

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И РЕАКЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

*Хартанович А.С., студент гр.328506*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Кургузова О.Э.*

**Аннотация.** В данной статье представлен обзор перспектив управляемого термоядерного синтеза, а также исследован метод его реализации, основанный на применении нестандартных видов топлива, рассмотрены примеры нестандартных видов топлива, которые могут быть использованы для повышения эффективности работы реакторов.

**Ключевые слова.** Термоядерный синтез, безнейтронный распад, сечение реакции, бороводороды, диборан.

Управляемый термоядерный синтез – перспективный источник энергии, существенно превышающий возможности ядерных реакций деления. Перспективы УТС связаны с двумя обстоятельствами: первое – все звезды, и наше Солнце в том числе, существует за счет протекающих в них стационарных термоядерных реакций, второе – неконтролируемый термоядерный процесс удалось достаточно просто реализовать в импульсном режиме при взрыве водородной бомбы.

Для достижения эффективного осуществления термоядерной реакции под воздействием потока ускоренных частиц, существуют несколько ключевых требований. Во-первых, необходимо обеспечить высокую энергию бомбардирующих частиц, чтобы преодолеть кулоновский барьер и максимизировать вероятность их реакции с другими частицами. Во-вторых, требуется высокая плотность потока ускоренных частиц, чтобы обеспечить большую долю частиц, которые прореагируют между собой. Исходя из заданных требований, можно использовать реакции с образованием нейтронов. Такие реакции гораздо менее экстремальны, чем реакции безнейтронного слияния. Образующиеся нейтроны также способны осуществлять еще ряд реакций, давая дополнительный вклад в суммарную энергетику процесса.

Важнейшими параметрами термоядерной реакции являются энергия и сечение. Рассмотрим эти параметры на одной из нейтронных реакций, часто рассматриваемой в термоядерной энергетике, а именно на реакции дейтерия-третия:



Для расчета количества энергии, выделяющейся в данной реакции, нужно найти дефект масс по формуле:

$$\Delta m = (m_D + m_T) - (M_{\text{Я}} + M_n), \quad (2)$$

где  $m_D$  – атомная масса дейтерия,  $m_T$  – атомная масса трития,  $M_{\text{Я}}$  – масса ядра,  $M_n$  – масса нейтрона, а затем вычислить энергию по формуле:

$$E = \Delta mc^2, \quad (3)$$

где  $c$  – скорость света. Сечение реакции является величиной, которая характеризует вероятность взаимодействия частиц или молекул в реакции при столкновении. Вероятность взаимодействия определяют через эффективную площадь ядра ( $\sigma$ ), находящегося на пути пучка. Если обозначить число частиц, упавших на мишень, за  $N_0$ , а число ядер, находящихся на этой площади, за  $N$ , то число взаимодействий можно определить соотношением:

$$N = N_0 \sigma_n. \quad (4)$$

Количество частиц мишени  $N$  можно рассчитать по формуле:

$$N = (\rho d N_A)/A, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность вещества мишени,  $d$  – толщина мишени,  $N_A$  – число Авогадро,  $A$  – массовое число.

Сечение реакции определенного типа называются парциальными сечениями. Полное сечение реакций складывается из парциальных сечений:

$$\sigma = \sum \sigma_b, \quad (6)$$

за единицу сечения принят 1 барн =  $10^{-24}$  см<sup>2</sup>.

Для улучшения управления и проектирования реакторов также рассчитывают константу скорости реакции с помощью уравнения Аррениуса:

$$k(T) = A \exp[-E_a/(R T)], \quad (7)$$

где  $A$  – фактор частоты (характеризует частоту столкновения реагирующих частиц),  $E_a$  – энергия активации (минимальная энергия, которую должны иметь частицы для преодоления энергетического барьера и начала химической реакции),  $R$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Параметры возможных ядерных реакций представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры возможных ядерных реакций [1]

