

Обращенная магнитная конфигурация и приложения высокотемпературной плазмы FRC

С. В. Рыжков

Магнитная ловушка для удержания плазмы с обращенным полем или обращенная магнитная конфигурация (FRC) — одна из наиболее перспективных альтернативных по отношению к токамаку, систем с высоким β . Предложен краткий обзор по последним данным FRC и возможным направлениям использования таких конфигураций помимо получения энергии в термоядерных реакторах (ТЯР).

PACS: 52.25.Xz; 52.55.Lf

Ключевые слова: магнитная ловушка, плазма, обращенное поле, обзор.

Развитие управляемого термоядерного синтеза (УТС) требует продвижения по трем направлениям: 1 — наука, 2 — технологии и 3 — экономика и внедрение.

Рыжков Сергей Витальевич, доцент.
Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана.
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.
Тел. (499) 263-65-70
E-mail: ryzhkov@power.bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 10 июля 2009 г.

© Рыжков С. В., 2010

Значительный прогресс был достигнут в физике токамака. Однако между сегодняшними токамаками и термоядерными реакторами (ТЯР) огромная пропасть. Более того, проектируемые ТЯР на основе токамаков непривлекательны из-за больших размеров, сложности и нерешенных технологических проблем. В данной ситуации возможны два пути: первый — улучшение концепции токамака, и одним из вариантов движения в этом направлении может стать сферический токамак, хотя об его аспектах термоядерного реактора тоже

немного известно; второй, наиболее радикальный путь — отход от токамака, т. е. от доминирующей в проблеме УТС концепции токамака-реактора. Обращенная магнитная конфигурация (FRC — field reversed configuration) предлагает такой подход и представляет собой одну из альтернативных (по отношению к токамаку) систем.

Для ясности заметим, что первоисточником всех компактных магнитных систем считается установка Astron [1], которая, по сути, была кольцом релятивистских электронов внутри магнитной зеркальной ловушки. Более того, в ней так и не достигли обращения поля, т. е. на самом деле — это линейная машина, больше похожая на пинч с обращенным полем (RFP — reversed field pinch), чем на FRC.

За рубежом часто ссылаются на литературу [2] как на первую работу по FRC, но в ней также нет ни одного упоминания обращения поля. Фактически эксперименты с FRC (как отдельно выделенного направления) начались после того, как Р. К. Линфорд (R. K. Linford) побывал в СССР и увидел эксперимент Р. Х. Куртмуллаева на пинче с обращенным полем [3], после чего запустил FRC — программу в Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ) [4].

В отечественной литературе для структуры с чисто полоидальным магнитным полем используется термин “компактный тор” (КТ) [5] или “компактный тороид” [6], при этом система, имеющая существенное тороидальное поле, называется “комбинированным компактным тором” [5] или “сферомак” [7, 8]. Ранее использовалось также понятие “компактный тороидальный шнур” [9]. В зарубежной литературе к компактным торам относят сферический токамак, FRC и сферомак [10]. Чтобы не вводить читателей в заблуждение, автор далее будет использовать англоязычный термин FRC [11—13].

В основе рассматриваемой схемы FRC лежит удержание плазмы в равновесии [9] в замкнутом поле, которая отделена от проводящей стенки областью разомкнутого магнитного потока. Поверхность, разделяющая закрытые и открытые силовые линии магнитного поля, называется сепаратрисой. Внутреннее замкнутое поле поддерживается токами в плазме, внешнее же связано с токами в катушке. Внутреннее магнитное поле содержит две компоненты — полоидальную B_p и тороидальную B_θ . Соотношение этих компонент определяет свойства конфигурации в отношении магнитогидродинамической (МГД) устойчивости. Для FRC характерно $B_\theta \approx 0$, хотя в некоторых экспериментах наблюдалось сильное тороидальное магнитное поле [14].

На рис. 1 представлена сформированная плазменная конфигурация с обращенным полем в камере сгорания. Крестиками и точками показано направление азимутального тока. Простейшая сферическая модель носит название “вихрь Хилла” (Hills vortex) [15]. FRC называют иногда компактной тороидальной конфигурацией [3], так как она имеет тороидальную топологию (закрытые магнитные силовые линии), но при этом и открытые силовые линии. В FRC так же, как и в токамаке, по плазме течет огромный ток, но он не создает удерживающее полоидальное магнитное поле (как в токамаке). Полоидальное поле формируется в FRC с помощью внешних катушек, азимутальный ток является следствием обращения магнитного поля.

