МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ / MODELLING PROCESSES AT NUCLEAR FACILITIES

УДК 533.5:533.9

DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.11 Оригинальная статья / Original paper

Энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций в плазме с учетом релятивистских эффектов и температуры плазмы

А.И. Годес¹, И.И. Золотухин², Д.В. Федоров¹, В.Л. Шаблов¹

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249039 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, 1

² НИЯУ МИФИ,

115409 Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31

Реферат. Работа посвящена определению энергетических характеристик продуктов бинарных термоядерных реакций в холодной и горячей изотермической (но нерелятивистской) плазме с учетом релятивистских эффектов и температуры плазмы. В такой постановке задача ранее не рассматривалась – предполагалось, что релятивистские и температурные эффекты малы вследствие малости энергетических выходов термоядерных реакций по сравнению с энергиями покоя ионов плазмы, как и их кинетических энергий в характерной области предполагаемых температур термоядерного синтеза. Однако, как выясняется, для корректного определения критерия Лоусона для альтернативных термоядерных систем на основе D-³Heи D-D-топлив, ожидаемые температуры которых около и выше 100 кэВ в зависимости от рассматриваемых режимов работы этих систем, температурные эффекты могут оказаться существенными. Приводятся явные формулы для средних энергетических характеристик продуктов бинарных термоядерных реакций с учетом температурных и релятивистских эффектов. Для масс частиц использовались данные международной системы рекомендованных значений фундаментальных физических постоянных CODATA (Committee on Data for Science and Technology, версия 2022 г.). Приводится модификация формулы для нейтронного спектра за счет релятивистских поправок. Эти результаты могут быть использованы при формулировании уравнения теплового баланса в плазме и определении удельной мощности потока нейтронов из плазмы, особенно в случае D-³He- и D-D-синтеза, а также для нейтронной диагностики D-Tплазмы.

Ключевые слова: физика плазмы, управляемый термоядерный синтез, термоядерные реакции, энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций, температурные и релятивистские эффекты, нейтронная диагностика плазмы.

© Годес А.И., Золотухин И.И., Федоров Д.В., Шаблов В.Л., 2025

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

Для цитирования: Годес А.И., Золотухин И.И., Федоров Д.В., Шаблов В.Л. Энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций в плазме с учетом релятивистских эффектов и температуры плазмы. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:129–141. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.11

Введение

Одним из направлений исследований в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) с магнитным удержанием плазмы является обоснование возможностей термоядерных систем, альтернативных традиционной концепции реактора-токамака на D-T-топливе. К таким системам относятся в том числе малонейтронные системы на D-³Не-топливе, в которых предполагаются существенно более высокие температуры реализации по сравнению с D-T-топливом и использование магнитных конфигураций с высоким значением параметра β (β –отношение газокинетического давления плазмы к магнитному давлению), перспективные реакторы на D-D- и p-¹¹B-топливах [1]. Для обоснования потенциальных возможностей альтернативных термоядерных систем требуются определение характеристик плазмы в различных режимах работы таких систем и поиск наиболее эффективных режимов. Известным методом решения этой задачи является определение критерия Лоусона [2] и тройного критерия Лоусона [3] и условий, при которых эти критерии реализуются, что достигается рассмотрением энергетического баланса в плазме и кинетики протекающих в ней процессов. Это, в свою очередь, предполагает корректное константное обеспечение, включая параметризации скоростей реакций синтеза, удельных мощностей потерь на излучение и энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций. Именно последние и являются предметом настоящей статьи.

Постановка задачи заключается в следующем. Во многих статьях и обзорах, посвященных проблеме УТС, в их вводной части приводятся основные термоядерные реакции с указанием энергий их продуктов. При этом молчаливо предполагается, что во входном канале частицы практически покоятся. Например, в [1] и [4, 5] реакция синтеза D+T записывается следующим образом:

 $D+T \rightarrow n(14.07 \text{ M} \Rightarrow B) + {}^{4}\text{He}(3.52 \text{ M} \Rightarrow B),$

а в [6] эта реакция записывается так:

$$D+T \rightarrow n(14.06 \text{ M} \Rightarrow B) + {}^{4}\text{He}(3.52 \text{ M} \Rightarrow B).$$

