шеф и его ассистент, вероятно, и не подумали бы браться за дело, если бы Отто Баумбах (во многих отношениях малоприятный субъект) не объявил во всеуслышанье, что берется выдувать сосудики со стенками толщиной в одну сотую миллиметра!

Конечно, в таком сосудике можно было надежно запереть любой газ - и воздух, и эманацию, и обычный гелий: молекулы, движущиеся с малыми тепловыми скоростями, пробиться даже через столь тонкую стенку не могли. Но для стремительно летящих альфа-частиц она должна была оказаться прозрачной. Почти как для света. Энергии альфа-частиц хватало на преодоление слоя воздуха толщиной в 5-7 сантиметров, а стеклянный листок в 0,01 миллиметра служил для них не более трудным барьером, чем двухсантиметровый воздушный слой. Получалось, что они могли пролететь без поглощения еще 3-5 сантиметров и за пределами сосудика Баумбаха. Наполнив такой сосудик эманацией, это несложно было проверить по вспышкам на сцинтилляционном экране.

Но, не прихвастнул ли немец-стеклодув, большие всего любивший в Англии манчестерское пиво? Однажды, поздней осенью 1908 года, Резерфорд сказал магистру Ройдсу, что если Баумбах действительно совершит обещанное чудо и даст им свою тонкостенную трубочку, они наполнят ее эманацией, поместят в другой - более широкий - сосуд, откачают из последнего воздух до возможного предела, терпеливо подождут, пока в этом внешнем сосуде накопится побольше альфа-частиц, и посмотрят по спектру, что такое альфа-газ? У него, у Резерфорда, нет ни малейших сомнений, что это гелий.

Баумбах обещанное чудо совершил. Ройдс тоже не остался в долгу: экспериментальная установка была собрана так, что ниоткуда не мог пробраться в нее воздух, всегда содержащий гелиевую примесь, которая могла бы спутать все карты. Вообще опыт был подготовлен мастерски. Оставалось ждать и проводить регулярные наблюдения спектра.

Когда кончились первые сутки, Ройдс меланхолично вошел в кабинет-лабораторию шефа и сказал:

- Ничего не видно...

Когда кончились вторые сутки, он вбежал, и с порога крикнул:

- Появилась желтая гелия!

---

<sup>9</sup> Выделенный курсивом текст представляет собой обширную цитату из книги Д. Данина [59].

К концу четвертых суток Резерфорд сидел у спектроскопа сам. Уже отчетливо сияли хорошо ему знакомые и желтая и зеленая линии. А к концу шестого дня в окуляр был виден весь набор интенсивных линий гелиевого спектра. Теперь можно было отдавать старую проблему на суд самых строптивых присяжных - химическая природа альфа-частиц раскрылась совершенно однозначно!

А баумбаховы трубочки с эманацией, по-видимому, именно с этого времени стали в Манчестерской лаборатории обыденнейшими источниками альфа-излучения: виртуоз-стеклодув изготовлял их легко и во множестве. Позднее, летом 1914 года, их очень поэтически описал в «Письме из Манчестера» выдающийся русский физико-химик Николай Шилов: «Это тончайшие стеклянные полые нити... Они светятся сами и заставляют экран из сернистого цинка блестеть, как перо жар-птицы, ярким голубым сиянием неопикуемой красоты».

Разумеется, в краткой нобелевской лекции Резерфорд обо всей той истории не рассказывал. Привел только блистательный ее итог. И о Баумбахе ни словом не обмолвился. Но в редакции «Philosophical magazine» уже лежала совместная статья Резерфорда и Ройдса, где роль «мистера Баумбаха» была тщательно и с благодарностью подчеркнута.

## 12. Experimentum crucis

Наиболее убедительные экспериментальные данные, неоспоримо подтверждающие факт существования dineйтрония, получены несколько лет тому назад Г.П. Хандориным и В.Н. Шадриним в Томском атомном центре [68].

В рамках плановых исследований РАН, направленных на поиск новых источников энергии, группа томских ученых исследовала взаимодействие электронов с дейтронами. В результате этих исследований был предложен новый способ получения атомной энергии [68]. Согласно поданной Г.П. Хандориным и В.Н. Шадриним заявке на изобретение, этот способ включает в себя генерацию нейтроноподобных частиц с избыточным значением внутренней энергии.