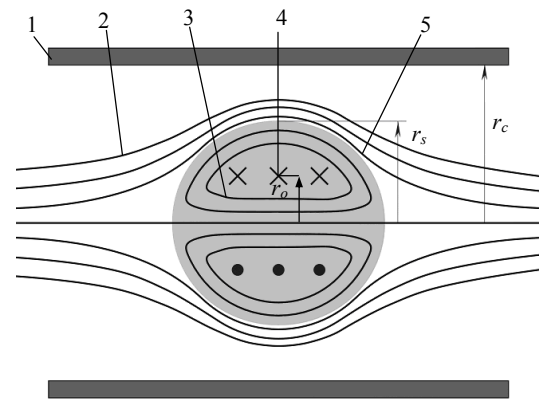


Рис. 1. Магнитная конфигурация FRC—обращенная магнитная конфигурация — в полоидальном поле: 1 — вакуумная камера/ катушка; 2 — открытые силовые линии магнитного поля; 3 — закрытые силовые линии; 4 — нейтральный слой; 5 — сепаратриса

Магнитное поле в FRC определяется как

$$B_0(r) = B_e \cdot \sqrt{1 - \beta(r)},$$

где B_0 — поле в медианной плоскости на оси;

B_e — внешнее магнитное поле, которое не равно полю в катушке $B_e \neq B_c$ (значение магнитного поля на границе плазмы, там, где $p = 0$);

β — отношение внутреннего магнитного поля к внешнему полю, равно

$$\beta(r) = p(r)/(B_e^2/2\mu_0), \quad (1)$$

где p — давление;

$\mu_0 = 4\pi(10^{-7}) = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Высокое значение (в чисто полоидальном FRC на магнитной оси $\beta \sim 1$ — это предельная величина для систем с магнитным удержанием. Кроме β

из уравнения (1) важным параметром является также бета Барнса [16]

$$\langle \beta_B \rangle = 1 - x_s^2 / 2, \quad (2)$$

где x_s — отношение радиуса сепаратрисы r_s к радиусу магнитной катушки r_c .

Допустимое давление плазмы рассчитывается как продукт внешнего магнитного давления и β_B . Уравнение (2) называют наиболее полезным в физике FRC [11].

Автор сознательно упускает принцип работы системы на основе FRC и отсылает заинтересованных к ранним обзорам и статьям [5, 11, 13]. FRC выглядит привлекательной основой для термоядерного реактора [5, 17], так как в ней могут быть независимо реализованы принципы удержания в замкнутых системах и открытых ловушках. Цилиндрическая форма камеры и геометрия упрощают магнитную систему, конструкцию камеры, blankets и многие другие инженерные проблемы, являющиеся критическими для современных тороидальных систем, что ведет к минимальным затратам и возможности демонстрационного эксперимента.

Высокое энергосодержание плазмы, вытекающее из больших значений β , делает FRC первым кандидатом для термоядерных топлив, отличных от дейтерия-трития (D-T), так называемых малорадиоактивных термоядерных топлив, таких как D—³He, p—¹¹B, ³He—³He.

Такая компактная система может быть использована в качестве источника энергии [17—23], генератора частиц, термоядерного двигателя [24, 25], инжектируемого плазмоида [26], а также для синтеза замагниченной мишени (MTF) [27], систем высокой плотности ($\sim 10^{23}$ м⁻³), решения астрофизических [28] и технологических [29] задач.

FRC может иметь сферическую (сжатую), эллипсоидную (вытянутую) и рейстректовую (от англ. racetrack — стадион) формы.

FRC зародилась как многообещающая концепция магнитного удержания в 1970-е годы и в настоящее время исследуется на установках в России, США, Японии и других странах (таблица).

На данный момент на разных установках и в разных экспериментах FRC достигнуты следующие рекордные параметры [2, 30—47]:

- плотность электронов $n_e \sim 0,05—5 \cdot 10^{21}$ м⁻³;
- средняя бета $\langle \beta \rangle \sim 90—95$ %;
- температура ионов $T_i \sim 0,03—3$ кэВ;
- температура электронов $T_e \sim 0,02—0,5$ кэВ;
- полная температура $T_i + T_e \sim 0,03—3$ кэВ;
- энергетическое время удержания плазмы $\tau_E \sim 0,01—1$ мс;
- внешнее магнитное поле (поле в катушке) $B_c \sim 0,05—2$ Тл;
- длина сепаратрисы $l_s \sim 0,2—2$ м;
- радиус сепаратрисы $r_s \sim 0,01—0,4$ м.

