

ВЛИЯНИЕ ЛИТИЯ НА ЭНЕРГОБАЛАНС ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

В.Р. Веснин

vesninvr@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проанализировано влияние лития на энергобаланс термоядерной плазмы с D–D-реакцией. В результате сгорания образующегося трития рождаются высокоэнергетичные нейтроны. Исследована возможность получения нейтронов с энергией 14 МэВ в дейтериевой плазме с примесью лития. Смесь лития и дейтерия потенциально может быть использована в качестве источника быстрых нейтронов. Допустимое отношение концентраций лития и дейтерия составляет 0,3...0,4 при температуре плазмы около 100 кэВ.

Ключевые слова

Термоядерная плазма, дейтерий, литий, быстрые нейтроны, критерий Лоусона, нейтронный выход, энергетический баланс

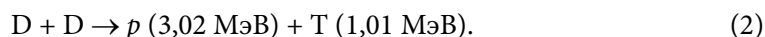
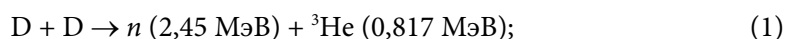
Поступила в редакцию 12.07.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Системы, генерирующие быстрые нейтроны с энергией примерно 10 МэВ, являются перспективными направлениями энергетики. Такие источники можно применять для решения ряда задач, связанных с утилизацией радиоактивных отходов, замыканием ядерного топливного цикла и производством энергии и ядерного топлива в гибридных реакторах.

Для получения нейтронов с энергией 14 МэВ, как правило, рассматривают D–T-реакцию. Однако D–D-синтез более предпочтителен с точки зрения доступности компонентов, а также вследствие отсутствия необходимости воспроизводства трития [1].

D–D-реакция протекает по двум почти равновероятным каналам:

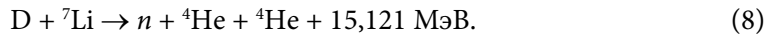
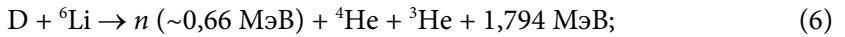
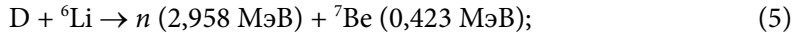
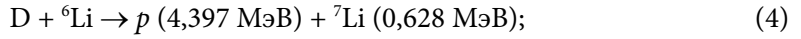
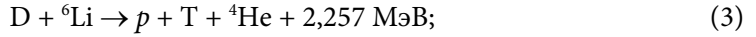


Энергия первичных D–D-нейтронов недостаточно высока для инициации ядерных превращений. С другой стороны, высокоэнергетичные нейтроны могут рождаться в результате сгорания трития, получаемого в реакции (2).

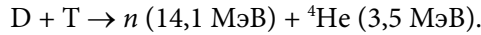
Дейтериевую смесь потенциально можно использовать в термоядерном реакторе на основе таких систем, как открытая ловушка, обращенная магнитная конфигурация или сферический токамак [2–4]. Существует отработанная технология применения лития для покрытия внутренних стенок реактора. В этом случае поступающий со стенок в плазму литий может реагировать с дейтерием. В результате реакций синтеза лития с дейтерием также образуются нейтроны и тритий.

Целью данной работы является теоретический анализ влияния небольшого количества лития на энергетический баланс дейтериевой плазмы.

D–D-цикл с добавкой лития. В смеси дейтерия и лития возможны следующие реакции [5]:

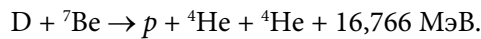
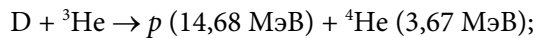


В результате реакций (2) и (3) рождается тритий, который сгорает при взаимодействии с дейтерием:



По сравнению с другими реакциями у D–T-реакции скорость высока, и значительная часть трития (около 70 % [6, 7]) будет сгорать до того, как покинет ловушку.

Такие продукты реакций (1)–(6), как ${}^7\text{Be}$ и ${}^3\text{He}$, также могут вступать во вторичные реакции, например:



Для анализа примем, что тритий полностью сгорает до ухода из ловушки, а остальные компоненты не успевают вступать во вторичные реакции, поскольку сечение D–T-реакции значительно превосходит сечения других.

