

Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез

УДК 621

Кластерный термоядерный синтез (критический анализ публикаций)

В. Ю. Великодный

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

В. А. Битюрин

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия

В ряде экспериментальных работ, в которых исследовалось взаимодействие заряженных кластеров из тяжелой воды, разогнанных до энергии ~300 кэВ, со стенкой из дейтерированных материалов, был обнаружен “аномально” высокий выход продуктов реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при увеличении размеров кластеров. Удовлетворительного, непротиворечивого теоретического объяснения данному феномену достаточно долгое время не было. Авторы работы показали, что “аномально” высокий выход продуктов реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при увеличении размера кластеров обусловлен неравновесными эффектами, возникающими из-за коллективного взаимодействия ${}^2\text{D}$ с тяжелыми атомами — O, Ti, Zr по механизму Ферми. На основе анализа экспериментальных данных и теоретических результатов предложены способы реализации процесса синтеза легких ядер со скоростью, близкой к максимальной при относительно низких средних энергиях, приходящихся на один нуклон в кластере ~0,005—0,8 кэВ. Предложенные способы принципиально возможно реализовать без использования новых прорывных технологий (на стандартном, выпускаемом промышленностью оборудовании). Характерная особенность предлагаемых устройств — малые габаритные размеры и относительно малая величина первоначально вкладываемой энергии.

После выхода в 1989 г. сенсационной работы [1] и нескольких последующих работ этих авторов [2, 3], в которых при исследовании взаимодействия заряженных кластеров из тяжелой воды $(\text{D}_2\text{O})_n^+$ (разогнанных в электрическом поле до энергии 300 кэВ) со стенкой из дейтерированных материалов (TiD, $(\text{C}_2\text{D}_4)_n$, $\text{ZrD}_{1,65}$), был обнаружен “аномально” высокий выход продуктов реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при увеличении размера кластеров, появился ряд теоретических работ [4—8] с попыткой объяснения этого явления и целый ряд [9—11] экспериментальных работ в целях повторения обнаруженного в [1] эффекта. В работе [4] показана принципиальная возможность существенного увеличения выхода реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при реализации определенных конфигураций в системе O—D—D—Ti. Однако при этом высказывается сомнение о возможности практической реализации данного эффекта из-за чрезвычайно малой вероятности появления этих конфигураций. В [5, 6] после неудачной попыт-

ки объяснить данный эффект на основе анализа различных теоретических моделей, сделан вывод о наличии “artifacts”. Другими словами, есть сомнение в чистоте экспериментов [1—3], обусловленное предположением о наличии “мусора” из легких ионов D^+ , OD^+ в пучке кластеров $(\text{D}_2\text{O})_n^+$. Однако присутствием примеси “легких” ионов в потоке кластеров нельзя объяснить наличие максимума в выходе продуктов реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при числе молекул в кластере $n = 120—200$. На это также указывают авторы работ [7, 8]. Объяснение наличия максимума в выходе продуктов реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ является камнем преткновения для многих предыдущих теоретических моделей. В [7] проводится критический анализ имеющихся на то время экспериментальных и теоретических работ. Как и в [4], в работе [7] делается правильный вывод о возможности увеличения скорости протекания реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при столкновении “тяжелых” кластеров со стенкой за счет многократного отражения ${}^2\text{D}$

