

Выход термоядерной реакции из цилиндрической замагниченной мишени

© С.В. Рыжков, А.Ю. Чирков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проанализирована возможность применения магнитно-инерциального термоядерного синтеза для создания нейтронного источника. Рассмотрена конфигурация мишени в виде пробкотрона — аксиально-симметричной открытой ловушки с магнитными «пробками».

Ключевые слова: магнитно-инерциальный термоядерный синтез, нейтронный источник, пробкотрон, газодинамическая ловушка, замагниченная плазма.

Настоящая работа посвящена анализу возможного применения магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) для создания нейтронного источника. Подход МИТС предполагает нагрев замагниченного плазменного образования до термоядерных температур посредством сжатия. В результате сжатия достигаются не только высокие температуры (≈ 10 кэВ), но и высокие плотности ($\approx 10^{27}$ м⁻³). При этом требуемое время удержания плазмы соответствует времени инерционного разлета. В табл. 1 и 2 даны характеристики лазерных установок и Z-пинчей, которые могут быть использованы в качестве драйверов.

Высокому коэффициенту усиления мощности соответствуют лазеры, ионные пучки (в качестве драйверов), например установки OMEGA EP, Z-Beamlet laser. Для типичных сценариев МИТС необходимы магнитные поля порядка 10 000 Тл, которые реализуются в результате сжатия начального магнитного потока. Зажигание в этом случае возможно при низкой скорости имплозии за счет замагниченности мишени.

Средний и низкий коэффициенты усиления мощности обеспечивают плазменные струи и различные лайнеры (установки Shiva Star-FRX-L, STIX, Тор-Лайнер). Коэффициент усиления для экономически обоснованного производства энергии может быть гораздо ниже, чем для лазерного драйвера инерциального термоядерного синтеза. Сюда также относятся твердые и жидкие оболочки (лайнеры), некриогенные газовые мишени и высокоэффективные дешевые драйверы, например действующие ускоритель HyperV Plasma Jet и установка Plasma Liner physics exploratory eXperiment (PLX).

Таблица 1

Лазерные установки и генераторы высоких плотностей энергии

Характеристика	УФЛ-2М (РФЯЦ- ВНИИЭФ)	NIF (LLNL, Ли- вермор),	LMJ (CESTA, Бордо)	Gekko (ILE, Осака)	OMEGA (Университет Рочестера)	«Искра-5» (ВНИИЭФ, Саров)	LFEX (ILE, Осака)
Параметры энерго- вклада	4,6 МДж	3,6 эВ на ча- стицу	3,6 эВ на час- тицу	10^{15} Вт	1 ПВт (1 кДж за 1 пс)	10^{15} Вт (100 фс, 100 кДж)	5 ПВт (2 пс)
Длительность им- пульса	–	1...20 нс	9 нс	0,5...1 пс	1...100 пс	3...4 нс	1...20 пс
Размер пятна (дли- на волны)	1 053 нм	0,3 мм	0,35 мкм	20 мкм (1,05 мкм)	1 053 нм	– (0,35 мкм)	20...30 мкм
Энергия в импуль- се	2,8 МДж	1,8 МДж	2 МДж	500 Дж (пучок)	2,5...60 кДж	600 кДж	10 кДж
Интенсивность	527 нм (облучение мишени)	$2 \cdot 10^{15}$ Вт/см ² (непрямое сжатие)	10^{15} Вт/см ² (непрямое сжатие)	10^{20} Вт/см ²	$2 \cdot 10^{20}$ Вт/см ² (прямое сжа- тие)	10^{18} ... 10^{21} Вт/см ²	10 ПВт

Таблица 2

Установки Z-пинч для использования в качестве драйверов

Характеристика	«Байкал» (ТРИНИТИ, Троицк)	Z Machine (Sandia National Laboratory)	C-300 (НИЦ «Курчатовский институт»)	«Ангара 5-1» (ТРИНИТИ, Троицк)
Параметры энерго- вклада	50 МА	20 МА 50...250 эВ	5...10 МА/см 100 эВ	1 МА/см 100 эВ
Длительность импульса	150 нс	100 нс 5...15 нс	100 нс 12 нс	90 нс 6 нс
Размер пятна	– (индуктивно 900 МДж)	– 1 мм (цилиндр)	– 2 мм	– 2 мм
Энергия в импульсе	50 МДж (к лайнеру)	16 МДж 1,8 МДж	300 кДж 50 кДж	600 кДж 120 кДж
Интенсивность	4...6 МВ, 3 МА, 100 нс	– 10 ¹⁴ Вт/см ²	– 2·10 ¹² Вт/см ²	– 3·10 ¹² Вт/см ²
Примечание. В числителе и знаменателе приведены значения генерации тока и рентгеновского излучения соответственно.				