Реакция (8) может протекать по нескольким каналам (в зависимости от энергии сталкивающихся ядер), поэтому энергии рождающихся нейтронов могут быть различными. Энергия нейтронов составляет около 14 МэВ, если происходит прямое взаимодействие сталкивающихся ядер при высоких энергиях. При умеренных энергиях, соответствующих рассматриваемым условиям, образуются нейтроны с энергией около 5 МэВ [8, 9].

Для смесей D– ${}^6\text{Li}$ и D– ${}^7\text{Li}$ проведены расчеты. На рис. 1 представлены параметры скоростей реакций (1)–(8), где видно, что у смесей D– ${}^6\text{Li}$ скорость меньше, чем у смесей D–D и D– ${}^7\text{Li}$ при температуре плазмы T до 100 кэВ.

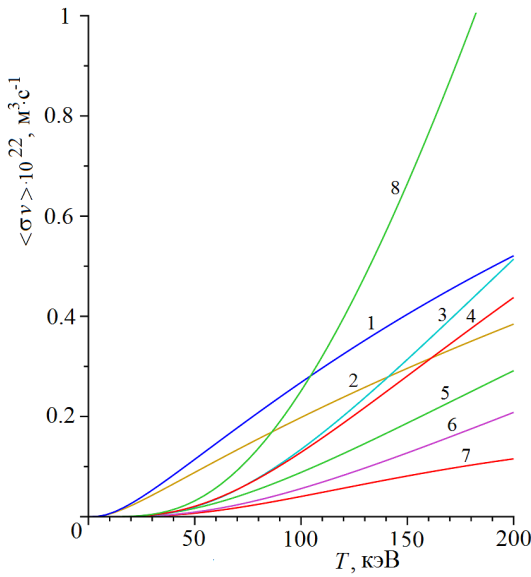


Рис. 1. Зависимость параметра скорости реакции от температуры плазмы (нумерация кривых соответствует реакциям (1)–(8))

Критерий Лоусона. Для анализа воспользуемся уравнением баланса энергии (для единицы объема) [10–12]

$$P_{aux} + P_{fus} = P_n + P_{rad} + \frac{W_{th}}{\tau_E}, \quad (9)$$

где P_{aux} — поглощенная мощность внешнего нагрева; P_{fus} — термоядерная мощность; P_n — мощность нейтронов; P_{rad} — мощность потерь на излучение; W_{th} — энергия тепловых компонентов; τ_E — время удержания энергии тепловых компонентов.

Используем следующие выражения для составляющих энергобаланса (9).

Термоядерная мощность

$$P_{fus} = \sum_{i,j,k} R_{i,j} n_i n_j \langle \sigma v \rangle_k W_k, \quad (10)$$

где i, j — сорта реагирующих ионов; k — номер реакции между ними; $R_{ij} = 1$ при $i \neq j$, $R_{ij} = 1/2$ при $i = j$; n_i, n_j — концентрация тепловых ионов; $\langle \sigma v \rangle_k$ — параметр скорости k -й реакции; W_k — суммарная энергия, выделяемая при k -й реакции.

Мощность, выделяемая с нейтронами, вычисляется аналогично, но вместо W_k необходимо использовать W_k^n — энергию нейтронов, которые в балансе рассматриваются как потери, поскольку мгновенно покидают плазму, не передавая ей энергию:

$$P_n = \sum_{i,j,k} R_{i,j} n_i n_j \langle \sigma v \rangle_k W_k^n. \quad (11)$$

Мощность потерь на излучение

$$P_{rad} = n_e^2 \Psi(T_e, Z_{eff}^2), \quad (12)$$

где n_e — концентрация электронов; $\Psi(T_e, Z_{eff}^2)$ — функция, зависящая от температуры электронов T_e и квадрата эффективного заряда.

Энергия тепловых компонентов

$$W_{th} = \frac{3}{2}(n_i k_B T_i + n_e k_B T_e), \quad (13)$$

где T_i — температура тепловых ионов; k_B — постоянная Больцмана.

Мощность внешнего нагрева P_{ext} принята постоянной в заданном режиме и характеризуется коэффициентом усиления мощности

$$Q = P_{fus} / P_{ext}. \quad (14)$$

Параметры (12)–(14) запишем следующим образом [13, 14]:

$$P_{fus} = c_f n^2 \varphi_f(T); \quad (15)$$

$$P_n = c_n n^2 \varphi_n(T); \quad (16)$$

$$P_{rad} = c_r n^2 \varphi_r(T); \quad (17)$$

$$W_{th} = c_W n T, \quad (18)$$

где c_f, c_n, c_r, c_W — коэффициенты, обеспечивающие связь выражений (15)–(18) и (10)–(13); $\varphi_f(T), \varphi_r(T)$ — величины, зависящие только от температуры T (при заданном составе плазмы).