от тяжелых атомов O, Ti, Zr (по сути, указывается на возможность реализации механизма Ферми). Также анализируется возможность резонансного протекания реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$. В работе [8] делается попытка объяснить обнаруженные в работах [1–3] эффекты наличием ударных волн (УВ) в наноструктурах. Тем не менее, ряд положений работы [8] вызывают также сомнения. Это в первую очередь связано с тем, что характерным масштабом фронта ударной волны является длина свободного пробега, а размеры наноструктуры $(\text{D}_2\text{O})_{20-1000}^+$ — порядка этой величины. Во-вторых, в [8] предполагается, что фронт ударной волны движется по горячему сжатому плазменному образованию. Вместе с тем известно, что при высокоскоростном ударе двух тел ударная волна распространяется по твердому или жидкому телу, и только после прохождения УВ или волны разгрузки тело испаряется и превращается в плазму. Авторы [8] считают, что первичный нагрев обусловлен наличием излучения и быстрых “горячих” электронов, но данный вопрос специально в работе не оговаривается. Тем не менее, подход авторов работы [8] оригинален и заслуживает внимания, так как в принципе возможна реализация термоядерных температур при прохождении УВ при скоростях частиц, реализуемых в [1–3], за счет эффектов поступательной неравновесности. В работах [9, 10] экспериментально исследуется столкновение кластеров $\text{D}_n^+, (\text{CD}_4)_n^+$ с различными дейтерированными мишенями. Эффектов, аналогичных обнаруженным в [1–3] и в [9, 10], не получено. По-видимому, вследствие стечения случайных обстоятельств в [9, 10] выбраны для исследования те объекты, на которых эффекты, аналогичные [1–3], не могут быть обнаружены. В работе [11] результаты [1–3] полностью подтверждаются. Для снятия вопроса о влиянии “мусора” из легких ионов на результаты измерений выхода продуктов реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$, протекающей при столкновении кластера со стенкой, была применена магнитная система, устраняющая “мусор” из потока кластеров. Уже после появления работы [11] авторы [1–3] опубликовали краткую заметку [12], в которой дезавуируют свои предыдущие результаты. В [12] указывается, что эффект в работе [1–3] из-за наличия фона пресловутого “мусора” из легких ионов может быть на два порядка меньше. Более подробно результаты отрицательного эксперимента, о которых объявлено в [12], предполагалось изложить в целой серии последующих работ, которых мы не обнаружили. В комментариях к работе [12], изложенных в [13], указывается, что на основе анализа спектра продуктов реакции

${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ величина энергии ${}^2\text{D}^+$ должна быть не менее $E > 50$ кэВ. И на этом основании высказывается сомнение в достоверности результатов [1–3, 11]. Однако энергия сталкивающихся дейтронов в кластере в результате многократного ускорения за счет механизма Ферми лежит в этих пределах. В работах [14–16] разработана теоретическая модель, объясняющая количественно и качественно все эффекты, обнаруженные в [1–3, 11], в том числе и наличие отрицательного результата работ [9, 10]. Дело в том, что эффекты, обнаруженные в [1–3, 11], реализуются только при определенном молекулярном или атомном составе кластера и стенки. Предложены методы проведения малоэнергос затратного эксперимента, исключающего влияние легкой примеси в потоке кластеров на выход реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$, а также методы и способы практической реализации.

О возможности проведения термоядерного процесса в существенно неравновесных условиях

Эффекты, полученные экспериментально в [1–3, 11] и описанные в [14–16], служат отправной точкой для обоснования возможности проведения реакций термоядерного синтеза в существенно неравновесных условиях, когда основная масса вещества остается относительно “холодной”, а “горячими” являются лишь реагенты. Сочетание эффектов, обусловленных поступательной неравновесностью в сопле Лавала, во фронте ударной волны и неравновесного перераспределения энергии между тяжелыми и легкими компонентами при столкновении кластеров, состоящих из тяжелых элементов и атомов дейтерия или трития, дают возможность предложить два способа реализации кластерного термоядерного синтеза. Первый способ описан в [14] и заключается в том, что легкий газ (смесь дейтерия и трития) с примесью тяжелых металлов или молекул истекает из сопла Лавала, при этом образуются кластеры, а затем эта смесь тормозится в ударной волне. Второй способ состоит в том [15, 16], что легкий газ (дейтерий) с примесью паров тяжелых металлов истекает из сопла Лавала, образуются кластеры, которые и осуществляют бомбардировку стенки из дейтерированных материалов. Остановимся на последнем способе, тем более что имеются экспериментальные работы, в которых исследовалось взаимодействие заряженных кластеров тяжелой воды, разгоняемых в электрическом поле, со стенкой из дейтерированных материалов.