Общие сведения о действующих установках типа FRC

Название установки	Местонахождение	Основные направления исследований
Boulder/ Colorado FRC	Университет Колорадо, Болдер	Исследование плазменной турбулентности, изучение явлений переноса частиц и энергии в удерживаемой плазме
CBFR Tri alpha	Калифорнийский университет, Ирвайн	Эксперимент на встречных пучках, безнейтронная реакция p— ¹¹ B
FIREX	Университет Корнелл, Итака	Изучение проблем равновесия
FIX NUCTE-3	Университет Осака, университет Нихон	Формирование FRC на основе θ -пинча, источник нейтронов
FRX-L, FRCHX Shiva-FRC	LANL, Лос-Аламос AFRL, Киртленд	Синтез замагниченной мишени (MTF), высокие плотность и температура
KT, TOP, TOP-Лайнер	ТРИНИТИ, Троицк	Исследование нагрева, сжатия и перевода компактного тора
ОМАК	ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН, Москва	Формирование конфигурации, обращение магнитного поля
Princeton FRC, MRX, SPIRIT	PPPL, Принстон	Исследование процессов перезамыкания магнитных силовых линий, устойчивости
ROTAMAK	Университет Флиндерс, Австралия	Поддержание тока вращающимся магнитным полем (RMF), изучение сферических конфигураций
SSX	Свартмор, Пенсильвания	Формирование FRC слиянием сферомаков
TCSU, STX, TRAP, PHDX, IPA	Вашингтонский университет, Сизтл, Рэдмондская плазмофизическая лаборатория	Исследование вращающегося магнитного поля, ускорения FRC для подпитки токамаков, получение высокой плотности плазмы
TS-3, 4	Токийский университет	Слияние тороидальных конфигураций

Стационарный режим работы магнитно-удерживаемой плазмы — один из стимулов следующего десятилетия, если не главная задача исследований по направлению к новым источникам энергии. Достижение такой цели требует нахождения самоподдерживающихся плазменных режимов в термоядерных магнитных устройствах. И здесь многое зависит от методов генерации плазмы и дальнейшего поддержания конфигурации.

Для того чтобы построить стационарную систему на основе FRC, необходимо разработать метод формирования магнитного потока и поддержания тока. За последнее время были отработаны три основных способа получения обращенной магнитной конфигурации: на основе θ -пинча [5, 11, 48], слияние сфермаков [49—51], метод вращающегося магнитного поля (RMF) [52—54] и другие способы [55].

Так как традиционно FRC формировались в установках θ -пинча, то их чаще всего показывают горизонтально в отличие от других тороидальных систем (рис. 2). Стадии формирования обращенной магнитной конфигурации включают:

предварительную ионизацию рабочего газа и захват начального магнитного потока;

обращение внешнего магнитного поля и пересоединение встречных потоков на торцах;

продольное ударное сжатие и нагрев;

переход к равновесию;

установление равновесия плазмы в магнитном поле тока.

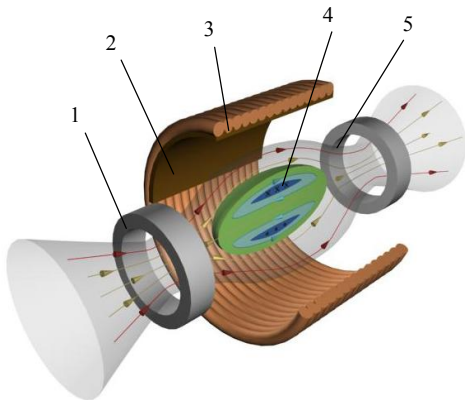


Рис. 2. Плазма в замкнутых магнитных силовых линиях системы FRC с центральным соленоидом и запирающими пробками:

1 и 5 — магнитные катушки на торцах установки, выполняющие функции пробок (по аналогии с амбиполярной ловушкой); 2 — вакуумная камера; 3 — соленоид; 4 — плазма, поддерживаемая азимутальным током, внутри сепаратрисы

Низкое значение потока и высокая плотность на сепаратрисе при низких x_s нежелательны для хорошего удержания, так как внутренний профиль должен сшиваться с внешним (открытые силовые

линии), то очень большое значение $\langle\beta\rangle$ делает трудным хорошее удержание частиц при низких значениях x_s .

Наиболее часто для описания устойчивости FRC используется параметр s — среднее число гирорадиусов между нейтральным слоем и сепаратрисой

$$s \equiv \int_{r_0}^{r_s} \frac{r}{r_s} \frac{dr}{\rho_i}, \quad (3)$$

где r_0 — радиус нейтрального слоя (так называемый радиус О-точки);

ρ_i — локальный ионный гирорадиус.

Радиус О-точки представляет собой большой радиус тора (по аналогии с токамаком), а малый радиус — это радиальный размер плазменного шнура от нейтрального слоя до сепаратрисы; r_0 связан с радиусом сепаратрисы через выражение $r_s = R_0\sqrt{2}$.

Для устойчивого режима работы термоядерные электростанции будут требовать $s > 20$ [11], в то время как экспериментальные установки до сих пор оперировали с $s \leq 8$ [11, 56]. Из-за наблюдаемой стабильности конфигурации в экспериментах и не до конца ясной картины самоорганизации FRC в данной работе s не обсуждается детально.