В результате преобразований уравнение баланса энергии принимает вид

$$[(1+Q^{-1})c_f - c_n] \varphi_f(T) n^2 = c_r \varphi_r(T) n^2 + \frac{c_W n^2 T}{n \tau_E}. \quad (19)$$

В этом выражении учтено постоянство внешнего нагрева, а также его связь с термоядерной мощностью согласно формуле (14).

Из уравнения (19) выразим параметр Лоусона

$$L(T) = n \tau_E = \frac{c_W T}{\left[(1+Q^{-1})c_f - c_n \right] \varphi_f(T) - c_r \varphi_r(T)}. \quad (20)$$

Из соотношения (20) следует, что $n \tau_E$ — функция только температуры.

На рис. 2 представлены зависимости критерия Лоусона L и параметра LT для смесей $D-^6Li$ и $D-^7Li$ от температуры плазмы, где $L = n \tau$ (n — суммарная концентрация всех компонентов плазмы, $\tau = \tau_E$ — время удержания энергии тепловых компонентов). Приведенные значения соответствуют режиму с коэффициентом усиления $Q = P_{fus} / P_{aux} = 1$. Критерий Лоусона L (и, соответственно, параметр LT) определяет минимальные требования для поддержания реакции.

Физический смысл критерия Лоусона состоит в том, что при определенной температуре необходим компромисс между концентрацией частиц плазмы (или плотностью) и временем удержания их энергии в зоне реакции.

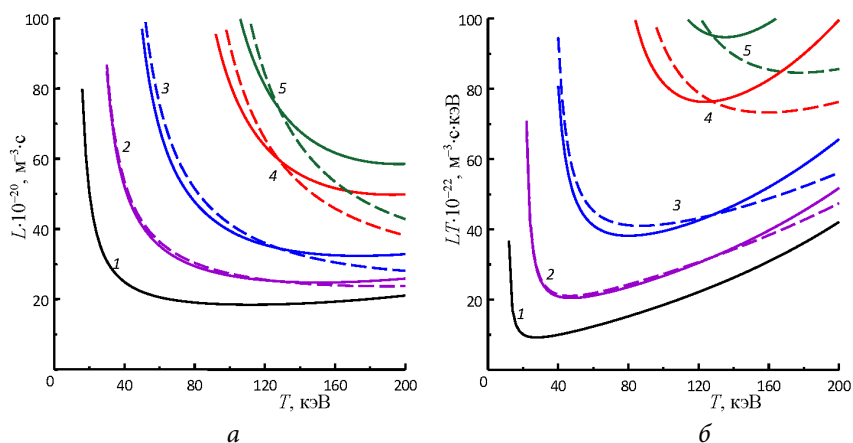


Рис. 2. Зависимости критерия Лоусона L (а) и параметра LT (б) для смесей $D-^6Li$ (сплошные кривые) и $D-^7Li$ (штриховые кривые) от температуры плазмы при различных значениях отношения концентраций лития к дейтерию:

1 — $x_{Li} = 0$; 2 — $x_{Li} = 0,1$; 3 — $x_{Li} = 0,2$; 4 — $x_{Li} = 0,35$; 5 — $x_{Li} = 0,40$

Добавка лития в дейтериевую плазму повышает требуемые nt , и это значение возрастает с повышением концентрации x_{Li} .

На рис. 3 приведены значения выхода нейтронов из смесей $D-^6Li$ и $D-^7Li$ в зависимости от температуры плазмы при полном сгорании трития.

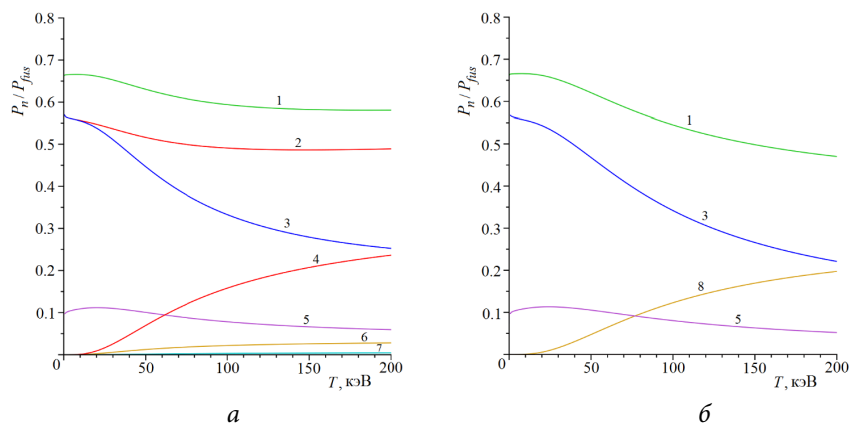


Рис. 3. Выход нейтронов из смесей $D-^6Li$ с $x_{Li} = 0,35$ (а) и $D-^7Li$ с $x_{Li} = 0,40$ (б) при полном сгорании трития:

1 — суммарный; 2 — нейтроны с энергией 14,1 МэВ; 3 и 4 — нейтроны с энергией 14,1 МэВ в результате сгорания трития, рождающегося в реакции соответственно (2) и (3); 5 — нейтроны с энергией 2,45 МэВ, рождающиеся в реакции (1); 6 — нейтроны с энергией 2,958 МэВ, рождающиеся в реакции (5); 7 — нейтроны с энергией ~0,66 МэВ, рождающиеся в реакции (6); 8 — нейтроны с энергией ~5 МэВ, рождающиеся в реакции (8) Из рис. 3 видно, что при добавлении лития-6 выход нейтронов с энергией 14,1 МэВ составляет около 50 % термоядерной мощности P_{fus} , а при использовании только D-D-реакции — примерно 35 %

Выводы. Анализ результатов, полученных при анализе энергобаланса смеси дейтерия и лития, свидетельствует о возможности использования данного вида систем в качестве источника нейтронов с энергией 14 МэВ.

Как показали расчеты, допустимое отношение концентраций лития и дейтерия составляет 0,3...0,4 при температуре около 100 кэВ.

Дейтериевая плазма с небольшой добавкой лития потенциально может быть применена в качестве источника быстрых нейтронов.

Литература

- [1] Долганов В.В., Чирков А.Ю. Особенности реакций синтеза при столкновениях ускоренных дейтронов в плазме. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/teje/1523.html>.
- [2] Хвесюк В.И., Чирков А.Ю. Производство энергии в амбиполярных реакторах с D–T, D–³He и D–D топливными циклами. *Письма в ЖТФ*, 2000, т. 26, № 21, с. 61–66.
- [3] Чирков А.Ю. О скейлингах для времени удержания плазмы в обращенной магнитной конфигурации. *Прикладная физика*, 2007, № 2, с. 31–37.
- [4] Chirkov A.Yu. Low radioactivity fusion reactor based on the spherical tokamak with a strong magnetic field. *Journal of Fusion Energy*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 208–214.
- [5] Feldbacher R. Nuclear reaction cross sections and reactivity parameter library and files. *The Alternate Energy Physics. Program Barnbook DATLIB*, Vienna, IAEA, 1987, 148 p.
- [6] Хвесюк В.И., Чирков А.Ю. Малорадиоактивный D–³He термоядерный топливный цикл с самообеспечением ³He. *Письма в ЖТФ*, 2001, т. 27, № 16, с. 47–53.
- [7] Chirkov A.Yu., Khvesyuk V.I. Low-radioactivity D–³He fusion fuel cycles with ³He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, no. 2, pp. 253–260.
- [8] Сафронов К.В., Вихляев Д.А., Гаврилов Д.С., Горохов С.А., Какшин А.Г., Липин А.В., Лобода Е.А., Пахомов С.Н., Потапов А.В., Савельев А.В., Толстоухов П.А., Флегентов В.А. Генерация быстрых нейтронов в (p,n) и (d,n) реакциях под действием ускоренных лазером частиц. *XLI Межд. (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС*. Звенигород, 2014, 133 с.
- [9] Кондратьев В.Н. Энергетические уровни атомных ядер. *УФН*, 1949, т. 38, № 2, с. 153–221.
- [10] Чирков А.Ю. Энергетическая эффективность альтернативных термоядерных систем с магнитным удержанием плазмы. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2013, т. 4, № 11–12, с. 1050–1059.
- [11] Chirkov A.Yu. Evaluation of the operational parameters for NBI-driven fusion in low-gain tokamak with two-component plasma. *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, no. 11, p. 113027.
- [12] Almagambetov A.N., Chirkov A.Yu. Power and sizes of tokamak fusion neutron sources with NBI-enhanced reaction rate. *Journal of Fusion Energy*, 2016, vol. 35, no. 6, pp. 841–848.
- [13] Светлов А.С., Чирков А.Ю. Исследование тепловой устойчивости термоядерной плазмы. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2015, т. 6, № 9–10, с. 437–441.
- [14] Светлов А.С., Чирков А.Ю. Тепловая устойчивость термоядерной плазмы при различных моделях удержания энергии. *Прикладная физика*, 2016, № 2, с. 25–28.