В конце 80-х — начале 90-х годов XX века в ряде экспериментальных работ [1–3, 11], в кото-

рых исследовалось взаимодействие кластеров из тяжелой воды, разогнанных до энергии 300 кэВ, со стенкой из дейтерированных материалов (TiD , $(CD_2)_n$) был обнаружен "аномально" высокий выход продуктов реакции ${}^2D+{}^2D \rightarrow {}^1H+{}^3T$ при увеличении размеров кластеров. Интересным является тот факт, что выход продуктов- 1H в реакции ${}^2D+{}^2D$ при изменении числа молекул в кластере в пределах $N = 20-1000$ менялся в разы (рис. 1), хотя энергия, приходящаяся на один нуклон, менялась в сотни раз при фиксированной энергии разгона кластеров $E = 300$ кэВ. Расчеты на основе различных моделей, использующих "равновесную теорию" [5, 6], показали, что выход продуктов 1H при $N = 20-1000$ может отличаться в 10^5-10^6 раз и более от экспериментальных данных (рис. 2). Обозначения (Y_{TT} , Y_{KO} , Y_{TS} , Y_{TN}) на рис. 2 для расчетов на основе различных моделей "равновесной теории" такие же, как и в работе [6]. Все расчеты на основе "равновесной теории" дают существенное отличие от результатов эксперимента [1-3, 11] (крестики х). В данной работе показано, что "аномально" высокий выход продуктов реакции ${}^2D+{}^2D \rightarrow {}^1H+{}^3T$ при увеличении размера кластеров обусловлен неравновесными эффектами, возникающими из-за коллективного взаимодействия 2D с тяжелыми атомами - O, Ti по механизму Ферми. При этом кластер рассматривался не как система отдельных ядер тяжелых атомов, при столкновении с которыми в результате многократного отражения часть ядер дейтерия приобретает энергию, близкую к ее величине для тяжелых атомов O [6], а как квазичастица с эффективной массой $m_{ef} \sim m_{D_2O} N^{2/3}$. Воз-

можность реализации такой модели обусловлена эффектами стесненности и экранирования, возникающими при сжатии вещества в кластерах при их столкновении со стенкой или друг с другом. Это позволило устранить расхождение теории и эксперимента более чем на 25 порядков при $N \rightarrow 1000$ [6]. Эффективная температура (в кэВ), приобретаемая относительно малой частью атомов 2D в отдельном кластере, за счет механизма коллективного взаимодействия определяется по формуле

$$T_{ef} = \frac{2}{3} \frac{E}{N} \left(0,316 + 0,5 \exp(-0,5(\frac{N_0}{N})^{2/3}) N^{2/3} \right), \quad (1)$$

где E — энергия кластера, кэВ;
 N — число молекул в кластере;
 $N_0 \sim 120$ — число молекул в кластере, для которого выход продукта реакции ${}^2D+{}^2D$ максимален.

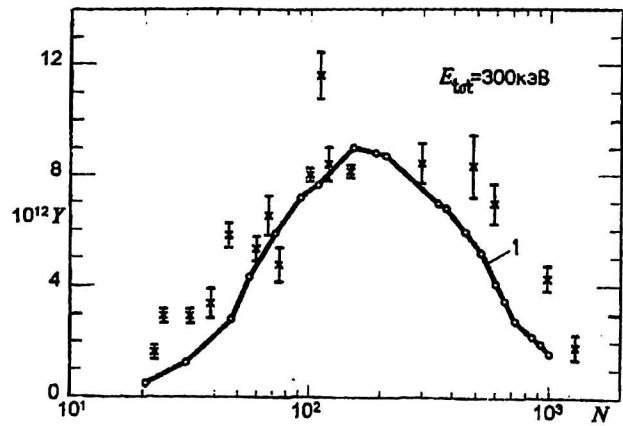


Рис. 1. Выход Y продукта 1H реакции ${}^2D+{}^2D \rightarrow {}^1H+{}^3T$ в зависимости от числа N молекул D_2O в кластере. Сравнение теории (кривая 1) и эксперимента [1-3, 11]

