

04

Оптимальный вариант инициирования реакций D–D синтеза на термоядерных электростанциях

© М.Л. Шматов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: M.Shmatov@mail.ioffe.ru

В окончательной редакции 5 октября 2009 г.

Обсуждаются вопросы, связанные с основными подходами к использованию реакций D–D синтеза для производства электроэнергии. В качестве оптимального варианта рассматривается инициирование микровзрывов со сжатием дейтерия или другого горючего либо тепловым излучением одно или нескольких D–T микровзрывов, либо таким излучением и одним или несколькими драйверами. Данный подход позволит ограничиться созданием драйверов со сравнительно умеренными параметрами, соответствующими инициированию D–T микровзрывов с энерговыделением приблизительно 1 GJ или менее.

Возможность использования реакций D–D синтеза



и



для производства электроэнергии обсуждается в течение ряда лет (см., например, [1–10]). Главное преимущество электростанций, использующих эти реакции, над электростанциями, для которых физически существенна только реакция D–T синтеза $D + T \rightarrow \text{He}^4 + n + 17.58 \text{ MeV}$, будет заключаться в меньшем обороте трития, что желательно с точки зрения безопасности, экологии и экономики [1–9].

Инициирование реакций (1), (2) сложнее инициирования реакции D–T синтеза [1–10].

Для электростанций с магнитным удержанием плазмы использование реакций (1), (2), а также $D + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + p + 18.34 \text{ MeV}$ в обозримом будущем будет, по-видимому, невозможно или, по меньшей мере, нецелесообразно [7].

В книге [6] рассмотрен ряд вопросов, связанных с самым технически простым методом использования реакций (1), (2) для производства электроэнергии. Этот метод основан на инициировании дейтериевых взрывов взрывами деления [6]. Производство электроэнергии с помощью термоядерных взрывов рассматривалось и в других работах [11,12].

Производство электроэнергии с использованием микровзрывов с физически существенными реакциями (1), (2) обсуждается довольно широко [1–5,8–10]. Горючее для таких микровзрывов будет либо чистым дейтерием, либо дейтерий-тритиевой смесью с малой средней атомной долей трития $\langle x_T \rangle$, либо смесью дейтерия с небольшими количествами трития и He^3 (смеси могут быть неоднородными) [1–5,8–10]. Главный вклад в энерговыделение микровзрыва Y будет вноситься горением трития, генерируемого реакцией (1) [1,2,4,5]. Произведение ρr , где ρ и r — характерные плотность и радиус сжатого горючего, должно быть около десяти g/cm^2 или выше, что приводит к сравнительно высоким требованиям на энергию, необходимую для сжатия горючего [1,3,5,9]. В то же время большие значения ρr приведут к передаче заметной части кинетической энергии термоядерных нейтронов горючему [5]. При фиксированной тепловой мощности электростанции увеличение ρr уменьшит воздействие нейтронов на подверженные ему конструкционные элементы вследствие этого эффекта и уменьшения относительного вклада реакции D–T синтеза в Y (см. [5]).

Сжатие горючего с малой или нулевой $\langle x_T \rangle$ лазером или другим драйвером (устройством для инициирования микровзрывов) с очень высокими параметрами (см., например, [3–5,8,9,]) и, как следствие, очень высокой стоимостью является только одним из возможных подходов. Еще один подход состоит в том, что такое горючее сжимается D–T микровзрывом (микровзрывом, для которого физически существенна только реакция D–T синтеза), иницированным драйвером со сравнительно умеренными параметрами, или несколькими D–T микровзрывами [2,10,13–16]. В некоторых случаях будет целесообразно сжатие обсуждаемого горючего „с использованием одного или нескольких D–T микровзрывов“, т.е. как одним или несколькими D–T микровзрывами, так и одним или несколькими драйверами, улучшающими симметрию и временное профилирование сжатия [10,16].

Наиболее простыми и эффективными будут методы, согласно которым все или основное сжатие горючего с малой или нулевой $\langle x_T \rangle$ называется тепловым излучением одного или нескольких D–T ми-

кровоизлияний [2,10,13–16]. При инициировании D–T микровзрыва с непрямым (происходящим под действием рентгеновского излучения) сжатием горючего до 20–25% Y придется на рентгеновское излучение [17,18] (см. также [1,8,14]). Таким образом, D–T микровзрыв с $Y \approx 500–1000$ MJ может создать рентгеновское излучение с энергией $E_x \approx 100–250$ MJ. Температура и характерное время испускания этого излучения будут, во всяком случае при принятии простых мер, соответствовать требованиям, связанным со сжатием горючего [1,15].