В большинстве монографий, обзоров, научных статей, посвященных управляемым термоядерным реакциям, энергии нейтрона приписывается округленное значение 14.1 МэВ, а α-частице – 3.5 МэВ [3, 7, 8]. По-видимому, исключением является книга Ю.М. Широкова и Н.П. Юдина [9], в которой для нейтрона указана энергия 14 МэВ, а для α-частицы – 3.6 МэВ. Возможной причиной указанных расхождений в энергии нейтрона является различие в использованных значениях масс частиц. Например, «Физический энциклопедический словарь» издания 1988 г. дает следующее значение массы [10] α-частицы – 4.00273 а.е.м., тогда как в [9] приводится значение 4.001523 а.е.м. В настоящей работе будут использоваться данные международной

системы рекомендованных значений фундаментальных физических постоянных CODATA (Committee on Data for Science and Technology, версия 2022 г.) [11]. По данным CODATA масса α-частицы равна 4,001506 а.е.м.

Энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций в холодной плазме с учетом релятивистских эффектов

Рассмотрим экзотермическую реакцию $\alpha + A \rightarrow 1+2$ с энергетическим выходом $Q = E_{0a} + E_{0A} - E_{01} - E_{02}$, где $E_{0j} = m_j c^2$ – энергия покоя частицы *j*. В случае холодной плазмы можно считать, что во входном канале частицы обладают исчезающе малыми импульсами и исчезающе малыми кинетическими энергтями. Тогда суммарный импульс системы близок к нулю, так что импульсы частиц 1 и 2 практически одинаковы по модулю. Исходя из релятивистского соотношения между импульсом и энергией

$$p^{2}c^{2} = E^{2} - E_{0}^{2} = T^{2} + 2T \cdot E_{0},$$
(1)

где *T* = *E* – *E*₀ – кинетическая энергия частицы, придем к системе двух уравнений:

$$T_1^2 + 2T_1 E_{01} = T_2^2 + 2T_2 E_{02},$$

$$T_1 + T_2 = Q.$$
 (2)

Решение этой системы имеет вид

$$T_1 = \frac{QE_{02} + 0.5Q^2}{E_{01} + E_{02} + Q}.$$
(3)

Ранее этот результат был получен в работах [12, 13].

Нерелятивистское приближение в (3) получается пренебрежением величиной энергетического выхода реакции по сравнению с энергиями покоя ядер

$$T_1^{\text{Hepen}} = \frac{QE_{02}}{E_{01} + E_{02}} = \frac{Qm_2}{m_1 + m_2}.$$
 (4)

Если 1 – нейтрон, 2 – α -частица, массы которых приняты равными 1.008665 а.е.м. и 4.001506 а.е.м. в соответствии с рекомендациями системы физических величин CODATA, то $T_1^{\text{нерел}} = 14.048$ МэВ. Такая же величина получается с использованием массы α -частицы из [11]. Если же использовать общую формулу (3), то энергия нейтрона окажется равной 14.028 МэВ. Близкое значение 14.021 МэВ приведено в работе [14], посвященной нейтронной диагностике плазмы. Как и ожидалось, релятивистская поправка мала и в относительных единицах составляет $1.4 \cdot 10^{-3}$. Поправка такого же порядка возникает и в случае реакции D+³He \rightarrow p+⁴He. В нерелятивистском приближении энергии продуктов реакции таковы: 14,66 МэВ для протона и 3,69 МэВ для α -частицы, а с учетом релятивистских поправок 14,64 и 3,71 МэВ. Для сравнения приведем распределение энергий между ядрами из [1]: 14,68 МэВ и 3,67 МэВ. Для

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

D-D-реакций описанный эффект исчезающе мал. В то же время найденные энергии частиц в холодной плазме необходимы для определения энергий этих частиц в горячей плазме, о чем будет идти речь в следующем разделе.

Энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций в плазме с учетом релятивистских эффектов и температуры плазмы

Рассмотрим теперь случай горячей, но нерелятивистской плазмы. Во входном канале частицы – нерелятивистские. Суммарная кинетическая энергия частиц во входном канале равна

$$T = T_a + T_A = T_{c.m.} + T_{rel}, \tag{5}$$

где *Т_{с.т.}* – кинетическая энергия центра масс; *Т_{rel}* – кинетическая энергия относительного движения.