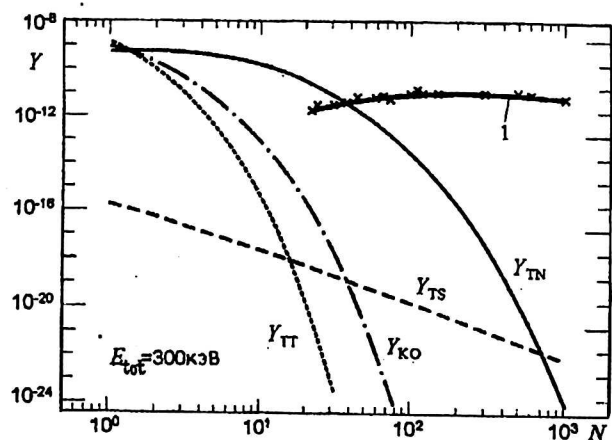


Рис. 2. Изменение выхода Y продукта 1H реакции ${}^2D+{}^2D$ в зависимости от числа N молекул D_2O в кластере. Сравнение расчетов [5, 6] на основе различных моделей, использующих равновесную теорию, с экспериментальными данными [1-3, 11] (точки) и расчетов на основе [3] (кривая 1)

Эффективная температура определяется из следующего соотношения [14]

$$\langle \nu \sigma(T_{ef}) \rangle_{eq} = \langle \nu \sigma \rangle_{neq}, \quad (2)$$

где $\langle \rangle_{eq}$ — выражение для константы скорости термоядерного процесса в "равновесных условиях";

$\langle \rangle_{neq}$ — выражение для константы скорости, обусловленное неравновесными эффектами.

Расчет выхода Y продукта реакции ${}^2D+{}^2D \rightarrow {}^1H+{}^3T$ при реагировании атомов 2D , ускоренных в кластерах при их столкновении со стенкой из TiD , с атомами 2D , находящимися в стенке, проводился по формуле [6]

$$Y = 7,5 \cdot 10^{-10} E^{5/6} N^{1/6} \exp(-44,24 / \sqrt{1,5 T_{ef}}),$$

где T_{ef} берется из (2) в кэВ.

Результаты расчета выхода Y продукта ${}^1\text{H}$ реакции ${}^2\text{D}+{}^2\text{D}$ при взаимодействии со стенкой из Ti , насыщенного ${}^2\text{D}$, на основе (1) и сравнение с экспериментом [1–3, 11] представлены на рис. 1 (кривая 1).

Результаты сравнения расчета выхода Y продукта ${}^2\text{D}$ на основе (1) с различными “равновесными моделями” [6] и экспериментом [1–3, 11] представлены на рис. 2 (кривая 1), эксперимент показан знаком x .

Есть основания полагать [14], что процессы кластерного синтеза, подобные вышеуказанным, могут реализовываться во время схлопывания пузырьков при наличии процессов кавитации в тяжелой воде или других дейтерийсодержащих веществах, где обнаружен выход нейтронов выше фонового экспериментально [17, 18]. В пузырьках всегда есть очаги конденсации, и при наличии сходящейся ударной волны или кумулятивных струй жидкости, порождающих ударные волны, кластеры, имеющие дисперсию по размерам и массам, могут сталкиваться в зоне поступательной неравновесности во фронте ударной волны и генерировать быстрые дейтроны, которые затем реагируют с дейтронами в окружающей жидкой среде [18] или твердой фазе [17]. Мало вероятно, что ударная волна будет абсолютно сферически симметричной при изменении размера пузырьков на пять порядков [18]. Наличие начальных флуктуаций фронта, а также неустойчивости [19] при изменении размера пузырька от 1 мм до 10 нм [18] приведут в конечном итоге к разрушению симметрии и срыву процесса. Наличие кластерного механизма реализации термоядерного процесса не требует таких высоких скоростей ударной волны, какие необходимы при реализации его по равновесному механизму. Поэтому термоядерные процессы при данном механизме реализации могут произойти значительно раньше, чем успеют проявиться эффекты и нарушения симметрии при схлопывании пузырьков в объеме.