Из текста формулы изобретения и реферата следует, что авторы воздействовали на атомы дейтерия пучком электронов. Атомы дейтерия инжектировались в стационарный пучок электронов с силой тока около  $2.5 \text{ A}$ , и энергией электронов, изменяющейся вдоль их траектории по формуле

$$E(x) = \begin{cases} E_0 & \text{if } 0 < x \leq x_0 \\ E_0 \cdot [1 + k \cdot (x - x_0)] & \text{if } x > x_0 \end{cases} \quad (54)$$

где  $k = c_p / (x_p - x_0)$ ,  $1 < c_p < 2$  - безразмерный коэффициент,  $E_0 = 12 - 13 \text{ eV}$  - начальная энергия электронов;  $x$  - текущая координата транспорта пучка;  $x_0$  - координата точки начала возрастания энергии электронов пучка;  $x_p$  - координата точки, в которой заканчивается преобразование атома дейтерия, дрейфующего вдоль пучка, в нейтроноподобную частицу;  $k$  - коэффициент, определяющий градиент энергии электронов пучка вдоль его транспорта. В своих экспериментах Г.П. Хандорин и В.Н. Шадрин вводили атомы дейтерия в околопучковое пространство непосредственно перед участком возрастания энергии электронов. В результате они наблюдали превращение атомов дейтерия в нейтроноподобные частицы с избыточным значением внутренней энергии.

К сожалению, в [68] результаты эксперимента не были интерпретированы должным образом, так как отсутствовала теория, способная объяснить эффект исчезновения электрического заряда у дейтрона на основе известных законов физики. Теория, в рамках которой нейтроноподобные частицы с избыточным значением внутренней энергии интерпретируются как атомы dineйтрония, была создана только в 2008 году [69].

### 13. Холодный синтез в стакане воды

Проблеме сонолюминесценции посвящены многочисленные работы (например, [60-62] и ссылки в них). Последнее время наибольшую известность получили результаты экспериментов, поставленных группой учёных из политехнического института Ренсселера (Rensselaer Polytechnic Institute), университета Пардью (Purdue University) и Российской академии наук. Работы этой группы по ядерному синтезу систематически публикуются в весьма солидных журналах [61-62].

В этих работах речь идёт о «соносинтезе» (sonofusion) - возникновении реакций ядерного синтеза в растворе внутри схлопывающихся пузырьков газа, в которых согласно данным экспериментов на короткое время достигаются огромные температуры. Данное явление получило название «сонолюминесценция».

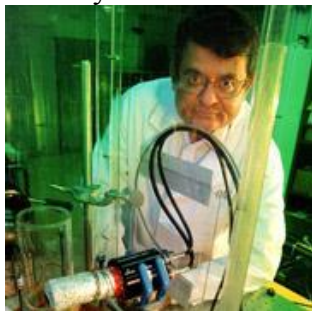


Рис. 17. R. Taleyarkhan

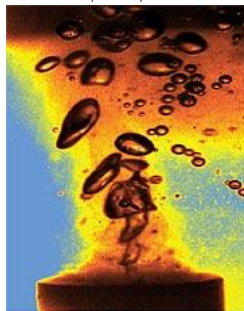
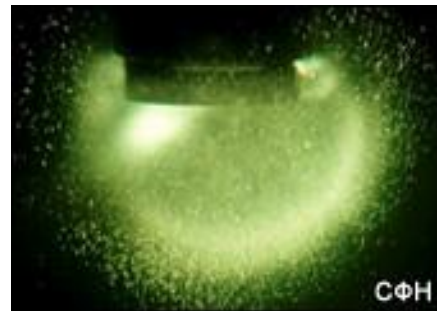


Рис. 18. Чудо сонолюминесценции



Сонолюминесценцию вполне обоснованно можно считать разновидностью ХЯС, потому, что реакция идёт в простой настольной лабораторной установке, а не в токамаке, и не в установке лазерного термоядерного синтеза. Кроме того, высокая температура внутри пузырька является скорее следствием реакции синтеза, нежели его причиной.