Как и в предыдущем разделе, нужно определить энергию частицы 1 и закон ее распределения. Начнем с полностью нерелятивистского случая. Законы сохранения энергии и импульса в выходном канале записываются следующим образом:

$$\overline{p}_{1} + \overline{p}_{2} = \overline{P},$$

$$T_{1} + T_{2} = \frac{p_{1}^{2}}{2m_{1}} + \frac{p_{2}^{2}}{2m_{2}} = T_{c.m.} + T_{rel} + Q$$
(6)

или с помощью преобразования Якоби – Лагранжа

$$T_1 + T_2 = T_{c.m.} + T_{rel} + Q = \frac{P^2}{2M_{12}} + \frac{p_{12}^2}{2\mu_{12}},$$
(7)

$$\overline{p}_{12} = \frac{m_2 \overline{p}_1 - m_1 \overline{p}_2}{M_{12}},\tag{8}$$

где \overline{p}_{12} – относительный импульс. Тогда

$$\overline{p}_1 = \overline{p}_{12} + \frac{M_1}{M_{12}}\overline{P} \tag{9}$$

И

$$T_1(\theta) = \frac{p_{12}^2}{2m_1} + \frac{1}{M_{12}} p_{12} P \cos(\theta) + \frac{m_1}{2M_{12}^2} P^2, \qquad (10)$$

где θ – угол между \overline{p}_{12} и \overline{P} . Для вычисления среднего значения энергии частицы 1 необходимо принять во внимание то обстоятельство, что вследствие наличия сильного

взаимодействия функция распределения по относительной энергии будет отличаться от максвелловской [15]. Следуя [15] будем далее обозначать *T_{rel}* как *К*. Функция распределения по *К* имеет вид [15]

$$f(K) = NK\sigma(K)e^{-\frac{K}{kT}},$$
(11)

где $\sigma(K)$ – сечение процесса; N – нормировочная постоянная. Тогда, принимая во внимание (11) и учитывая, что интегрирование по углам дает <cos (θ)> = 0, получим

$$< T_1 > = < \frac{p_{12}^2}{2m_1} > + \frac{m_1}{2M_{12}^2} < P^2 > .$$
 (12)

Преобразуем (12) с учетом соотношений:

 $P^2 = 2M_{aA} \cdot T_{cm'}$

$$\frac{p_{12}^2}{2\mu_{12}} = T_{rel} + T_{c.m.} + Q - \frac{P^2}{2M_{12}} = T_{rel} + Q + \left(1 - \frac{M_{\alpha A}}{M_{12}}\right) T_{c.m.}$$
(13)

Последнее слагаемое в (13) может быть опущено, поскольку в нерелятивистском приближении $M_{aA} = M_{12}$. В этом же приближении

$$< T_{1} >= \frac{m_{2}}{M_{12}}Q + \frac{m_{2}}{M_{12}} < T_{rel} > + \frac{m_{1}}{M_{12}} < T_{c.m.} >= \frac{m_{2}}{M_{12}}Q + \frac{m_{2}}{M_{12}} < K > + \frac{3m_{1}}{2M_{12}}kT, \quad (14)$$

что совпадает с результатом работы [15]. При этом в (14) учтено, что величина *T_{с.т.}* подчиняется распределению Максвелла, так что <*T_{с.т.}* > = 3*kT*/2.

Получим теперь выражения для средних энергий продуктов бинарных термоядерных реакций с учетом температуры плазмы и релятивистских эффектов, предполагая, что во входном канале частицы по-прежнему нерелятивистские, т.е. средняя кинетическая энергия плазменных частиц 3*kT*/2 много меньше их энергий покоя.

В системе центра масс

$$K + E_{0a} + E_{0A} = T_1^{c.m.} + E_{01} + T_2^{c.m.} + E_{02},$$
(15)

причем в формуле (15) кинетическая энергия относительного движения частиц *a* и *A* T_{rel} записана в нерелятивистском приближении $T_{rel} = K$, что допустимо, так как $V_{c.m.} << c$, где $V_{c.m.}$ – скорость движения центра масс. Тогда

$$T_1^{c.m.} + T_2^{c.m.} = E_{0a} + E_{0A} - E_{01} - E_{02} + T_{rel} = Q + K = Q_1.$$
(16)