Рассматривается конфигурация мишени в виде аксиально-симметричной открытой ловушки с магнитными «пробками» — так называемого пробкотрона. С технической точки зрения значительное преимущество пробкотрона заключается в его простоте. Кроме того, аксиальная симметрия снимает проблему неоклассического переноса. Для стационарных и квазистационарных открытых систем существенными являются проблемы стабилизации характерных магнитогидродинамических и кинетических неустойчивостей. Импульсный характер магнитно-инерциальных режимов снимает эти проблемы. За характерные для МИТС времена удержания магнитогидродинамические неустойчивости не успевают развиваться. Турбулентный транспорт, вызываемый кинетическими неустойчивостями, имеет существенно более низкую интенсивность по сравнению с потерями вдоль магнитных силовых линий. Таким образом, эффективность удержания частиц и энергии в открытых ловушках определяется классическими продольными потерями, что ограничивает возможности стационарных систем. При временах удержания, характерных для МИТС, роль продольных потерь в энергобалансе плазмы снижается, что связано с высокой плотностью плазмы и соответственно с высокими магнитными полями. В настоящей работе рассматриваются такие режимы, в которых время продольных потерь сопоставимо или превышает время инерционного разлета плазмы.

Термоядерные режимы квазистационарной аксиально-симметричной открытой ловушки, для которых определяющими являются продольные потери, рассматривались в работах [1, 2]. Особенность этих режимов — мощная инжекция быстрых частиц в плазму. Как показало моделирование, режимы с плазменным коэффициентом усиления мощности в плазме $Q_{pl} \approx 1$ (Q_{pl} — отношение термоядерной мощности к поглощенной мощности внешнего нагрева) могут быть реализованы в сравнительно компактной системе. Такая система по размерам сопоставима с существующими экспериментальными установками открытого типа, такими как, например, газодинамическая ловушка (ГДЛ) [3]. Отметим, что мощная инжекция в этих системах способствует формированию положительных потенциальных барьеров на торцах открытой системы, что, в свою очередь, улучшает продольное удержание. Принципиальным отличием рассматриваемых здесь магнитно-инерциальных режимов является высокая плотность плазмы и соответственно высокая плотность энергии. Нагрев плазмы в режиме МИТС также осуществляется принципиально иным способом — за счет сжатия.

Основная цель настоящего исследования — проанализировать, при каких условиях в системе МИТС на основе открытой ловушки могут быть реализованы режимы с $Q_{pl} \approx 1$, что необходимо для

определения направления дальнейшего развития предложенной концепции.

Важное преимущество открытых ловушек по сравнению с классическими токамаками заключается в возможности устойчивого удержания плазмы с высоким отношением β давления плазмы к магнитному давлению. В частности, на ГДЛ реализованы режимы с $\beta \approx 0,5 \dots 0,6$.

Для численного моделирования кинетики быстрых ионов была разработана физическая модель [4, 5], учитывающая угловое рассеяние быстрых частиц, а также их участие в термоядерных реакциях. Для анализа используется модель МИТС с обжатием лазерными пучками и плазменными струями, разработанная в работах [6–11]. Одним из главных показателей эффективности является коэффициент усиления мощности в плазме

$$Q_{pl} = \frac{W_{fus}}{W_{pl} + W_l + W_m},$$

где W_{fus} — энергия, выделяемая в течение импульса в результате термоядерных реакций; W_{pl} — энергия, вложенная в плазму; W_l — энергия, вложенная в сжимающий лайнер; W_m — энергия магнитного поля.

Результаты расчетов даны в табл. 3. Магнитно-инерциальные режимы цилиндрической мишени-пробкотрона представлены в вариантах 1–3. Для сравнения также приведены типичные параметры квазистационарного нейтронного источника (КСНИ) на основе открытой ловушки [1, 2].

Таблица 3

Параметры магнитно-инерциальных режимов цилиндрической мишени-пробкотрона (варианты 1–3) и КСНИ на основе открытой ловушки [1, 2]

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	КСНИ
Радиус плазмы a , см	0,25	0,5	0,25	100
Длина плазмы L , см	10	10	10	1 000
Магнитное поле центрального соленоида B_0 , Тл	3 300	1 500	3 300	1,5
Магнитное поле в пробках B_m , Тл	10 000	15 000	10 000	11
Концентрация топлива $n_D = n_T$, М ⁻³	$1,3 \cdot 10^{27}$	$1,3 \cdot 10^{26}$	$6,4 \cdot 10^{26}$	$2,6 \cdot 10^{19}$
Температура плазмы T , кэВ	5	10	10	10