В работах [57, 58] по теме режимов устойчивости FRC вместо s из уравнения (3) было использовано отношение

$$S^*/E,$$

где $E = l_s/r_s$ — вытянутость FRC-конфигурации; l_s — длина сепаратрисы; S^* определяется как

$$S^* = r_s/c \cdot \omega_{pi},$$

где c — скорость света;

ω_{pi} — ионная плазменная частота.

Зависимость безразмерного параметра S^* от вытянутости FRC представлена на рис. 3 (основа взята из работы [57]).

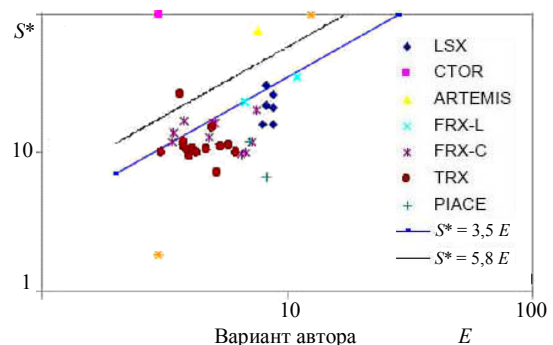


Рис. 3. Режимы работы экспериментальных FRC и концептуальных проектов D—³He FRC-реактора. Параметр S^* в зависимости от вытянутости конфигурации E

До недавнего времени формирование FRC в экспериментах было основано на θ -пинче [5, 11, 30, 59], и этот факт делает возможным с полным доверием проводить экстраполяцию результатов на будущие эксперименты, особенно на горячей плазме. Например, большие значения s достижимы только в θ -пинче с высокой плотностью и низкой температурой.

Таким образом, плазма в FRC с большими s относительно столкновительная. Это означает, что кинетический параметр s жестко привязан к столкновительному параметру в зависимости от метода формирования FRC.

В данной работе выбран наиболее простой, но более эффективный метод поддержания тока горячей плазмы — прямая подача электронов с использованием вращающегося магнитного поля (RMF — rotating magnetic field). Этот метод был продемонстрирован в экспериментах малого масштаба [60, 61]. Нагрев ионов и формирование бесстолкновительной плазмы получены в эксперименте [62]. Плазма FRC обладает высоким уровнем самоорганизации (может быть образована слиянием сферомаков противоположной спиральности [51]), что частично объясняет ее устойчивость [17]. Различные параметры для FRC-плазмы, сформированной RMF и на основе θ -пинча, даны в работе [61].

Главное преимущество RMF в том, что, как и профилирование плазмы, ионные пучки RMF необходимы для устойчивости. Высокотемпературная стационарная FRC может генерироваться, используя вращающееся поле и скейлинговые зависимости, разработанные для достижимых параметров RMF, поддерживающих потоки конфигурации [63].

Для определения равновесной конфигурации проблемой является нахождение решения уравнения Грэда—Шафранова для цилиндрического потока вне сепаратрисы FRC. Особенно тяжело найти решения для вытянутого FRC или рейстректовой конфигурации, в отличие от эллиптического профиля равновесия (рис. 4), так как моделирует ситуацию, типичную для реакторных режимов и FRC с меньшей вытянутостью.

Дело в том, что на практике большинство экспериментов имеют рейстректовую форму сепаратрисы.

С точки зрения энергетической эффективности термоядерного реактора наибольший интерес представляют производство энергии и плазменный коэффициент усиления мощности Q , который равен отношению мощности, выделившейся в результате реакций синтеза, к дополнительной мощности, инжектируемой в плазму для поддержания заданной температуры горячего.