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

Действуя точно так же, как и раньше, получим

$$T_1^{c.m.} = \frac{Q_1 \cdot E_{02} + 0.5Q_1^2}{E_{02} + E_{01} + Q_1} \,. \tag{17}$$

В лабораторной системе отсчета частицы 1 находится на основании преобразований Лоренца [16]:

$$T_{1}(\theta) = E_{1} - E_{01} = \gamma \left(E_{1}^{c.m} + P_{1x}^{c.m.} \cdot V_{c.m.} \right) - E_{01} = \gamma \left(E_{1}^{c.m.} + P_{1}^{c.m.} \cdot V_{c.m.} \cdot \cos \theta \right) - E_{01}, \quad (18)$$

где $\gamma = (1 - V_{c.m.}^2 / c^2)^{-0.5}$ – релятивистский фактор. В формуле (18) предполагается, что центр масс движется вдоль оси ОХ. После усреднения по углам вклад этого слагаемого в T_1 , как и ранее, занулится, тогда

$$< T_1(\theta) >= \gamma E_1^{c.m.} - E_{01} = \gamma T_1^{c.m.} + (\gamma - 1) E_{01}.$$
 (19)

Принимая во внимание, что

$$\frac{V_{c.m.}^2}{c^2} = \frac{2T_{c.m.}}{E_{0a} + E_{0A}} = \frac{2T_{c.m.}}{E_{01} + E_{02} + Q},$$
(20)

в низшем порядке по величине $V_{c.m.}^2 / c^2$ придем к соотношению

$$< T_{1}(\theta) >= \frac{Q_{1} \cdot E_{02} + 0.5Q_{1}^{2}}{E_{01} + E_{02} + Q_{1}} + \frac{T_{c.m.} \cdot E_{01}}{E_{01} + E_{02} + Q}.$$
(21)

Подставляя в (21) выражение для Q_1 и пренебрегая величиной *К* по сравнению с энергиями покоя частиц (как это и должно быть), перепишем это выражение как

$$< T_{1}(\theta) >= \frac{Q \cdot E_{02} + 0.5Q^{2}}{E_{01} + E_{02} + Q} + \frac{K \cdot E_{02} + T_{c.m.} \cdot E_{01}}{E_{01} + E_{02} + Q}.$$
(22)

После усреднения энергии относительного движения и движения центра масс получим окончательно

$$< T_{1} >= \frac{Q \cdot E_{02} + 0.5Q^{2}}{E_{01} + E_{02} + Q} + \frac{< K > \cdot E_{02} + < T_{c.m.} > \cdot E_{01}}{E_{01} + E_{02} + Q}$$
(23)

или

$$< T_{1} >= \frac{Q \cdot E_{02} + 0.5Q^{2}}{E_{01} + E_{02} + Q} + \frac{< K > \cdot E_{02} + 3/2kT \cdot E_{01}}{E_{01} + E_{02} + Q}$$
(24)

Из последней формулы видна связь с нерелятивистским приближением (14), получающемся из (24) пренебрежением величинами Q² в числителе и Q в знаменателе дроби.

Годес А.И., Золотухин И.И., Федоров Д.В. и др.

Энергетические характеристики продуктов термоядерных реакций в плазме с учетом релятивистских эффектов и температуры плазмы

Для основных термоядерных реакций в практически интересном диапазоне температур плазмы 10 – 150 кэВ с точностью лучше 10⁻³ работает формула (24). Приведенные выше формулы позволяют получить распределение по энергиям частицы 1. Для этого достаточно переписать выражение для $T_1(Q) - T_1$ в виде (по-прежнему в нерелятивистском приближении по величине $V_{c,m}^2 / C^2$)

$$T_{1}(\theta) - \langle \mathsf{T}_{1} \rangle = \frac{(K - \langle K \rangle)E_{02}}{E_{01} + E_{02} + Q} + \frac{(T_{c.m.} - \langle T_{c.m.} \rangle) \cdot E_{01}}{E_{01} + E_{02} + Q} + P_{1}^{c.m.}V_{c.m.}\cos\theta.$$
(25)

Последнее слагаемое запишем в нерелятивистском приближении для $P_1^{c.m.}$

$$P_{1}^{c.m.}V_{c.m.}\cos\theta \cong V_{c.m.}\cos\theta \frac{1}{c} \left(2\frac{Q_{1}\cdot E_{02}+\frac{1}{2}Q_{1}^{2}}{E_{02}+E_{01}+Q_{1}}E_{01}\right)^{\frac{1}{2}} \cong V_{c.m.}\left(2\mu_{12}\left(Q+K\right)\right)^{\frac{1}{2}}\cos\theta.$$
(26)