Последние годы в экспериментах по сонолюминесценции принимали активное участие академик РАН Роберт Нигматулин и американцы Ричард Лейхи (Richard Lahey), Роберт Блок (Robert Block) и Рузи Талейархан (Rusi Taleyarkhan).

Эксперименты, поставленные группой Талейархана, показали, что звуковые волны в смеси ацетона и бензола генерируют пузырьки паров этих веществ, при схлопывании которых и происходит ядерный синтез, обнаруживаемый по нейтронному излучению. Это наиболее простой способ наблюдения и измерения констант реакций холодного ядерного синтеза.

При сонолюминесценции интенсивность свечения пузырьков существенно зависит от процентного соотношения атомов водорода и дейтерия, входящих в состав молекул химических соединений, присутствующих в исследуемой жидкости. По этой причине в предлагаемых контрольных экспериментах планируется использовать смесь обычной и тяжелой воды, поскольку и бензол, и ацетон, и вода, являются водородосодержащими веществами, а процентное соотношение изотопов одного и того же элемента в разных химических соединениях практически постоянно. Поэтому явление сонолюминесценции, наблюдаемое в смеси бензола с ацетоном, должно наблюдаться и в водных растворах.

Многочисленные скептики в течение продолжительного времени критиковали экспериментаторов за использование в своих опытах внешнего источника нейтронов, под действием которых в жидкости начинался процесс образования пузырьков насыщенных паров. В последние годы в опытах Р. Талейархана для инициации процесса образования в жидкости пузырьков пара в раствор добавлялся природный уран. Для регистрации реакции синтеза исследователи использовали три нейтронных счетчика и один гамма-датчик. Все четыре датчика независимо показали статистически существенное увеличение потока нейтронов при возникновении сонолюминесценции. Энергетический спектр нейтронов четко указывает на то, что они рождаются в реакции  $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ .



Установка Р. Талейархана потребляет намного больше энергии, чем производит, и служит чисто исследовательским целям, в частности, в качестве портативного источника нейтронов для различных экспериментов. Однако она вполне подходит для проведения серии контрольных опытов, поскольку является очень простой и дешевой.

#### **14. Технологические приложения ХЯС**

Одной из причин, по которой большая часть научной общественности прохладно относится к явлению ХЯС, является чрезмерно оптимистическая оценка возможности обеспечения человечества даровой энергией, присутствующая в работах многочисленных изобретателей реакторов холодного синтеза. К сожалению, обещания быстрого, легкого, а главное, дешевого успеха выглядят заманчиво только в проектах или бизнес-планах.

На пути перевода глобальной энергетики с углеводородов на тяжелую воду стоит множество препятствий. Перечислим некоторые из них.

1. Теория ХЯС, основанная на известных физических законах, находится в зачаточном состоянии. В настоящем обзоре приведены выдержки из моих неопубликованных работ. Качественно картина ХЯС уже вполне ясна, однако, до создания полной и строгой физической теории пока еще далеко.

2. Основная масса экспериментов по ХЯС и LENR направлена на доказательство того, что эти явления существуют. Но доказывать это бессмысленно. Явления ХЯС и LENR были открыты Л.У. Альваресом, и отмечены Нобелевской премией 1968 года.

3. Имеющиеся опытные образцы реакторов (как правило, демонстрационных) имеют небольшую мощность [63-65]. Энтузиасты-изобретатели в массе своей создавали эти реакторы либо в надежде на получение Нобелевской премии за свое открытие, либо, пытаясь получить инвестиционные ресурсы для продолжения работ.

4. В этих реакторах ХЯС идет в неуправляемом режиме, поскольку изобретатели в основной массе просто не знакомы ни с квантовой теорией, ни с ядерной физикой, а без этих знаний создать эффективную систему управления реактором невозможно.

5. На основе имеющегося опыта создания миниатюрных неуправляемых реакторов ХЯС малой мощности в принципе невозможно спроектировать энергетический реактор управляемого синтеза, пригодный для выработки тепловой и электрической энергии в промышленных масштабах.

Имеется обоснованная надежда преодолеть эти препятствия в течение одного-двух десятилетий [70-71].