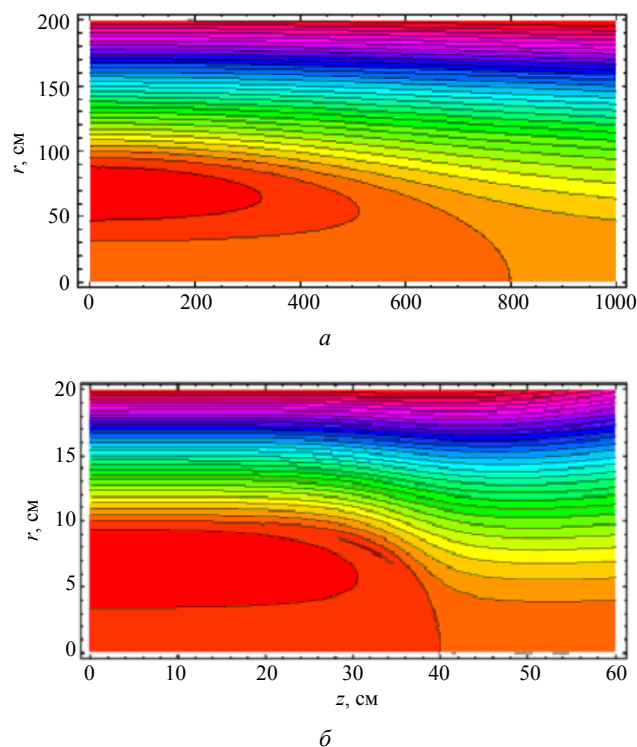


Рис. 4. Функции магнитного потока: а — эллипсоид, $B_c = 10$ Тл, $l_s = 8$ м, $r_s = 1$ м; б — рейстректовая модель (стадион), $B_c = 1$ Тл, $l_s = 0,4$ м, $r_s = 0,1$ м

Для создания радиационно безопасных термоядерных установок с самоподдерживающейся реакцией горения необходимо выполнение условия $Q > 10$.

FRC, использующее малорадиоактивное (по отношению к D-T) топливо, имеет низкий нейтронный выход и высокую плотность энергии. Из-за небольшой нейтронной нагрузки отходы будут иметь низкую радиоактивность и, следовательно, меньшую стоимость установки. Оптимальный размер реактора на основе FRC лишь немногим больше толщины blankets, защиты и катушки вместе взятых (рис. 5). Цилиндрическая форма камеры и односвязность плазменного тела сильно упрощают магнитную систему, конструкцию камеры и многие другие инженерные проблемы, являющиеся критическими для современных тороидальных систем.

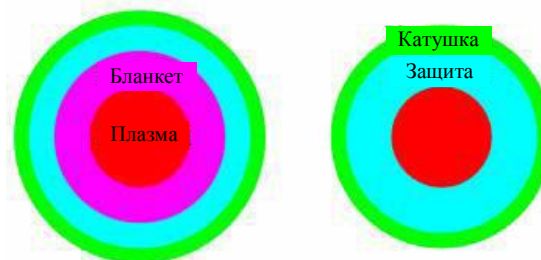


Рис. 5. Цилиндрическая геометрия FRC для традиционно-го и малорадиоактивного топлива: сравнение дизайна для D-T (слева) и D-³He (справа) реакций

Цилиндрическая геометрия предоставляет возможность транспортировки КТ вдоль оси и перемещения его в специальную камеру горения, удаленную от наиболее уязвимой в радиационном отношении зоны формирования. Это также упрощает конструкцию blankets.

Сравнение поперечного сечения D—T-реактора с D—³He-системой приводит к выводу, что при прочих равных условиях радиус плазмы для D—³He-реактора будет меньше, чем для D—T. А это в свою очередь обеспечивает нераспространение оружия массового уничтожения [64], т. е. невозможность наработки радиоактивных изотопов в корпусе установки, рассчитанной на D—³He-смесь.

На рис. 6 показан заимствованный из работы [65] реактор на основе FRC с использованием жидкого лития (пристеночная откачка). Вопросы технологии не входят в данный обзор, но отметим, что использование жидкого лития в качестве материала первой стенки промышленной электростанции приводит к минимальному значению коэффициента рециклинга [66], и структура стенки за жидкостью толщиной семь длин свободного пробега нейтрона может выдержать в течение 30 лет при нагрузке 30 МВт/м² и более [67].



Рис. 6. Реактор на основе FRC — схема с жидким литием в качестве материала первой стенки для пристеночной откачки и наработки трития

Магнитно-инерциальный синтез (МИС) или синтез замагниченной мишени (МТФ) [68—70] — относительно новый подход для производства энергии, который объединяет особенности и преимущества хорошо изученных магнитного термоядерного синтеза (МТС) и инерциального термоядерного синтеза (ИТС).

Подобно МТС термоядерное топливо удерживается магнитным полем при низкой плотности, и подобно ИТС синтез инициируется очень быстрым сжатием мишени для того, чтобы существенно увеличить плотность топлива и, таким образом, его температуру. И хотя конечная плотность намного меньше плотности традиционных инерциальных систем, комбинация больших времен удержания и лучшего сохранения теплоты обеспечивают МТФ-эффективность того же порядка, но большим преимуществом является простота изготовления и строительства.

Вопросы сжатия лайнера наиболее подробно освещены в работе [71]. На рис. 7 приведена схема равномерного обжатия мишени плазменным лайнером — на основе рисунков NASA MSFC. Мишень формируется слиянием двух плазменных колец FRC, несущих магнитное поле. Плазменные пушки запускают струи со скоростью $\sim 10^5$ м/с, при этом плазменные струи сжимают мишень практически адиабатично до радиуса менее 0,01 м. Плотность плазмы возрастает в ~ 1000 раз, температура растет в ~ 100 раз, и происходит термоядерная реакция.