Повторяя теперь выкладки из [15] (формулы (32)–(35)), получим функцию распределения по энергии частицы 1 [14, 15]:

$$f(T_1)dT_1 = \left(\frac{4\pi m_1 kT < T_1 >}{M_{12}}\right)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{M_{12}}{4m_1 kT < T_1 >} (T_1 - < T_1 >)^2\right) dT_1.$$
(27)

Формула (27) представляет собой релятивизованный вариант распределения из работы [15], в котором для величины $<T_1>$ вместо (14) используется выражение (24). Основное отличие заключается в замене первого слагаемого в этих формулах, что в случае реакции D+T \rightarrow n+⁴He, как было показано выше, приводит к замене нерелятивистского значения энергии нейтрона 14.048 МэВ на величину 14.028 МэВ за счет релятивистских поправок.

Заключение

Сформулируем основные результаты проведенного исследования.

 Как и ожидалось, релятивистские эффекты при определении энергий продуктов термоядерных реакций малы и фактически характерны только для двух реакций с наибольшим энерговыделением: D+T и D+³He. С их учетом эти реакции с указанием энергий их продуктов будут записываться в виде

$$D+T \rightarrow n(14.03 \text{ M} \Rightarrow B) + {}^{4}\text{He}(3.56 \text{ M} \Rightarrow B),$$

 $D+{}^{3}\text{He} \rightarrow p(14.64 \text{ M} \Rightarrow B) + {}^{4}\text{He}(3.71 \text{ M} \Rightarrow B).$ (28)

Таким образом, отличие от обычно приводимых значений энергий образующихся ядер [1, 4] составляет 40 кэВ для обеих реакций.

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

2. Температурные эффекты могут оказаться существенными при определении критерия Лоусона и для оценки мощности нейтронного потока *P_n* из термоядерных реакторов на основе D+³He- и D-D-топлив. Как было установлено, нейтрон уносит из горячей плазмы дополнительную (по сравнению с холодной плазмой) энергию, в среднем равную

$$\Delta E_1 = \frac{\langle K \rangle \cdot E_{02} + 3/2kT \cdot E_{01}}{E_{02} + E_{01} + Q}.$$
(29)

В формуле (29) индекс 1 относится к нейтрону. На рисунке 1 приведена зависимость величины ΔE_1 от температуры плазмы для реакций D+T \rightarrow n+⁴He и реакции D+D \rightarrow n+³He.



Рис. 1. Температурные поправки к энергии вылетающего нейтрона в зависимости от температуры плазмы для двух реакций $D+T \to n+{}^4\text{He}$ и $D+D \to n+{}^3\text{He}$

В случае D+³He-топлива температура критерия Лоусона находится в районе 105–150 кэВ в зависимости от режима использования топлива (эквимолярное D+³He топливо, режим самообеспечения ³He, параметры усиления мощности, коэффициенты выхода магнитотормозного излучения, полностью катализированный или полностью некатализированный циклы) [3, 5, 12]. При таких температурах учет температуры плазмы в реакторах на основе D+³He-топлива может повлиять на оценку мощности нейтронного потока и энергетический баланс в термоядерном реакторе. Один из каналов образования нейтронов в таких реакторах – реакция D+D — n+³He с энергетическим выходом 3,27 МэВ. В этом случае релятивистские поправки к энергии нейтрона малы, и в среднем она будет равна

$$T_n = 2,45(\mathsf{M}\mathfrak{3}\mathsf{B}) + \Delta E_n = 2,45(\mathsf{M}\mathfrak{3}\mathsf{B}) + \frac{\langle \mathcal{K} \rangle \cdot \mathcal{E}_{\mathsf{0}He} + 3/2kT \cdot \mathcal{E}_{\mathsf{0}n}}{2\mathcal{E}_{\mathsf{0}d}}.$$
 (30)