#### **15. Заключение**

Резюмируем вышесказанное.

1. Как «низкоэнергетическая трансмутация химических элементов», так и «холодный ядерный синтез», существуют. Явления LENR и ХЯС были открыты Л.У. Альваресом. Именно за эти открытия он был удостоен Нобелевской премии по физике в 1968 году.

2. Явления LENR можно классифицировать следующим образом:

а) ядерный синтез в холодном водороде;

б) электронный захват;

в)  $\beta$ -распад в связанное состояние<sup>10</sup>, экспериментально исследованный коллаборацией GSI;

г) «низкоэнергетическая трансмутация химических элементов», давно обнаруженная в электроразрядных, кавитационных и т.п. экспериментах со стабильными изотопами, но, по мнению большинства физиков, никак не вписывающаяся в современную физическую картину мира.

---

<sup>10</sup> Теория этого процесса на сегодняшний день разработана недостаточно подробно.

3. На сегодняшний день явление ХЯС в конденсированных средах достаточно подробно изучено экспериментально.
4. Проницаемость кулоновского барьера дейтрона весьма эффективно регулируется при помощи внешних воздействий (например,  $\mu$ -катализа или внешнего давления).
5. На сегодняшний день можно однозначно утверждать, что холодный ядерный синтез в конденсированных средах происходит благодаря образованию короткоживущих атомов дейнетрония в инклюзивной реакции электронного захвата  $d + e^- \rightarrow (2n + \nu_e)_b + X$ .
6. Представляется целесообразным создание подробной микроскопической теории ХЯС.
7. Экспериментальная проверка наиболее существенных предсказаний этой теории вкуче с прецизионным измерением основных констант реакции ядерного синтеза в конденсированных средах позволит перейти от PR- кампании по пропаганде «новых источников энергии» к реальному проектированию небольших энергетических установок. А уже на базе действующих лабораторных установок следует обрабатывать элементы технологий, необходимых для создания промышленных реакторов.

### Благодарности

Выражаю глубокую благодарность В.А. Сойферу и Н.Л. Казанскому за моральную, организационную и административную поддержку.

Благодарю также Л.Г. Сапогина, В.И. Фурмана, Ю.В. Попова, В.А. Киркинського и В.А. Жигалова за многочисленные дискуссии, в результате которых на свет появилась эта работа.

Особую благодарность выражаю Ф.А. Гарееву, который первым ознакомил меня с проблемами холодного ядерного синтеза и  $\beta$ -распада в связанное состояние.

Искренне благодарю моих учителей – профессоров И.С. Баткина и И.В. Копытина, под руководством которых я в свое время освоил физику  $\beta$ -процессов.

Благодарю А.М. Зубрилина за финансовую поддержку.

Искреннюю благодарность выражаю своей семье - жене Е.В. Ратис и сыну Г.Ю. Ратису. В течение продолжительного времени они постоянно и усердно помогали мне в работе.

### Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Герштейн С.С. Ядерные реакции в холодном водороде. УФН. Т.71. вып. 4. (1960) с.581-630.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. Часть 2. М.: Наука. 1989. 416 с.
3. Daudel R., Jean M., and Lecoïn M. J. Phys. Radium **8**, 238, 1947.
4. Bahcall J.N. Phys. Rev. **124**, 1961, p. 495.
5. Jung M. *at al.* Phys. Rev. Lett., **69**, №15, 2164 (1992)
6. Bosh F., *at al.* Phys. Rev. Lett., **77**, №26, 5190 (1996)
7. Ratis Yu.L. Physics of Particles and Nuclei Letters. vol. 2. №6 (**129**). JINR. Dubna. 2005. pp.374-383.
8. Alvarez L.W., Bradner H., Crawford F.S. Jr., Crawford J.A., Falk-Vairant P., Good M.L., Gow J.D., Rosenfeld A.H., Solmitz F., Stevenson M.L., Ticho H.K. and Tripp R.D., Phys. Rev. **105**, 1127 (1957).
9. Сахаров А.Д. Пассивные мезоны, Отчет ФИАН (1948).
10. Frank F.C., Nature **160**, (1947) p. 525.
11. Зельдович Я.Б., Реакции, вызываемые  $\mu$ - мезонами в водороде.// ДАН **95** (1954) с.493.
12. Gamov G.A.// Zeitschrift für Physik. 1928. v.51. p.204; v.52. p.510.
13. Кадменский С.Г., Фурман В.И. Альфа-распад и родственные ядерные реакции, М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. R- matrix Theory of Nuclear reactions.// Lane A.M., Thomas R.G. //Review of Modern Physics. 1958. V.30. №2. pp.257-353.
15. Kirkinskii V.A., Novikov Yu.A. A new approach to theoretical modeling of nuclear fusion in palladium deuteride.// Europhysics Letters. 1999. v.46. №4. pp.448-453.