Рассмотрение возможных способов практической реализации

На основе анализа экспериментальных данных и теоретических результатов предложен способ реализации процесса синтеза легких ядер со скоростью, близкой к максимальной при относительно низких средних энергиях, приходящихся на один нуклон в кластере $\sim 2,5$ эВ. Суть способа состоит в разгоне в сопле Лавала смеси ${}^2\text{D}_2$, ${}^2\text{D}$ или 50 % ${}^2\text{D}_2$, ${}^2\text{D}$, 50 % ${}^3\text{T}_2$, ${}^3\text{T}$ и паров тяжелых металлов Th^{232} , U^{238} , Pd^{106} ; образования дейтерированных кластеров из этих металлов при охлаждении в расширяющемся потоке и

бомбардировке ими мишени из тяжелых металлов Th^{232} , U^{238} , Pd^{106} , насыщенной ${}^2\text{D}$ или ${}^3\text{T}$. Например, если начальная температура в форкамере сопла $\sim 50\,000$ К (получаемая в результате взрыва проволоочки из тяжелого металла), то конечная энергия у части атомов ${}^2\text{D} \sim 50$ кэВ — за счет эффектов “усиления” при взаимодействии дейтерированного кластера из тяжелых металлов со стенкой из тяжелых металлов, насыщенных тритием или дейтерием. Соотношение между компонентами смеси в форкамере сопла при этом $n_h \ll n_l$, $\rho_h \ll \rho_l$, где n_h , ρ_h — концентрация и плотность паров тяжелых металлов, соответственно; n_l , ρ_l — концентрация и плотность легкого газа носителя, соответственно. Суть эффектов “усиления” состоит в том, что при одинаковой температуре торможения легкого газа и паров металла T^* при разгоне смеси в сопле Лавала тяжелая примесь приобретает скорость, близкую к скорости легкого компонента. При этом энергия паров тяжелых металлов увеличивается в $\sim m_h/m_l$ раз. При образовании кластера в струе охлаждающегося газа его энергия равна

$$E \approx E_l \frac{m_h}{m_l} N_h, \quad (3)$$

где E_l — энергия легкого компонента-носителя;

E — энергия кластера;

N_h — число тяжелых атомов в кластере.

В результате взаимодействия кластера со стенкой его энергия частично передается находящимся в нем атомам ${}^2\text{D}$. Величина передаваемой энергии определяется из (1), где N заменяется на N_h .

Принципиальные схемы возможной реализации вышеуказанных процессов представлены на рис. 3 и 4. В случае, представленном на рис. 3, процесс протекает следующим образом.

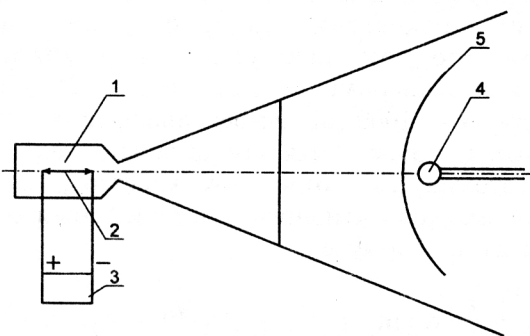


Рис. 3. Принципиальная схема ядерно-термоядерной энергетической установки с реализацией ядерных и термоядерных реакций в зоне поступательной неравновесности во фронте ударной волны:

1 — сопло Лавала; 2 — взрывающаяся проволоочка из тяжелых металлов, подсоединенная к источнику питания; 3 — источник питания; 4 — обтекаемое тело; 5 — ударная волна