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда драйвер инициирует D–T микровзрыв с энерговыделением $Y_1 \approx 1$ GJ, его тепловое излучение с $E_x \approx 250$ MJ удерживается в полости („хольрауме“) стенками с золотым покрытием и служит для сжатия капсулы с горючим с малой $\langle x_T \rangle$, энергия E_c теплового излучения, поглощаемого этой капсулой, равна 20 MJ, на основной стадии сжатия длительностью $t_{main} \approx 10–20$ ns температура излучения T_R приблизительно равна 300 eV (см. также [4,5,15,16,19]). Энергия, необходимая для инициирования D–T микровзрыва, будет, во всяком случае при использовании „быстрого поджига“, т. е. при дополнительном нагреве достаточно большой области сжатого горючего, порядка 1 MJ (см. [8,18,19]), что значительно меньше E_c .

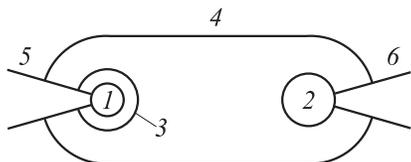
Согласно [19], энергия E_w теплового излучения, поглощаемого золотой стенкой площадью A_w при постоянной T_R за время τ , описывается выражением

$$E_w/A_w [\text{MJ}/\text{cm}^2] \approx 5.2 \cdot 10^{-3} (T_R/100 \text{ eV})^{3.3} (\tau/1 \text{ ns})^{0.62}. \quad (3)$$

Основной частью A_w будет площадь стенки хольраума. Кроме того, в A_w войдут площади дополнительных конструктивных элементов, предназначенных для улучшения симметрии сжатия горючего и других целей [15,16].

Обозначим через E_w^{main} значение E_w , соответствующее основной стадии сжатия. Подстановка в (3) значений $T_R \approx 300$ eV и $\tau = t_{main}$ дает $E_w^{main}/A_w (t_{main} \approx 10 \text{ ns}) \approx 814 \text{ kJ}/\text{cm}^2$, $E_w^{main}/A_w (t_{main} \approx 20 \text{ ns}) \approx 1.25 \text{ MJ}/\text{cm}^2$.

При оценке допустимых размеров хольраума предположим, что $E_c + E_w^{main} \approx 0.7E_x \approx 175$ MJ. Основное отличие $E_c + E_w^{main}$ от E_x будет вызвано испусканием части фотонов после завершения основного облучения капсулы с горючим с малой $\langle x_T \rangle$ и, при использовании одного или



Основные конструкционные элементы одного из вариантов мишени для сценария инициирования микровзрыва со сжатием горючего с малой $\langle x_T \rangle$ тепловым излучением D–Т микровзрыва. 1 — капсула с D–Т горючим; 2 — капсула с горючим с малой $\langle x_T \rangle$; 3 — стенка хольраума, удерживающего тепловое излучение при инициировании D–Т микровзрыва; 4 — стенка хольраума, удерживающего тепловое излучение D–Т микровзрыва; 5, 6 — конуса для нагрева сжатого горючего.

нескольких лазеров для сжатия D–Т горючего и/или улучшения сжатия горючего с малой $\langle x_T \rangle$, утечкой теплового излучения через отверстия в стенках хольраума для подвода лазерного излучения (см. также [15,16]).

Согласно используемой модели, A_w может достигать приблизительно 190 cm^2 при $t_{main} \approx 10 \text{ ns}$ и приблизительно 124 cm^2 при $t_{main} \approx 20 \text{ ns}$, что позволяет создать довольно большие хольраумы. Например, возможны варианты, когда устройство мишени соответствует рисунку, при $t_{main} \approx 10 \text{ ns}$ внутренний радиус цилиндрической части хольраума приблизительно равен 2.3 cm , расстояние между центрами капсул с горючим приблизительно равно 7 cm , а при $t_{main} \approx 20 \text{ ns}$ эти параметры составляют приблизительно 1.8 и 5.5 cm соответственно. В таких хольраумах можно разместить все необходимые конструкционные элементы, а также обеспечить достаточно свободную диффузию теплового излучения, высокую симметрию сжатия горючего с малой $\langle x_T \rangle$ и, по-видимому, его достаточно слабый нагрев нейтронами, хотя для выполнения двух последних условий может потребоваться применение защитного экрана (на рисунке он не показан) или/и другие меры (см. [15,16,19–21]). В частности, внешний радиус хольраума для непрямого сжатия D–Т горючего должен быть около 1 cm [15,20], радиус капсулы с горючим с малой $\langle x_T \rangle$ может быть менее 1 cm . Отметим, что у некоторых материалов (например, сплава 50% золота и 50% гадолиния) поглощение энергии теплового излучения на единицу площади поверхности меньше, чем у золота (см., например, [22]). Это может быть использовано для увеличения размеров хольраума.