16. Kirkinskii V.A., Novikov Yu.A. Theoretical modeling of cold fusion.// Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2002,105 p.
17. Kirkinskii V.A., Novikov Yu.A. Modeling of dynamic screening effects in solid state//Europhysics Letters 2004. v.67. №3. pp.362-368.
18. Kirkinskii V.A., Drebuschak V.A., Khmelnikov A.I. Excess heat release during deuterium sorption-desorption by finely powdered palladium deuteride// Europhysics Letters. 2002. v.58. №3. pp.462-467.
19. Селинов И.П. Изотопы. т.1// -М.: Наука. 1970. 623 с.
20. Агапов А.С., Каленский В.А., Кайтуков Ч.Б., Малышев А.В., Рябова Р.В., Стеблевский А.В., Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В. Обнаружение «странного» излучения и изотопного искажения титана при испытаниях промышленного электротехнического оборудования. Прикладная физика, 2007. №1. с.37–46
21. Герштейн С.С., Петров Ю.В., Пономарев Л.И. Мюонный катализ и ядерный бридинг// УФН. **160**. вып. 8. (1990) с.3-46
22. Кравцов В.А. Массы атомов и энергии связи ядер. -М.: Атомиздат. 1974. 343 с.
23. Айзенберг И, Грайнер В. Микроскопическая теория ядра. -М.: Атомиздат. 1976. 487 с.
24. Беляев В.Б., Герштейн С.С., Захарьев Б.Н., Ломнев С.П., ЖЭТФ **37** (1959) с.1652
25. Cohen S., Judd D.L., Riddell R.J. Phys. Rev. **110** (1958) p.1471
26. Arnold A.R., Phillips J.A., Sawyer G.A., Stovall E.J. (Jr.) and Tuck J.L. Phys. Rev. **93**, 483 (1954)
27. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной, М.: Наука. 1975. 735 с.
28. Заев Н.Е. Уж синтез близится, Курчатова все нет. - Изобретатель и рационализатор. 1995. № 1, с.8.
29. Филимоненко И.С. Приоритетная справка № 717239/38 от 27.07.1962
30. Frolov A.V. On history of cold nuclear fusion in Russia of 1960-s. «New Energy Technologies», Russia, Issue № 3(3), Nov-Dec 2001
31. Потапов Ю.С., Фоминский Л.П. Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиций теории движения -Кишинёв - Черкассы: Изд. "ОКО-ПЛЮС", 2000.
32. Протокол координационного совещания по созданию опытно-промышленной установки холодного синтеза.// Международный интеллектуальный фонд «Перестройка Естествознания», служебный документ 15 августа 1991 года.
33. Филимоненко И.С. Демонстрационная термоэмиссионная установка для ядерного синтеза.// Материалы III научного симпозиума «Перестройка Естествознания»-92, Волгодонск, Россия, 17-19 апреля 1992 г.
34. Дерягин Б.В., Клюев В.А., Липсон А.Г., Топоров Ю.П. О возможности ядерных реакций при разрушении твердых тел// Коллоидный журнал. 1986. т.48, №1. с.12-14.
35. Липсон Г.А., Саков Д.М., Клюев В.А., Дерягин Б.В., Топоров Ю.П. Генерация нейтронов при механическом воздействии на титан в присутствии дейтерированных веществ:  $D_2O$ ,  $LiD$ , полипропилен ( $D_6$ ). Письма в ЖЭТФ, том 49, вып. 11. 1989. с.588-590
36. Wendt G.L., Irion C.E. Experimental attempts to decompose tungsten at high temperatures // Amer. Chem. Soc. 44. (1922).
37. Курчатова И.В. Атомная энергия. (1956) **3**. с.65.
38. Rutherford E. Disintegration of elements.//Nature **109** (1922) p.418
39. Fleishmann M., Pons S. and Hawkins M. Electrochemical Induced Nuclear Fusion of Deuterium// J. Electroanal. Chem., **261**. p.301-308 (1989) (Hawkins M. was added to the list of authors; err. **263**, p.187.)
40. Jones S.E., Palmer E.P., Czirr J.B. et al., Nature, 1989, **338**, p.737.
41. Савватимова И.Б., Карабут А.Б. Радиоактивность палладиевых катодов после облучения в тлеющем разряде//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №1. 1996. с.4-11
42. Arata Y., and Zhang Y.-C. Formation of condensed metallic deuterium lattice and nuclear fusion. Proceedings of the Japan Academy. Ser. B: Physical and Biological Sciences. Vol. 78 , No.3 (2002) pp.57-62.
43. Mori, H., Komatsu, M., Takeda, K. and Fujita, H. (1991) Phil. Mag. Lett. 63, 173-178.
44. Yasuda, H., Mori, H., Komatsu, M., Takeda, K., and Fujita, H. (1992) J. Electron Microscopy 41, 267-269.
45. Fujita, H., and Fujita, N. (2001) Materials Trans. **42**, 1474-1479.
46. Bahcall J.N. and Ulrich R.K., Rev. Mod. Phys. **60** (1988) p.297.
47. Brown R.E. and Jarne N., Phys. Rev. **C41** (1990) p.1391.
48. Vökl J. and Albfeld G., in Hydrogen in metals.//edited by Albfeld G. and Vökl J. Vol.1 (Springer - Verlag, Berlin - New York) 1978, p.321.
49. Storms E., J. Sci. Exp. **10** (1996) p.185.
50. Storms E., Cold fusion: An objective announcement <http://home.netcom.com/~storms2/review8.html/>