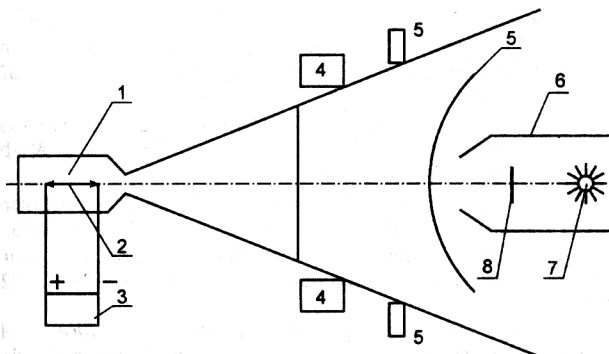


Рис. 4. Принципиальная схема ядерно-термоядерной энергетической установки на основе процесса фокусировки пучка кластеров и нейтронов:

1 — сопло Лавалья; 2 — взрывающаяся проволочка из тяжелых металлов, подсоединенная к источнику питания; 3 — источник питания; 4 — фокусирующая система, использующая магнитное или электрическое поле; 5 — источник электронов; 6 — скример; 7 — мишень; 8 — таблетка из U^{238} , U^{235} , D, T

Часть кластеров, имеющих дисперсию по размерам и массам, сталкивается между собой и испаряется, при этом в результате неравновесного перераспределения энергии по механизму Ферми образуются быстрые дейтроны, которые взаимодействуют с легким газом — носителем в основном потоке (2D , 2D_2 — 50 %; 3T , 3T_2 — 50 %).

Часть кластеров расходуется бесполезно в результате испарения при взаимодействии с горячим газом — носителем за зоной поступательной неравновесности во фронте ударной волны.

Коэффициент полезного выхода процесса определяется параметрами исходной смеси и потока. Подробный теоретический анализ данной схемы проведен в работе [14]. В случае, представленном на рис. 4, поток ускоряется в сопле Лавалья 1, где в результате его охлаждения образуются дейтерированные кластеры из тяжелых металлов. Для фокусировки пучка кластеров в исходную смесь добавляют легкоионизируемую присадку, например Cs. Сфокусированный пучок деионизируется потоком электронов, а затем он взаимодействует со стенкой 7 из тяжелых металлов, насыщенной дейтерием и тритием. В результате взаимодействия кластеров со стенкой образуется поток быстрых ядер дейтерия, которые в свою очередь взаимодействуют с тритием, находящимся в стенке. В итоге такого взаимодействия образуется коллимированный (90 % нейтронов летит вперед) моноэнергетический $E \sim 14$ МэВ пучок нейтронов [20], сходящийся в определенной точке в зависимости от того, как был сфокусирован исходный поток

кластеров. Для получения большого потока нейтронов в определенной точке может быть использована система, состоящая из блока сопел, запускаемых одновременно. Полученный таким образом сфокусированный пучок быстрых нейтронов можно использовать для проведения ядерной реакции на природном уране U^{238} — 99,3 %, U^{235} — 0,7 % или на обогащенном U^{235} в целях использования ее как инициирующего очага, вызывающего детонацию в таблетке, содержащей D+T [21].

Отличительная особенность данного устройства в том, что для проведения ядерных реакций необходимо весьма ограниченное количество ядерного горючего, т. е. реализуется подкритический ядерный или термоядерно-ядерный реактор. Одновременно в рабочей зоне находится малое количество ядерного горючего. Например, для компенсации начальных затрат на разгон пучка кластеров необходимо, чтобы на каждый исходный быстрый кластерный нейтрон было $\sim 10^3$ – 10^4 делений при использовании только делящихся материалов. Простота реализации и малые габаритные размеры устройств, которые могут быть сконструированы на основе вышеуказанных процессов, делают привлекательным их использование в качестве источника энергии на космических аппаратах при полетах к дальним планетам солнечной системы или на космических станциях. В качестве двигательной установки может быть использована электроракетная двигательная установка (ЭРДУ) с ядерным или термоядерно-ядерным генератором электрической энергии, основанном на принципах, изложенных на схеме (см. рис. 4). Неоспоримые преимущества ЭРДУ при полетах к дальним планетам солнечной системы по сравнению с ЖРД изложены в монографии [22].