Другой канал образования нейтронов – реакция синтеза $D+T \rightarrow n + {}^{4}He$ за счет образования трития в реакции $D+D \rightarrow p+T$. В этом случае формула (29) приобретает вид

$$T_n = 14.028(M \ni B) + \Delta E_n = 14.028(M \ni B) + \frac{\langle K \rangle \cdot E_{0\alpha} + 3/2kT \cdot E_{0n}}{E_{0d} + E_{0T}}.$$
 (31)

Графики величины ΔE_n , рассчитанные в приближении эффективного радиуса (ПЭР), приведены на рис. 1. В случае реакции D+T \rightarrow n+⁴He скорости реакции рассчитываются точно так же, как и в случае реакции D+³He \rightarrow p+⁴He (по этому поводу см. статьи [12, 13, 17]). Соответствующие параметры по скорости этой реакции из базы данных EXFOR [18], одновременно согласующиеся с табличными данными по скорости реакции из базы данных NACRE II [19], таковы:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0,333695, \, \alpha_1 = 0,052017, \, \alpha_2 = -0,00063, \\ \beta_0 &= 0,172543, \, \beta_1 = 0,00596, \, \beta_2 = 0,000243. \end{aligned} \tag{32}$$

Но, как известно, приближение эффективного радиуса определяет только полное неупругое сечение реакции. Поэтому напрямую его нельзя использовать для реакции D + D → n + ³He, а приведенные ниже параметры ПЭР следует рассматривать как удобную параметризацию сечения и скорости этой реакции. Как и в предыдущем случае, сечения и скорости согласуются с данными из EXFOR и NACRE II, а соответствующие параметры этой параметризации таковы:

$$\alpha_0 = 11,075762, \alpha_1 = 0,138683, \alpha_2 = -0,00134,$$

 $\beta_0 = 0,736568, \beta_1 = 0,068227, \beta_2 = -0,000073.$ (33)

Если температура плазмы будет отвечать критерию Лоусона (105 кэВ) [3, 5, 12], то температурная поправка к энергии нейтрона в реакции D+D → n+³He составит около 0,24 МэВ или 10%. Таким образом, изучаемая температурная поправка является заметной и ее следует учитывать в энергетическом балансе плазмы.

При определении тройного критерия Лоусона, когда ожидаемая температура D+³He синтеза около 70 кэВ [3, 20], температурные эффекты будут заметно меньше: 0,17 МэВ или около 7%.

В случае реакции D+T → n+⁴He поправка к энергии нейтрона при температуре 105 кэВ будет равна 0,135 МэВ, а при температуре 70 кэВ – 0,103 МэВ. Эти поправки, как и указанные выше для реакции D+D → n+³He, дадут вклад в энергетический баланс плазмы. Ясно, что все вышесказанное относится и к чистому D+D-синтезу. Этот вопрос требует дополнительного изучения, что предполагается сделать в отдельной работе.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант No. 25-22-20058).

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

Литература

1. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017, 200 с.

2. Lawson J.D. Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. Proceedings of the Physical Society. Section B. 1957;70(1):6. DOI: https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/303

3. Wurzel S.E., C. Hsu S.C. Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion. *Phys. Plasmas.* 2022;29:062103. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0083990

4. Долголева Г.В., Забродина Е.А. Сравнение двух моделей расчета термоядерной кинетики. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014, № 68, 14 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint. asp?id=2014-68 (дата обращения: 30.02.2025).

5. Баско М.М. Физические основы инерциального термоядерного синтеза. М.: ИТЭФ, 2007, 147 с.

6. Бекман И.Н. Ядерная физика. Курс лекций. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2010, 511 с.

7. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1965, 496 с.

8. Stott P.E. The feasibility of using d-³He and d-d fusion fuels. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2005;47:1305–1338. DOI: https://doi.org/10.1088/0741-3335/47/8/011

9. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М.: Наука, 1980, 727 с.

10. Альфа-частица. Физический энциклопедический словарь. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1988, с. 64.

11. Mohr P.J., Newell D.B., Taylor R.N., Tiesinga E. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants, 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03787

12. Годес А.И., Шаблов В.Л. Критерий Лоусона для различных сценариев использования D-³He-топлива в термоядерных реакторах. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2023;2:134–147. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.11

13. Godes A.I., Shablov V.L. Lawson criterion for different scenarios of using D-³He fuel in fusion reactors. *Nuclear energy and technology*. 2023;9(4):207–214. DOI: https://doi.org/10.3897/ nucet.9.114267

14. Усенков П.Л., Гаганова В.В., Молодцев Д.А. Нейтронно-активационный метод диагностики дейтериево-тритиевой плазмы. *Физика плазмы*. 2020;46(1):33–39. DOI: https://doi.org/10.31857/S0367292120010175

15. Brysk H. Neutron energies and spectra. *Plasma Physics*. 1973;15:611–617. DOI: https://doi.org/10.1088/0032-1028/15/7/001

16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1973, 504 с.