51. McKubre M., Tanzella F, Tripodr P., and Hagelstein P., in ICGF8, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Cold fusion, edited by Scaramuzzi F., SIF Conf. Proc. Vol. 70 (Editrice Compositori, Bologna) 2000, p. 3.
52. Arata Y. and Zhang Y.-C. Proceedings of the Japan Academy. Ser. B: Physical and Biological Sciences. Vol. 74 (1998) p.155.
53. Arata Y. and Zhang Y.-C. Proceedings of the Japan Academy. Ser. B: Physical and Biological Sciences. Vol. 75 (1999) p.281
54. Arata Y. and Zhang Y.-C. Jpn. J. Appl. Phys., **38** (1999) p.774.
55. DeNikko A., Frattolillo A., Rizzo A., Del Giudici E. and Preperata G. Experimental Evidence of <sup>4</sup>He production in a Cold Fusion Experiments (ENEA Preprint №RT2002/41/FUS) 2002, p.26.
56. Hagelstein P.L. Coherent and semi-coherent neutron transfer reactions. ICCF3 Conference Proc. Nagoya, Japan Oct. 1992.
57. Widom A., Larsen L. Ultra low momentum neutron catalyzed nuclear reactions on metallic hydride surfaces. Euro. Phys. J. **C46**, p.107 (2006)
58. Amsler C. et. al. (Particle Data Group). The Review of Particle Physics// Phys. Lett. **B667**, 1 (2008)
59. Данин Д.С. Резерфорд. Серия ЖЗЛ. М.: Издательство ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия», 1966, 620 с.
60. Moss W.C., Clarke D.B., White J.W., Young D.A. Sonoluminescence and the prospects for table - top micro - thermonuclear fusion.//Physics Letters A 211 (1996) p.69-74
61. Nigmatulin R.I., Akhatov I.Sh, Topolnikov A.S., Bolotnova R.Kh, Vakhitova N.K., Lahey (Jr.), Taleyarkhan R.P., The theory of supercompression of vapor bubbles and nano-scale thermonuclear fusion, Physics of Fluids, Vol. 17, 107106, 2005
62. Taleyarkhan R.P., Block R.C., Lahey (Jr.), Nigmatulin R.I. and Xu Y. Nuclear Emissions During Self-Nucleated Cavitation. Physical Review Letters, **96**, 034301, 2006
63. International Patent Application PCT/RU 93/00174, A1, МКИ G 21 В 1/00, G 21 G 4/02, publication 094/-3902. 1994.
64. Киркинский В.А. Способ получения свободных нейтронов. Патент Российской Федерации на изобретение № 2056656 // Бюллетень - Изобретения, товарные знаки.- 20 марта 1996. №8. часть II. С. 267-268.
65. Киркинский В.А., Хмельников А.И. Устройство для получения энергии // Патент Российской Федерации на изобретение № 2195717. Бюллетень - Изобретения, товарные знаки. - №56. декабрь 2002.
66. Sobiczewski A., Gareev F.A., Kalinkin B.N. Closed shells for  $Z > 82$  and  $N > 126$  in a diffuse potential well, JINR preprint P-2793, 1966, Phys. Lett. V.22, No 4(1966)500.
67. Oganessian Yu.Ts. et al., Preprint JINR E-7-99-53, Dubna, 1999; JAF, V63, 1769, 2000; Phys. Rev., **C62.0411604(R)**, 2000; Phys. Rev. Lett., **83**, 3154, 1999; Nature (London) **400**, 242, 1999; Eur. Phys. J. **A5, 63**, 1999; Oganessian Yu.Ts., JAF **63**, 1391, 2000.
68. Хандорин Г.П., Шадрин В.Н., Способ получения атомной энергии. Заявка на изобретение №2006140078 от 13.11.2006. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Бюллетень №14 от 20.05.2008.
69. Ратис Ю.Л. Метастабильное ядерно-активное вещество динейтроний. Заявка на изобретение №2008147689 от 04.12.2008. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Приоритетная справка №062435 от 04.12.2008.
70. Ратис Г.Ю., Зубрилин А.М. Способ получения метастабильного ядерно - активного вещества динейтрония. Заявка на изобретение №2008147688 от 04.12.2008. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Приоритетная справка №062434 от 04.12.2008.
71. Ратис Г.Ю., Зубрилин А.М. Топливо для энергетических реакторов управляемого холодного ядерного синтеза. Заявка на изобретение №2008147687 от 04.12.2008. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Приоритетная справка №062433 от 04.12.2008.