В рассматриваемой ситуации энерговыделение Y' микровзрыва горючего с малой $\langle x_T \rangle$ будет, по-видимому, порядка 0.1–1 GJ (см. [5]). Практический интерес представляет реализация даже сравнительно малых значений $Y' \approx 0.5Y_1$, т.е. в данной ситуации $Y' \approx 500$ MJ. Как абсолютное значение Y' , так и отношение Y'/Y_1 можно увеличить при использовании D–T микровзрыва, инициированного драйвером, для инициирования одного или нескольких D–T микровзрывов, используемых в дальнейшем для сжатия горючего с малой $\langle x_T \rangle$ (см. [14]) и, возможно, при цилиндрически-симметричном сжатии горючего с малой $\langle x_T \rangle$ (см. [2,13]).

Таким образом, при анализе достижимых параметров термоядерных электростанций и их потенциальной полезности для отдельных стран и человечества в целом необходимо учитывать возможность сжатия горючего с малой или нулевой $\langle x_T \rangle$ D–T микровзрывами и с их использованием. По-видимому, электростанции, использующие такое сжатие, могут быть созданы в обозримом будущем, например приблизительно через 20 лет с момента начала ширококомасштабных работ по созданию драйверов для инициирования D–T микровзрывов с частотой порядка 0.1–1 Hz (см. также [23,24]). Отметим, что в случае создания значительного количества таких электростанций производство необходимого для их действия трития с использованием реакции $Be^9(n, 2n)2He^4$ будет, по-видимому, невозможно (см. [6], где анализируются проблемы, связанные с использованием в термоядерной энергетике большого количества бериллия).

Автор благодарит Б.В. Литвинова и В.А. Овсянникова за полезные дискуссии и Международное агентство по атомной энергии за частичное финансирование исследований в области использования термоядерных микровзрывов для получения электроэнергии в рамках исследовательского контракта МАГАТЭ № RUS 13722.

Список литературы

- [1] Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М.: Энергоатомиздат, 1984. 304 с.
- [2] Winterberg F. // J. Fusion Energy. 1982. V. 2. P. 377–382.
- [3] Miley G.H. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1989. V. 278. P. 281–287.
- [4] Tabak M. // Nucl. Fusion. 1996. V. 36. P. 147–157.

- [5] *Atzeni S., Chiampì M.L.* // Nucl. Fusion. 1997. V. 37. P. 1665–1677.
- [6] *Иванов Г.А., Волошин Н.П., Ганеев А.С.* и др. Взрывная дейтериевая энергетика. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2004. 287 с.
- [7] *Stott P.E.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. 1305–1338.
- [8] *Баско М.М., Гуськов С.Ю., Диденко А.Н.* и др. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики / Под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит, 2005. 264 с.
- [9] *Logan B.G., Bangerter R.O., Callahan D.A.* et al. // Fusion Sci. Technol. 2006. V. 49. P. 399–411.
- [10] *Shmatov M.L.* // JBIS. 2007. V. 60. P. 180–187.
- [11] *Велихов Е.П., Голубев В.С., Чернуха В.В.* // Атомная энергия. 1974. Т. 36. В. 4. С. 258–260.
- [12] *Logan B.G.* // Fusion Eng. Des. 1993. V. 22. P. 151–192.
- [13] *Winterberg F.* // JBIS. 1979. V. 32. P. 403–409.
- [14] *Феоктистов Л.П.* // УФН. 1998. Т. 160. С. 1247–1255.
- [15] *Shmatov M.L.* // JBIS. 2000. V. 53. N 1/2. P. 62–72.
- [16] *Shmatov M.L.* // JBIS. 2004. V. 57. N 11/12. P. 362–378.
- [17] *von Möllendorff U.* // Report GSI-98-06 (The HIDIF Study). 1998. P. 177–183.
- [18] *Meier W.R., Hogan W.J.* // Fusion Sci. Technol. 2006. V. 49. P. 532–541 (corrigenda: 2007. V. 52. P. 118).
- [19] *Lindl J.* // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. N 11. P. 3933–4024.
- [20] *Tahir N.A., Lutz K.-J., Geb O.* et al. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. N 3. P. 796–816.
- [21] *Косарев И.Б., Немчинов И.В., Родионов В.Н.* // ДАН. 1972. Т. 296. С. 572–575.
- [22] *Callahan-Miller D.A., Tabak M.* // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 2083–2091.
- [23] *Orth C.D.* // UCRL-TR-110500. 2003.
- [24] *Heller A.* // Sci. Technol. Review. 2009 (April/May). P. 6–15.