| №  | Реакция                                                 | Энерговыделение $E$ , МэВ | Сечение реакции $\langle \sigma \rangle$ , см <sup>3</sup> /с | Константа скорости $k$ , с <sup>-1</sup> |
|----|---------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1  | D1+D→T+p                                                | 4                         | $4.116 \cdot 10^{-17}$                                        | $4.116 \cdot 10^{+2}$                    |
| 2  | D1+D→ <sup>3</sup> He+n                                 | 3.3                       | $1.487 \cdot 10^{-17}$                                        | $1.487 \cdot 10^{+2}$                    |
| 3  | D1+ <sup>3</sup> He→ <sup>4</sup> He+p                  | 18.3                      | $5.751 \cdot 10^{-16}$                                        | $5.751 \cdot 10^{+3}$                    |
| 4  | D1+T→ <sup>4</sup> He+n                                 | 17.59                     | $1.820 \cdot 10^{-14}$                                        | $1.820 \cdot 10^{+5}$                    |
| 5  | D1+T→ <sup>3</sup> He+n+n                               | 17.59                     | $1.820 \cdot 10^{-14}$                                        | $1.820 \cdot 10^{+5}$                    |
| 6  | T+T→ <sup>4</sup> He+n+n+γ                              | 11.3                      | $1.792 \cdot 10^{-17}$                                        | $1.792 \cdot 10^{+2}$                    |
| 7  | T+ <sup>3</sup> He→ <sup>4</sup> He+p+n+γ               | 12.1                      | $3.202 \cdot 10^{-16}$                                        | $3.202 \cdot 10^{+3}$                    |
| 8  | T+ <sup>3</sup> He→ <sup>4</sup> He+D                   | 4.8                       | $2.368 \cdot 10^{-16}$                                        | $2.368 \cdot 10^{+3}$                    |
| 9  | <sup>10</sup> B+n→ <sup>7</sup> Li+ <sup>4</sup> He     | 2.31                      | $2.322 \cdot 10^{-9}$                                         | $2.322 \cdot 10^{+10}$                   |
| 10 | B+p→He+He+He+γ                                          | 8.7                       | $4.270 \cdot 10^{-16}$                                        | $4.270 \cdot 10^{+3}$                    |
| 11 | D1+ <sup>11</sup> B→ <sup>12</sup> C+n                  | 13.7                      | $4.270 \cdot 10^{-16}$                                        | $4.270 \cdot 10^{+3}$                    |
| 12 | p+ <sup>7</sup> Li→ <sup>4</sup> He+ <sup>4</sup> He+ γ | 17.3                      | $1.233 \cdot 10^{-19}$                                        | 1.233                                    |
| 13 | p+T→ <sup>4</sup> He+ γ                                 | 19.7                      | $1.672 \cdot 10^{-15}$                                        | $1.672 \cdot 10^{+4}$                    |
| 14 | p+D1→ <sup>3</sup> He+ γ                                | 5.5                       | $1.115 \cdot 10^{-15}$                                        | $1.115 \cdot 10^{+4}$                    |
| 15 | <sup>3</sup> He+ <sup>3</sup> He→ <sup>4</sup> He+p+p   | 12.8                      | $8.162 \cdot 10^{-16}$                                        | $8.162 \cdot 10^{+3}$                    |
| 16 | D1+ <sup>7</sup> Li→ <sup>4</sup> He+ <sup>4</sup> He+n | 15                        | $1.038 \cdot 10^{-18}$                                        | 10.38                                    |
| 17 | n+ <sup>7</sup> Li→n+ <sup>4</sup> He+n                 | -1                        | $1.038 \cdot 10^{-18}$                                        | 10.38                                    |

Чтобы осуществить указанные реакции в соответствующем реакторе, требуется подобрать вещества, которые могут быть использованы как топливо для термоядерных реакций и одновременно служить мишенью для потока ускоренных бомбардирующих частиц. Для достижения таких процессов наиболее подходящими веществами в качестве мишени являются газообразные соединения. Исходя из этого, можно предложить использовать соединения бора и дейтерия – дейтериевые бороводороды. Применение данных соединений дает ряд преимуществ, в том числе тот факт, что при равном давлении в реакционном сосуде будет в 3 раза больше атомов дейтерия, чем в случае газообразного дейтерия. Однако бороводороды являются недостаточно устойчивыми термодинамическими соединениями бора и водорода и в связи с этим синтезируются обычно косвенными методами. В промышленности диборан получают путем восстановления BF<sub>3</sub>: [2]



Реализовать реакцию, учитывая все необходимые требования, можно с помощью модели реактора, схематически представленной на рисунке 1.