**Российские апостолы холодного синтеза**

Ниже приведены краткие биографические данные российских ученых, внесших существенный вклад в исследование проблемы холодного синтеза, и государственных деятелей, способствовавших использованию результатов исследований на благо России.

Родоначальником научного направления, которое в настоящее время называется холодным ядерным синтезом, и объявлено лженаучным Комиссией по лженауке при Президиуме РАН, является Андрей Дмитриевич Сахаров.



Рис. 1. Андрей Дмитриевич Сахаров (21.05.1921-14.12.1989). Нет надобности перечислять заслуги и регалии этого человека. Если бы не процесс «сахаризации», то на географической карте мира такой страны, как Россия, могло бы уже и не значиться. Все началось с отчета ФИАН «Пассивные мезоны» (1948). Многие его работы остаются до сих пор непонятыми.



Рис. 2. Яков Борисович Зельдович (8.03.1914- 2.12.1987). Трижды Герой Социалистического Труда. Академик. Лауреат Ленинской и четырех Государственных премий. Внес большой вклад в теорию ядерных реакций в холодном водороде. Один из немногих академиков, поддержавших А.Д. Сахарова во время нижегородской ссылки.



Рис. 3. Семён Соломонович Герштейн (13.07.1929). Российский физик. Академик. Лауреат Государственной премии СССР. Кавалер ордена «За заслуги перед Отечеством» IV степени. Соратник Я.Б. Зельдовича. Соавтор обзора «Ядерные реакции в холодном водороде». Внес большой вклад в теорию мюонного бридинга.