Выводы

1. Предложены способы, состоящие в передаче энергии от легких частиц к тяжелым при истечении из сопла Лавалья, концентрации этой энергии при образовании кластеров в охлаждающемся потоке, реализации накопленной энергии при столкновении со стенкой или при торможении в зоне поступательной неравновесности во фронте ударной волны.
2. Реализация энергии, накопленной в кластерах, осуществляется за счет неравновесного перераспределения энергии от тяжелых элемен-

тов к легким по механизму Ферми в результате эффектов коллективного взаимодействия:

при столкновении кластеров, имеющих дисперсию по массам и диаметрам во фронте ударной волны;

при столкновении со стенкой из дейтерированных материалов.

3. Способ, в котором кластеры взаимодействуют со стенкой, открывает принципиальную возможность использовать для проведения термоядерного синтеза реакции ${}^1\text{H}+{}^9\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He}+2\text{D}$, ${}^1\text{H}+{}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li}+{}^4\text{He}$, ${}^1\text{H}+{}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He}$, в этом случае кластер насыщается ${}^1\text{H}$, а стенка содержит ${}^9\text{Be}$ или ${}^{11}\text{B}$.

4. Установки для проведения термоядерных реакций, принцип работы которых основан на вышеуказанных способах, могут быть созданы на базе уже существующих технологий. Характерная их особенность — малогабаритность, в частности, они могут быть использованы в качестве источника нейтронов с потоком $f \sim 6 \cdot 10^{13} - 10^{16}$ (1/(см²·с)) и более как в импульсном, так и непрерывном режиме.

5. Предложенные схемы могут служить основой для разработки ядерных или термоядерно-ядерных установок в целях получения электрической энергии на борту космического аппарата и обеспечения работы ЭРДУ при полетах к дальним планетам солнечной системы и на стационарных объектах на этих планетах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 00-02-16614.

Литература

1. *Beuhler R. J., Friedlander G., Friedmann L.* Cluster-Impact Fusion// *Phys. Rev. Lett.* 1989. V. 63. № 12. P. 1292.
2. *Beuhler R. J., Chu Y. Y., Friedlander G., Friedman L., Kunnmann W.* Deuteron-Deuteron Fusion by Impact of Heavy-Water Clusters on Deuterated Surfaces// *J. Phys. Chem.* 1990. V. 94. P. 7665—7671.