17. Alper I.B., Godes A. I., Shablov V.L. New parametrization for the ³He(d,p) ⁴He fusion reaction rate and refinement of the Lawson criterion for d-³He thermonuclear reactors. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2103:012197. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012197

18. Zerkin V.V., Pritychenko B. The experimental nuclear reaction data (EXFOR): Extended computer database and Web retrieval system. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A.* 2018;888:31–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.045

19. Xu Y., Takahashi K., Goriely S., Arnould M., Ohta M., Utsunomiya H. NACRE II: an update of the NACRE compilation of charged-particle-induced thermonuclear reaction rates for nuclei with mass number A < 16. *Nuclear Physics A*, 2013;918:61–169, DOI: https://doi.org/10.1016/j. nuclphysa.2013.09.007

20. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Low radioactivity D-³He fusion fuel cycles with ³He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2002;44(2):253. DOI: https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/2/308

Поступила в редакцию 05.05.2025 После доработки 30.05.2025 Принята к опубликованию 10.06.2025

Авторы

<u>Годес</u> Александр Игоревич, старший преподаватель кафедры общей и специальной физики,

E-mail: godes.ai@yandex.ru

Золотухин Иван Игоревич, магистр 1-го года обучения,

E-mail: zolivan123@mail.ru

<u>Федоров</u> Даниил Владиславович, бакалавр 4-го года обучения отделения ядерной физики и технологий,

E-mail: daniilfedorov7@yandex.ru

<u>Шаблов</u> Владимир Леонидович, профессор отделения ядерной физики и технологий, д.ф.-м.н.,

E-mail: shablov.vl@yandex.ru

UDC 533.5:533.9

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

Godes A.I.¹, Zolotukhin I.I.², Fedorov D.V.¹, Shablov V.L.¹

¹ IATE MEPhI,

1 Studgorodok ter., 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

² MEPhI,

31 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

Abstract

The present work is devoted to determination of energy characteristics of products of binary thermonuclear reactions in cold and hot isothermal (but nonrelativistic) plasmas taking into account relativistic effects and plasma temperature. In such formulation the problem was not considered earlier: it was supposed that relativistic and temperature effects are small due to smallness of energy yields of thermonuclear reactions in comparison with rest energies of plasma ions, as well as their kinetic energies in the characteristic region of assumed temperatures of thermonuclear fusion. However, as it turns out, for the correct determination of the Lawson criterion for alternative fusion systems based on D-³He and D-D fuels, whose expected temperatures are near and above 100 keV depending on the considered modes of operation of these systems (power amplification parameters, magneto-braking yield coefficients, fully catalysed or fully uncatalysed cycles) temperature effects can be significant. Explicit formulas for average energy characteristics of products of binary thermonuclear reactions taking into account temperature and relativistic effects are given. For particle masses, data from the international system of recommended values of fundamental physical constants CODATA (Committee on Data for Science and Technology, version 2022) were used, which led, taking into account relativistic effects, to deviations from the energies

Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature

of the products of the two reactions with the largest energy yields $D+T \rightarrow n+\alpha$ and $D+^{3}He \rightarrow p+\alpha - in$ both cases by 40 keV. The value of neutron energy in the first of the above reactions in cold plasma is 14.028 MeV. A modification of the formula for the neutron spectrum due to relativistic corrections is given. These results can be used in formulating the heat balance equation in plasma and determining the neutron flux from plasma, especially in the case of D-³He and D-D fusion, as well as for neutron diagnostics of D-T plasma.

Keywords: plasma physics, controlled thermonuclear fusion, thermonuclear reactions, energy characteristics of products of thermonuclear reactions, temperature and relativistic effects, neutron plasma diagnostics.

For citation: Godes A.I., Zolotukhin I.I., Fedorov D.V., Shablov V.L. Energy Characteristics of Thermonuclear Reaction Products in Plasma Taking into account Relativistic Effects and Plasma Temperature. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:129–141. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.11 (in Russian).