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	КСНИ
Энергия плазмы W_{pl} , МДж	12*	10*	12*	10,5
Энергия магнитного поля W_m , МДж	12*	10*	12*	–
Энергия лайнера W_l , МДж	32*	27*	32*	–
Термоядерная мощность P_n , МВт	43**	36**	63**	24
Мощность в нейтронах P_n , МВт	34**	29**	50**	24
Плазменный коэффициент усиления Q_{pl}	0,77	0,77	1,1	0,38
Выход нейтронов $N \cdot 10^{-18}$, нейтр./с	15**	13**	22**	11
<p>* В импульсе. ** Среднее значение при частоте следования импульсов 1 Гц.</p>				

Как можно видеть, плазменный коэффициент усиления мощности $Q_{pl} \approx 1$ в режимах МИТС превышает типичные значения для аналогичной квазистационарной системы с магнитным удержанием. Это связано с достижением высокой плотности плазмы в результате ее импульсного сжатия. Источник термоядерных нейтронов с $Q_{pl} \approx 1$ выглядит привлекательно в качестве драйвера гибридного термоядерно-ядерного реактора, а относительная простота рассмотренной конфигурации мишени и умеренные требования к параметрам (относительно типичных инерционных схем) открывают определенные перспективы развития данного направления.

Данное исследование выполнено в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», мероприятие 1.6, госконтракт № 14.516.11.0083.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., Anikeev A.V. Plasma Kinetics Models for Fusion Systems Based on the Axially-Symmetric Mirror Devices. *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 59, no. 1T, pp. 39–42.
- [2] Чирков А.Ю., Рыжков С.В., Багрянский П.А., Анিকেев А.В. Термоядерные режимы аксиально-симметричной открытой ловушки с мощной инжекцией быстрых частиц. *Прикладная физика*, 2011, № 5, с. 57–63.
- [3] Bagryansky P.A., et al. Gas Dynamic Trap as High Power 14. MeV Neutron Source. *Fusion Engineering and Design*, 2004, vol. 70, pp. 13–33.

- [4] Чирков А.Ю., Хвесьюк В.И. К расчету функций распределения высокоэнергетических ионов по скоростям. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 2003, вып. 1, с. 55–65.
- [5] Чирков А.Ю. Численное решение уравнения Фоккера–Планка для моделирования модифицированных газодинамических режимов плазмы в магнитной ловушке с нагревом интенсивными атомарными пучками. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2011, т. 11. URL: <http://chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-029.pdf>.
- [6] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Developing the Numerical Model for Studying Laser-Compression of Magnetized Plasmas. *Acta Technica*, 2011, vol. 56, pp. 454–467.
- [7] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. The Plasma Jet/Laser Driven Compression of Compact Plasmoids to Fusion Conditions. *J. of Fusion Energy*, 2012, vol. 31, pp. 7–12.
- [8] Ryzhkov S.V. The Behavior of a Magnetized Plasma under the Action of Laser with High Pulse Energy. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Electronics and New Methods of Acceleration*, 2010, no. 4 (7), pp. 105–110.
- [9] Костюков И.Ю., Рыжков С.В. Магнитно-инерциальный термоядерный синтез с лазерным обжатием замагниченной сферической мишени. *Прикладная физика*, 2011, № 1, с. 65–72.
- [10] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical Modeling of Magnetized Plasma Compressed by the Laser Beams and Plasma Jets. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Physics*, 2013, no. 1 (83), pp. 12–14.
- [11] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu., Ivanov A.A. Analysis of the Compression and Heating of Magnetized Plasma Targets for Magneto-Inertial Fusion. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63, no. 1T, pp. 135–138.

Статья поступила в редакцию 21.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Выход термоядерной реакции из цилиндрической замагниченной мишени. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/720.html>

Рыжков Сергей Витальевич родился в 1974 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1997 г. и аспирантуру МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2001 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика», ученый секретарь Ученого совета Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение», координатор платформы сотрудничества столичных технических университетов Центральной и Восточной Европы (СЕЕМУТ). Лауреат премии РАО «ЕЭС России» и Российской академии наук «Новая генерация» в области энергетики и смежных наук, лауреат премии и медали РАН для молодых ученых в области физико-технических проблем энергетики. Специалист в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Автор более 100 научных работ в области теплофизики, физики плазмы, радиационной газовой динамики и ядерной энергетики. e-mail: ryzhkov@power.bmstu.ru

Чирков Алексей Юрьевич родился в 1976 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии РАО «ЕЭС России» и Российской академии наук «Новая генерация» в области энергетики и смежных наук, лауреат премии и медали РАН для молодых ученых в области физико-технических проблем энергетики. Специалист в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Автор более 100 публикаций в области физики плазмы. e-mail: alexreich@mail.ru