Веснин Владимир Романович — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — А.Ю. Чирков, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

EFFECT OF LITHIUM ON THE ENERGY BALANCE OF DEUTERIUM PLASMA

V.R. Vesnin

vesninvr@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study analysed the effect of lithium on the energy balance of deuterium plasma featuring a DD reaction. Combustion of the tritium generated creates high-energy neutrons. We investigated whether it is possible to obtain 14 MeV neutrons in deuterium plasma with added lithium. The mixture of lithium and deuterium is a potentially useful source of fast neutrons. Permissible ratio between concentrations of lithium and deuterium is 0.3...0.4 for the plasma temperature of approximately 100 keV.

Keywords

Fusion plasma, deuterium, lithium, fast neutrons, Lawson criterion, neutron yield, energy balance

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Dolganov V.V., Chirkov A.Yu. Features of fusion reactions at accelerated deuterons collisions in plasma. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii], 2016, no. 8. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/arise/teje/1523.html>.
- [2] Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Energy production in ambipolar reactors with D-T, D-³He, and D-D fuel cycles. *Pis'ma v ZhTF*, 2000, vol. 26, no. 21, pp. 61–66. (Eng. version: *Technical Physics Letters*, 2000, vol. 26, no. 11, pp. 964–966).
- [3] Chirkov A.Yu. About scalings for a plasma confinement time in the field reversed configuration. *Prikladnaya fizika*, 2007, no. 2, pp. 31–37.
- [4] Chirkov A.Yu. Low radioactivity fusion reactor based on the spherical tokamak with a strong magnetic field. *Journal of Fusion Energy*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 208–214.
- [5] Feldbacher R. Nuclear reaction cross sections and reactivity parameter library and files. *The Alternate Energy Physics. Program Barnbook DATLIB*. Vienna, IAEA, 1987. 148 p.
- [6] Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. A low-radioactive D-³He thermonuclear fuel cycle with ³He self-supply. *Pis'ma v ZhTF*, 2001, vol. 27, no. 16, pp. 47–53. (Eng. version: *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, no. 8, pp. 686–688).
- [7] Chirkov A.Yu., Khvesyuk V.I. Low-radioactivity D-³He fusion fuel cycles with ³He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, no. 2, pp. 253–260.
- [8] Safronov K.V., Vikhlyayev D.A., Gavrilov D.S., Gorokhov pp.A., Kakshin A.G., Lipin A.V., Loboda E.A., Pakhomov pp.N., Potapov A.V., Savel'yev A.V., Tolstoukhov P.A., Flegentov V.A. Generatsiya bystrykh neytronov v (p,n) i (d,n) reaktsiyakh pod deystviem uskorenykh lazerom chastits [Fast neutrons generation in (p,n) and (d,n) reactions under impact of laser-accelerated particles]. *XLI Mezhd. (Zvenigorodskaya) konferentsiya po fizike plazmy i UTS* [XLI Int. (Zvenigorod) Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion]. Zvenigorod, 2014, 133 p.
- [9] Kondrat'yev V.N. Energy levels of the atomic kernels. *UFN*, 1949, vol. 38, no. 2, pp. 153–221.
- [10] Chirkov A.Yu. Energy efficiency of the alternative thermonuclear system with magnetic plasma containment. *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2013, vol. 4, no. 11–12, pp. 1050–1059.
- [11] Chirkov A.Yu. Evaluation of the operational parameters for NBI-driven fusion in low-gain tokamak with two-component plasma. *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, no. 11, pp. 113027.

- [12] Almagambetov A.N., Chirkov A.Yu. Power and sizes of tokamak fusion neutron sources with NBI-enhanced reaction rate. *Journal of Fusion Energy*, 2016, vol. 35, no. 6, pp. 841–848.
- [13] Svetlov A.S., Chirkov A.Yu. Research on thermal stability of thermonuclear plasma. *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2015, vol. 6, no. 9–10, pp. 437–441.
- [14] Svetlov A.S., Chirkov A.Yu. Fusion plasma thermal stability at different energy confinement scaling laws. *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2016, no. 2, pp. 25–28.

Vesnin V.R. — student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — A.Yu. Chirkov, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.