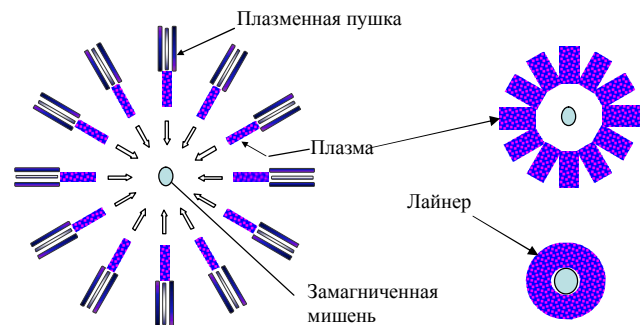


Рис. 7. Сферическая замагниченная плазма FRC (мишень) и лайнер (ударник) того же состава, что и основное топливо, при обжатии плазменными пушками — модель магнитно-инерциального подхода

В последнее время были рассмотрены разные концепции, в том числе жидкий лайнер для медленного сжатия, газовый (ксенон, аргон) с плазменным поршнем (водород) и плазменные лайнеры (D—T, D—³He) для быстрого сжатия мишени.

Лайнерная компрессия замагниченной плазмы изучается наиболее активно, но лазеры или пучки заряженных частиц также могут рассматриваться в качестве метода создания и поддержания тока в заранее сформированной плазменной мишени для формирования начального магнитного поля. Идея использования FRC заключается в бесконтактном введении плазмы слиянием компактных тороидов, выпущенных из периферии вакуумной камеры. Кроме того, предлагается и мишень, и лайнер создавать из плазмы одного состава.

Заключение

Работа посвящена решению фундаментальной проблемы ИТС (термоядерный реактор) и прикладным исследованиям высокотемпературной плазмы FRC (обсуждаются варианты применения системы и горячей плазмы с высоким β). Представлены экспериментальные установки FRC, рассмотрены их назначение и основные параметры. Плазма FRC удерживается исключительно поперечным магнитным полем в цилиндрической геометрии, что приводит к меньшим размерам

устройств, а комбинирование с малорадиоактивным топливом может быть использовано для различных приложений (генератор протонов, производство изотопов, астрофизические процессы, магнитно-инерциальный синтез) [72—77].

Системы FRC по сравнению с токамаками и стеллараторами не имеют значительного объема физических и технических данных, но многие эксперименты [32, 47] позволяют делать надежные экстраполяции по прогнозируемым физическим и техническим параметрам термоядерного реактора.

В условиях скудного финансирования установки FRC необходимо проведение физико-технического анализа результатов экспериментов действующих FRC-систем с целью проверки теории и постановки реальных физико-технических проблем, решение которых позволит продвинуть FRC по физическим и техническим параметрам. И хотя большинство приложений на основе FRC могут быть осуществлены в среднесрочной (подача топлива в виде обращенной магнитной конфигурации, уничтожение ядерных материалов и радиоактивных отходов, динамика плазмы в солнечной короне и) и даже долгосрочной перспективе (реакторы, подпитка топливом токамака, термоядерные ракетные двигатели), решения многих задач и прототипы устройств могут быть получены в ближайшем будущем.

Работа выполнена при поддержке гранта
Президента РФ № МК-676.2008.8 и гранта
РФФИ № 09-08-00137-а.