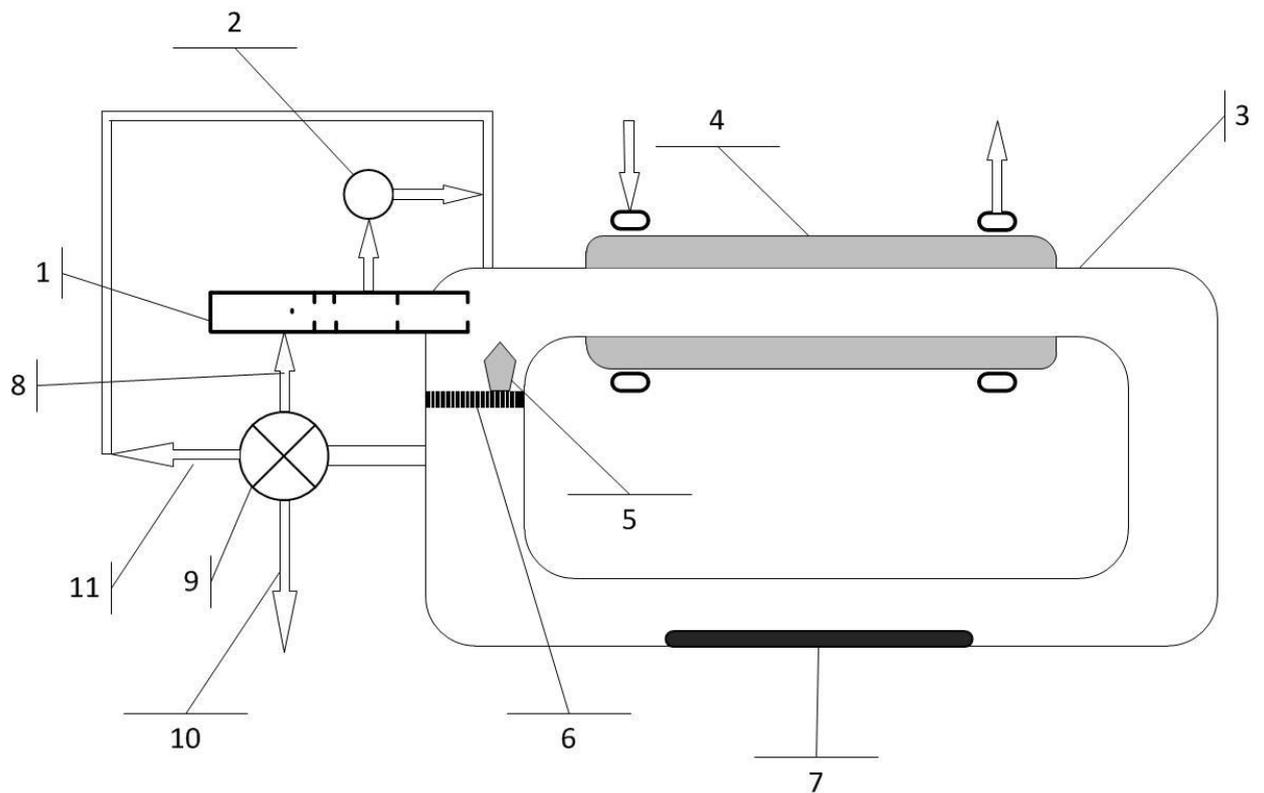


Рисунок 1 – Реактор для осуществления процесса термоядерного синтеза с использованием потока дейтронов и газообразной мишени: 1 – контур получения и ускорения дейтронов; 2 – насос ускорителя; 3 – первый реакционный контур; 4 – второй реакционный контур и контур охлаждения. 5 – катод-компенсатор; 6 – перегородка; 7 – ловушка для гидридов лития; 8 – подача дейтерия D<sub>2</sub>; 9 – регенерационный контур; 10 – отработанное топливо (<sup>4</sup>He, H<sub>2</sub>, <sup>3</sup>He); 11 – контур возврата несгоревшего ядерного топлива (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). [3]

Приведем общий расчет количества столкновений частиц при бомбардировке их потоком покоящейся мишени из частиц топлива, находящихся в газообразном состоянии.