Дейтерий, получаемый из тяжёлой воды - экологически чистое, дешевое и доступное в неограниченных количествах топливо, поскольку выделяется из обычной воды. В одной тонне воды его столько, что им можно заменить 250 тонн нефти. Ученые из Российского федерального ядерного центра - Всероссийского научно-исследовательского института технической физики (РФЯЦ-ВНИИТФ) города Челябинск-70 еще четверть века тому назад предлагали взрывать небольшие пьезоядерные заряды с целью получения энергии.

Российские оружейники однажды уже спасли человечество от третьей мировой войны, создав стратегическое ядерное и термоядерное оружие. Они в состоянии спасти мир от энергетического голода и экологической катастрофы, а страну - от нищеты. Если бы им еще и денег на подвиг дали. Овес нонче дорог...

В настоящее время учёные РФЯЦ-ВНИИТФ готовы спроектировать и построить энергоустановку взрывной дейтериевой энергетики (ВДЭ) – «котел взрывного сгорания» (проект «КВС10»), который представляет собой железобетонный цилиндр диаметром 150, высотой 200 метров и толщиной стенки 35 метров. Внутри цилиндр облицован сталью толщиной около 20 сантиметров. Сверху реактор засыпан грунтом толщиной более сотни метров. Взрывая внутри защитного слоя жидкого натрия в этом сооружении дейтериевые заряды мощностью около 10 килотонн тротилового эквивалента, можно каждые полчаса получать 37 гигаватт-часов тепловой энергии, что равноценно 25 млн. тонн нефтяного эквивалента в год. Разработке реактора КВС10 предшествовало создание специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ под руководством академиков Е.И. Забабахина, Е.Н. Аврорина и Б.В. Литвинова так называемых «чистых» дейтериевых зарядов.

Если бы проект был своевременно реализован, то Россия в одиночку обеспечила бы экологически чистой электроэнергией всю планету. Уже сегодня, и с избытком...



Рис. 4. Евгений Иванович Забабахин (16.01.1917-27.12.1984). Его имя носит РФЯЦ-ВНИИТФ в г. Снежинске. Академик. Герой Социалистического Труда. Лауреат Ленинской премии. Предтеча проекта КВС10.



Рис. 5. Евгений Николаевич Аврорин (11.06.1932). Почетный научный руководитель РФЯЦ - ВНИИТФ. Академик. Лауреат Ленинской премии. Герой Социалистического Труда. Соавтор проекта КВС10.



Рис. 6. Борис Васильевич Литвинов (12.11.1929-01.11.2008). Заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИТФ. Академик. Лауреат Ленинской премии. Герой Социалистического Труда. Соавтор проекта КВС10.

Пьезоядерные реакции, вызываемые обжимом дейтерированных веществ неядерными эксплозивами, не являются единственным технически реализуемым вариантом холодного ядерного синтеза. Существуют еще «лазерный термояд» и «теплый синтез».



Рис. 7. Николай Геннадьевич Басов (14.12.1922-1.07.2001). Академик. Лауреат Нобелевской премии. Дважды Герой Социалистического Труда. Создатель лазера. Основоположник лазерного «термояда», который, на самом деле, относится к пьезоядерным реакциям. В настоящее время в России, Японии, США и других странах ведутся исследования этого вида ядерного синтеза.



Рис. 8. Иван Степанович Филимонок (11.11.1924). Полный перечень его должностей и наград никогда и нигде не публиковался. Создатель термоэмиссионных энергетических установок «теплого ядерного синтеза». Подвергался принудительному лечению в психиатрических клиниках в СССР по политическим мотивам. Именно его результаты С. Понс украл, и опубликовал в соавторстве с М. Флейшманом.



Рис. 9. Игорь Васильевич Курчатов (12.01.1903-07.02.1960). Великий физик. Создатель советской атомной бомбы. Академик. Главный научный руководитель атомной проблемы в СССР. Один из основоположников использования ядерной энергии в мирных целях. Поддерживал работы по холодному синтезу.

Огромную роль в реализации оборонных и космических программ, в которых использовались «изделия», работающие на энергии холодного ядерного синтеза, сыграли С.П. Королев, М.В. Келдыш и Г.К. Жуков.



Рис. 10. С.П. Королев



Рис. 11. М.В. Келдыш



Рис. 12. Г.К. Жуков