Литература

1. *Christofilos N. S.*// Proceedings of the Second United Nation International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy (United Nations, Geneva, Switzerland). 1958. V. 32. P. 279.
2. *Kolb A. C., Dobbie C. B., Griem H. R.*// Phys. Rev. Lett. 1959. V. 3. No. 1. P. 5.
3. *Еськов А. Г. и др.*// Труды 7-й Европ. конф. по УТС и физике плазмы. 1975. № 1. С. 55.
4. *Armstrong W. T., Linford R. K., Lipson J. et al.*// Phys. Fluids. 1981. V. 24 (11). P. 2068.
5. *Куртмуллаев Р. Х., Малютин А. И., Семенов В. Н.*// Итоги науки и техники. Физика плазмы. — М.: ВИНТИ, 1985. Т. 7. С. 80.
6. *Головизнин В. М., Кориунов В. К., Куртмуллаев Р. Х. и др.*: Препринт ИАЭ-3656/7. — М.: ИАЭ, 1982.
7. *Rosenbluth M. N., Bussac M. N.*// Nucl. Fusion. 1979. V. 19. P. 489.
8. *Jarboe T. R.*// Plasma Phys. Control. Fusion. 1994. V. 36. P. 945.
9. *Шафранов В. Д.*// ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 710.
10. *Dolan T. J.*// Fusion Research: Principles, Experiments and Technology. 2000. P. 937.
11. *Tuszewski M.*// Nucl. Fusion. 1988. V. 28. P. 2033.
12. *Steinhauer L. C. et al.*// Fusion Technol. 1996. V. 30. P. 116.
13. *Ryzhkov S. V.*// Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics. 2002. V. 7. No. 4. P. 73.
14. *Steinhauer L., Guo H., Hoffman A. et al.*// Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 056119.
15. *Hill M. J.*// Philos. Trans. R. Soc. Ser. A. 1894. Pt. 1, C/XXXV. P. 213.
16. *Barnes D. C.*// Phys. Plasmas. 2001. V. 8 (11). P. 4856.
17. *Khvesyuk V. I., Ryzhkov S. V., Santarius J. F. et al.*// Fusion Technol. 2001. V. 39. No. 1T. P. 410.
18. *Бурцев В. А., Божокин С. В., Дудникова Г. И. и др.*// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1989. Вып. 1. С. 46.
19. *Kernbichler W.*// Fusion Technol. 1992. V. 21. P. 2297.
20. *Krivoshchev M. V., Litunovsky V. N.* Compact D—³He fueled fusion reactor based on an FRC// Trans. of Fusion Technol. 1995. V. 27. P. 337.
21. *Hoffman A. L.*// Fusion Technol. 1996. V. 30. P. 1367.
22. *Santarius J. F. et al.*// Report UWFD-1129. 2000. <http://fti.neep.wisc.edu/pdf/fdm1129.pdf>.
23. *Schaffer M. J. et al.*// Presented at US-Japan Workshop on Physics of Compact Toroid Plasmas. 2002. <http://www.aa.washington.edu/AERP/RPPL/us-japan-feb-2002/>
24. *Chapman R., Miley G. H., Kernbichler W.*// Fusion Technol. 1989. V. 15. No. 2. Pt. 1. P. 1154—1159.
25. *Nakashima H., Miley G. H., Nakao Y.*// Proc. 11th Symp. Space Nuclear Power and Space Propulsion Systems. 1994.
26. *Ono Y.* TS-3/4 Group. US-Japan Workshop on Physics of Compact Toroid Plasmas. 2002. depts.washington.edu/rppl/presentations/us-japan-feb-2002/ono.pdf.
27. *Alikhanov S. G., Bakhtin V. P., Es'kov A. G.*// 9th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. 1982. V. 3. P. 319.
28. *Hsu S. C., Bellan P. M.*// Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. P. 215002.
29. *Kostyukov I. Yu., Rax J. M.*// Phys. Plasmas. 2000. V. 7. No. 1. P. 185.
30. *Asai T., Suzuki Y., Yoneda T. et al.*// Ibid. No. 6. P. 2294.
31. *Cothran C. D., Falk A., Fefferman A. et al.*// Ibid. 2003. V. 10. No. 5. P. 1748.
32. *Rostoker N., Qerushi A., Binderbauer M.*// J. Fusion Energy. 2004. V. 22. P. 83.
33. *Intrator T. P., Park J. Y., Degnan J. H. et al.*// IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. V. 32 (1). P. 152.
34. *Андерсон М., Биндербауер М., Быстрицкий В. и др.*// Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 10. С. 873.
35. *Gerhardt S. P., Belova E., Inomoto M. et al.*// Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 112508.
36. *Okada S., Masumoto T., Yamamoto S. et al.*// Fusion Science and Technol. 2007. V. 51. No. 2T. P. 193.
37. *Hoffman A. L.* FRCs Course AA559/ University of Washington. 2007. По запросу hoffman@aa.washington.edu.
38. *Cohen S. A., Landsman A. S., Glasser A. H.*// Phys. Plasmas. 2007. No. 14. P. 072508.
39. *Degnan J. H., Amdahl D. J., Brown A. et al.*// IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. V. 36, (1). P. 80.
40. *Miller K. E., Grossnickle J. A., Brooks R. D., et al.*// Fusion Science and Technol. 2008. V. 54. P. 946.
41. *Guo H. Y., Hoffman A. L., Milroy R. D. et al.*// Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 056101.
42. *Guo H., Hoffman A. L., Miller K. E. et al.*// J. Fusion Energy. 2009. V. 28. P. 152.
43. *Wurden G. A., Intrator T. P., Sieck P. E. et al.*// 22nd IAEA Fusion Energy Conference. 2008. P. 4—13.
44. *Intrator T. P., Wurden G. A., Sieck P. E. et al.*// J. Fusion Energy. 2009. V. 28. P. 165.
45. *Woodruff S.*// Ibid. 2008. V. 27. P. 134.
46. *Ryzhkov S. V.*// Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics. 2008. V. 14. No. 6. P. 61.
47. *Steinhauer L. C., Intrator T. P.*// Phys. Plasmas. 2009.