Пусть реактор представляет собой цилиндрический сосуд с площадью сечения  $S$  и объемом  $V$ . Газ в реакторе находится под давлением  $P$  и имеет концентрацию  $n$ . Общее количество частиц в реакторе вычисляется по формуле:

$$N = V \cdot n. \quad (9)$$

Так при  $V = 10 \text{ м}^3$ ,  $P = 10^5 \text{ Па}$  и  $n = 10^{19} \text{ моль/м}^3$  общее количество частиц  $N = 10^{20} \text{ моль}$ . Суммарная площадь сечения всех частиц составляет:

$$S_{\text{сеч}} = N \langle \sigma_v \rangle, \quad (10)$$

где  $\langle \sigma_v \rangle$  – сечение захвата частиц. Предположим, что сечение  $\langle \sigma_v \rangle = 10^{-19} \text{ м}^2$ , тогда  $S_{\text{сеч}} = 10 \text{ м}^2$ . Следовательно, доля общей площади цилиндра, занятая частицами, составляет:

$$\alpha = S_{\text{сеч}}/S, \quad (11)$$

где при площади сечения  $S = 1 \text{ м}^2$  получаем  $\alpha = 10$ . Обозначим за  $J$  плотность потока дейтронов, поступающих в реактор. Количество частиц, пересекающих сечение цилиндра в секунду и взаимодействующих с частицами в объеме реактора в расчете на единицу объема, составляет:

$$\omega = (J \cdot S \cdot \alpha)/V. \quad (12)$$

Пусть  $J = 10^{15} \text{ дейтронов/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , тогда  $\omega = 10^{13} \text{ дейтронов/с}$ . Уравнение скорости реакции имеет вид:

$$v = \omega/N_A = k \cdot C, \quad (13)$$

где  $N_A$  – число Авогадро,  $k$  – константа скорости реакции ( $\text{с}^{-1}$ ),  $C = n \cdot P / N_A$  – концентрация реагентов (моль/л). Подставляя в выражение (13) выражения (9)–(12), получим выражение для константы скорости:

$$k = v/C = J \cdot \langle \sigma_v \rangle. \quad (14)$$

Подставляя имеющиеся значения  $J$  и  $\langle \sigma_v \rangle$ , получаем  $k = 1.66 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, управляемый термоядерный синтез представляет собой многообещающий источник энергии, который превосходит возможности деления ядерных реакций. Для успешной реализации термоядерной реакции существуют несколько ключевых требований, включая высокую энергию бомбардирующих частиц и высокую плотность потока ускоренных частиц. Энергия и сечение являются важными характеристиками термоядерной реакции. Для повышения эффективности в термоядерных реакторах возможно использования нестандартных видов топлива и мишени для потока ускоренных частиц. Газообразные соединения, например, дейтериевые бороводороды, являются подходящими кандидатами на роль мишени.

**Список использованных источников:**

1. *Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www-nds.iaea.org/exfor/> – Дата доступа: 7.02.2024.
2. Палеха, В.А. Бор. Свойства и применение в ядерной энергетике / В.А.Палеха, А.А.Гетьман. – *Литье и металлургия*, 2017. – Т. 88, № 3. – С. 91–94.
3. Кудряцев, П.Г. Вариант реализации управляемого термоядерного синтеза в нестационарных условиях / П.Г.Кудряцев, Г.Б. Макринич, О.Л.Фиговский. – *Инженерный вестник дона*, 2016. – № 1. – 22 с.

## PROSPECTS AND OPTIMIZATION OF CONTROLLED THERMONUCLEAR FUSION: ENERGY POTENTIAL AND REACTION PARAMETERS

*Hartanovich A.S.<sup>1</sup>*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Kurhuzava A.E.*

**Annotation.** This article provides an overview of the prospects for controlled thermonuclear fusion, as well as a method of its implementation based on the use of non-standard fuels, and considers examples of non-standard fuels that can be used to improve the efficiency of reactors.

**Keywords.** Thermonuclear fusion, neutron-free decay, reaction cross section, boron hydride, diborane.