3. *Beuhler R. J., Chu Y. Y., Friedlander G., Friedman L., Alessi J. G., LoDesto V., Thomas J. P.* Cluster-Impact Fusion: Time-of-Flight Experiments// *Phys. Rev. Letters.* 1991. V. 67. № 4. P. 473—476.
4. *Ван Ц. С., Леонас В. Б., Пярнпуу А. А.* Кластерный синтез: возможный механизм активации// *Письма в ЖТФ.* 1991. Т. 17. Вып. 16. С. 56—60.
5. *Echenique P. M., Manson J. R., Ritchie R. H.* Cluster-Impact Fusion// *Phys. Rev. Letters.* 1990. V. 64. № 12. P. 1413.
6. *Carraro C., Chen B. Q., Schraman S., Koonin S. E.* Estimates of cluster-impact fusion yields// *Phys. Rev. A.* 1990. V. 42. № 3. P. 1379.
7. *Kim Y. E., Rabinowitz M., Chulick G. S., Rice R. A.* Theories of cluster-impact fusion with atomic and molecular cluster beams// *Modern Physics Letters B.* 1991. V. 5. № 6. P. 427—438.
8. *Kim Y. E., Rabinowitz M., Bae Y. K., Chulick G. S., Rice R. A.* Cluster-impact nuclear fusion: Shock-wave statistical analysis// *Ibid.* № 14. P. 941—959.
9. *Fallaveir M., Kemmler J., Kirsch R., Poizat J. C., Remillieux J., Thomas J. P.* Search for Nuclear Fusion in Deuterated Targets under Cluster-Beam Impact // *Phys. Rev. Lett.* 1990. V. 65. № 5. P. 621.
10. *Fallavier M., Kirsch R., Roczat J.-C., Remillieux J., Rothard H., Thomas J.-P.* No-Evidence for Enhanced (d,d) Fusion under (CD₄)_n⁺ Cluster Impact// *Phys. Rev. Letters.* 1993. V. 70. № 7. P. 1022—1025.
11. *Bae Y. K., Lorents D. C., Young S. E.* Experimental confirmation of cluster-impact fusion// *Phys. Rev. A.* 1991. V. 44. № 7. P. R4091—R4094.
12. *Beuhler R. J., Friedlander G., Friedman L.* Cluster-Impact Fusion// *Phys. Rev. Letters.* 1992. V. 68. № 13. P. 2108.
13. *Lo D. H., Petrasso R. D., Wenzel K. W.* Comment on "Cluster-Impact Fusion"// *Ibid.* P. 2107.
14. *Великодный В. Ю., Битюрин В. А.* О возможности термоядерного синтеза во фронте ударной волны// *Прикладная физика.* 2001. № 3. С. 12.
15. *Великодный В. Ю., Битюрин В. А.* Кластерный синтез легких ядер D+D// *Там же.* 2002. № 5. С. 99—104.
16. *Великодный В. Ю., Битюрин В. А.* Кластерный термоядерный синтез легких ядер// *ТВТ.* 2003. № 3 (в печати).
17. *Липсон А. Г., Дерягин Б. В., Клоев В. А., Топоров Ю. П., Сиротюк М. Г., Хаверюшкин О. Б., Саков Д. М.* Иницирование ядерных реакций синтеза при кавитационном воздействии на дейтерий-содержащие среды // *ЖТФ.* 1992. № 2. С. 121—130.
18. *Taleyghan R. P., West C. D., Cho J. S., Lahey R. T. Jr., Nigmatulin R. I., Block R. C.* Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation// *Science.* 2002. V. 295. P. 1868—1873.
19. *Соколов И. В.* Гидродинамические кумулятивные процессы в физике плазмы// *УФН.* 1990. Т. 160. № 11. С. 144—165.
20. *Ракобольская И. В.* Ядерная физика. — М.: Изд-во Московского университета. 1971. — 295 с.
21. *Феоктистов Л. П.* Термоядерная детонация// *УФН.* 1998. Т. 168. № 11. С. 1247—1255.
22. *Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П.* Плазменные ускорители. — М.: Машиностроение, 1983. — 226 с.

Cluster thermonuclear fusion (critical publications analysis)

V. Yu. Velikodny

Applied Mechanics Institute RAS, Moscow, Russia

V. A. Bitiyin

High temperatures institute RAS, Moscow, Russia

In some experiments on the research of interaction of charged clusters of heavy water, accelerated up to the energy of 300 keV with a wall made of deuterated materials, it was found an abnormally high yield of $^2\text{D} + ^2\text{D}$ reaction products as the size of clusters was increased. For a long time there haven't been a satisfactory and not contradicting explanation for this phenomenon. Recently the authors of this work showed that abnormally high yield of $^2\text{D} + ^2\text{D}$ reaction products is caused by non-equilibrium effects, appearing in the collective interaction of ^2D with heavy atoms — O, Ti, Zr according to Fermi mechanism. Based on the analysis of experimental data and theoretical results, new methods of light nuclei synthesis processes realization at velocity close to maximal with relatively low average energies per one nucleon in cluster $\sim 0.005\text{--}0.8$ keV have been proposed. These methods can be realized without application of new technologies (on standard, industrial equipment). Characteristic features of the proposed devices are their small dimensions and relatively low initial energy.