- V. 16. P. 072501.
48. Kalygin A. G., Kreschchuck A. P., Kurtmullaev R. Kh.// Trans. of Fusion Technol. 1995. V. 27. P. 329.
49. Cothran C. D., Falk A., Fefferman A., Landreman M., Brown M. R., Schaffer M. J.// Phys. Plasmas. 2003. V. 10. No. 5. P. 1748.
50. Cothran C. D., Fung J., Brown M. R. et al.// Journal of Fusion Energy. 2007. V. 26. P. 37.
51. Yamada M., Ji H., Hsu S. et al.// Phys. Plasmas. 1997. V. 4. P. 1936—1943.
52. Knight A. J., Jones I. R.// Plasma Physics and Controlled Fusion. 1990. V. 32. No. 8. P. 575.
53. Балмашинов А. А.// Вестник РУДН. Сер. Физика. 1993. Т. 1. С. 106.
54. Hoffman A. L.// Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P. 979.
55. Mozgovoy A.// 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St.-Petersburg, 7—11 July 2003 ECA. V. 27A. P. 2. 198.
56. Hoffman A. L., Carey L. N., Crawford E. A. et al.// Fusion Technol. 1993. V. 23. P. 185.
57. Siemon R. E., Turchi P. J., Barnes D. C. et al.// ITC-12. 2001.
58. Steinhauer Loren, частное общение, 2008.
59. Intrator T. P., Zhang S. Y., Degnan J. H. et al.// Phys. Plasmas. 2004. V. 11 (5). P. 2580.
60. Jones I.// Ibid. 1999. V. 6. No. 5. P. 1950.
61. Hoffman A. L., Guo H. Y., Slough J. T. et al.// Fusion Science and Technol. 2002. V. 41. P. 92.
62. Cohen S. A., Glasser A. H.// Phys. Rev. Letters. 2000. V. 85. P. 5114.
63. Hoffman A. L., Guo H. Y., Milroy R. D., Farengo R., Ferrai H.// 22nd IAEA Fusion Energy Conference. 2008. www.fec2008.ch/preprints/ic_p4-1.pdf.
64. Kulcinski G. L., Emmert G. A., Blanchard J. P. et al.// Fusion Technol. 1992. V. 21. P. 2292.
65. Moir R. W., Bulmer R. H., Gulec K. et al. Thick liquid-walled, field-reversed configuration. — Preprint UCRL-JC-139086, 2000.
66. Мурнов С. В. Тез. докл. XXXIV Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. 2007. С. 26; Петров В. Г., Петров А. А., Азизов Е. А.// Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 9. С. 771.
67. Moir R. W.// Nuclear Fusion. 1997. V. 37. P. 557.
68. Thio Y. C. F. et al.// Current Trends in Int. Fusion Research: Proceedings of the Second Symposium, edited by E. Panarella, National Research Council of Canada. 1999. P. 113.
69. Garanin S. F., Mamyshev V. I., Yakubov V. B.// IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 26. No. 4. P. 2273.
70. Intrator T. P., Siemon R. E., Sieck P. E.// Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 042505.
71. Turchi P. J.// IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 52.
72. Головин И. Н. Малорадиоактивный управляемый термоядерный синтез (реакторы с D—³He): Препринт ИАЭ № 4885/8. — М.: ЦНИИатоминформ, 1989.
73. Ryzhkov S. V., Khvesyuk V. I.// Summary of IAEA TCM on Innovative Approaches to Fusion Energy, 1997.
74. Santarius J. F., Kulcinski G. L., El-Guebaly L. A., Kha-ter H. Y.// Journal of Fusion Energy. 1998. V. 17. P. 33.
75. Ryzhkov S. V.// Proc. of 35th EPS Conf. on Plasma Physics and Contr. Fusion. 2008. ECA V. 32F. P1.114.
76. Рыжков С. В.// Тепловые процессы в технике. 2009. № 9.
77. Slough J. T.// Journal of Fusion Energy. 2008. V. 27. P. 115.

Inverted magnetic configuration and applications of high-temperature plasma on the base of the FRC

S. V. Ryzhkov

Bauman Moscow State Technical University, 5 Second Bauman str., 105005, Moscow, Russia

E-mail: ryzhkov@power.bmstu.ru

The magnetic trap for plasma confinement with an inverted field or the inverted magnetic configuration (FRC) is one of the most perspective systems with high β , alternative in relation to the tokamak. Offered is the brief review according to all available information on the FRC and to possible directions of use of such configurations besides reception of energy in thermonuclear reactors (TNR).

PACS: 52.25.Xz; 52.55.Lf

Keywords: magnetic trap, plasma, turned field, review.

Bibliography — 77 references.

Received 10 July 2009

* * *