References

1. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. Alternative Thermonuclear Power Systems. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017, 200 p. (in Russian).

2. Lawson J.D. Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. *Proceedings of the Physical Society. Section B.* 1957;70(1):6. DOI: https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/303

3. Wurzel S.E., C. Hsu S.C. Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion. *Phys. Plasmas.* 2022;29:062103. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0083990

4. Dolgoleva, G.V., Zabrodina, E.A. Comparison of Two Models for Calculating Thermonuclear Kinetics. Preprints of the M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics. 2014, no. 68, 14 p. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-68 (accessed Feb.30, 2025) (in Russian).

5. Basko M.M. Physical foundations of the inertial thermonuclear fusion. Moscow, Ist. Theor. Exp. Phys. Publ., 2007, 147 p. (in Russian).

6. Bekman I.N. Nuclear Physics. Course of Lectures. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2010, 511 p.

7. Artsimovich L.A. Controlled Thermonuclear Reactions. Gordon and Breach Science Publishers, NY, 1964, 405 p.

8. Stott P.E. The feasibility of using d-³He and d-d fusion fuels. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2005;47:1305–1338. DOI: https://doi.org/10.1088/0741-3335/47/8/011

9. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. Nuclear Physics. Moscow, Nauka Publ., 1980, 727 p. (in Russian).

10. Alpha Particle. Physical Encyclopedic Dictionary. Moscow, Soviet Encyclopedia Publishing House, 1988, p. 64.

11. Mohr P.J., Newell D.B., Taylor R.N., Tiesinga E. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2022, 71 p. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.03787

12. Godes, A.I., Shablov, V.L. Lawson Criterion for Various Scenarios of D-3He Fuel Use in Thermonuclear Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;2:134–147. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.11

13. Godes A.I., Shablov V.L. Lawson criterion for different scenarios of using D-³He fuel in fusion reactors. *Nuclear energy and technology*. 2023;9(4):207–214. DOI: https://doi.org/10.3897/ nucet.9.114267

14. Usenkov P.L., Gaganova V.V., Molodtsov D.A. Neutron Activation Method for Diagnosing Deuterium-Tritium Plasma. *Plasma Physics*. 2020;46(1):33–39. DOI: https://doi.org/10.31857/S0367292120010175

15. Brysk H. Neutron energies and spectra. *Plasma Physics*. 1973;15:611-617. DOI: https://doi.org/10.1088/0032-1028/15/7/001

16. Landau L.D., Lifshitz E.M. Course of Theoretical Physics. Vol. 3. Quantum Mechanics. Pergamon Press, Oxford, 1977, 671 p.

17. Alper I.B., Godes A. I., Shablov V.L. New parametrization for the ³He(d,p) ⁴He fusion reaction rate and refinement of the Lawson criterion for d-³He thermonuclear reactors. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021;2103:012197. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012197

18. Zerkin V.V., Pritychenko B. The experimental nuclear reaction data (EXFOR): Extended computer database and Web retrieval system. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A.* 2018;888:31–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.045

19. Xu Y., Takahashi K., Goriely S., Arnould M., Ohta M., Utsunomiya H. NACRE II: an update of the NACRE compilation of charged-particle-induced thermonuclear reaction rates for nuclei with mass number A < 16. *Nuclear Physics A*, 2013;918:61–169, DOI: https://doi.org/10.1016/j. nuclphysa.2013.09.007

20. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Low radioactivity D-3He fusion fuel cycles with 3He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2002;44:263260. DOI: https://doi.org/10.1088/07413335/44/2/308

Authors

Aleksandr I. <u>Godes</u>, Senior Lecturer, Department of Institute General Vocational Training, E-mail: godes.ai@yandex.ru

Ivan I. <u>Zolotukhin</u>, 1nd year Master's Course Student, Department of Closed Nuclear Fuel Cycle Technologies,

E-mail: zolivan123@mail.ru

Daniil V. <u>Fedorov</u>, 4nd year Bachelor, Department of Nuclear Physics and Technology, E-mail: daniilfedorov7@yandex.ru

Vladimir L. <u>Shablov</u>, Professor, Department of Nuclear Physics and Technology, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: shablov.vl@yandex.ru