электронное научно-техническое издание
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС 77 - 30569. Государственная регистрация №0421100025. ISSN 1994-0408

Теоретическое и экспериментальное исследование обращенной магнитной конфигурации (компактный тор)

77-30569/322717

02, февраль 2012

Ромаданов И. В.

УДК.01.04.14

МГТУ им. Н.Э. Баумана
ФИАН им. А.П. Лебедева
i.v.romadanov@gmail.com

1. Введение.

Управляемый термоядерный синтез является одной из самых актуальных проблем современности. Это крайне сложная научно-техническая задача, для решения которой создано множество лабораторий по всему миру. Все исследования можно разделить на две категории: магнитное удержание плазмы и инерциальное удержание. В первом случае термоизоляция и удержание плазмы осуществляются магнитными полями. В инерционных системах плазма сильно сжимается, например: лайнерами, лазерное обжатие, пучки и т.д. Системы с магнитным удержанием рассматриваются не только как основа для термоядерного реактора, но и как источник энергии для различных двигательных установок [1-3].

Наибольшее развитие получили системы на основе токамака. Об этой системе собрано наибольшее количество экспериментальных данных, решено много технических проблем. Международный проект *International Thermonuclear Experimental Reactor* (*ITER*) является демонстрационным реактором на основе токамака.

Однако, токамак, несмотря на свои преимущества и множество теоретических и экспериментальных исследований, имеет существенные недостатки: маленькое значение отношения магнитного давления к газокинетическому давлению плазмы (β), сложную конструкцию камеры, а так же магнитной системы.

В связи с этим идет активное изучение альтернативных магнитных систем, таких как: газодинамическая ловушка, компактный тор [4, 5], стеллараторы, пинчи и т.д.

На установке, расположенной в ФИАН им. Лебедева, проводятся совместные с МГТУ им. Баумана эксперименты по изучению установки компактный тор (КТ).

Основная цель работы - изучение нового метода формирования этой конфигурации и повышение энергоэффективности этого процесса.

2. Компактный тор.

Компактный тор относится к так называемым альтернативным схемам удержания плазмы и относится к замкнутым магнитным ловушкам [6]. В основе КТ лежит компактная конфигурация, в которой плазма удерживается в равновесии замкнутым полем и отделена от стенки областью разомкнутого магнитного потока. Сепаратриса, разделяющая замкнутые и разомкнутые силовые линии магнитного поля, является естественной границей горячей плазмы. Полоидальное магнитное поле поддерживается за счет азимутальных токов в плазме, а тороидальное – продольными токами в плазме или центральным проводником. Наиболее простым случаем является система с чисто полоидальным полем (рис. 1).

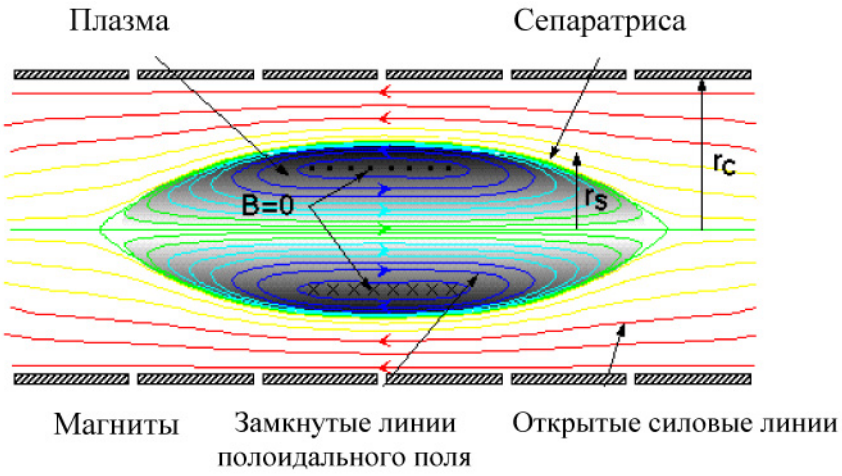


Рис. 1. Общий вид конфигурации *Field Reversed Configuration* (*FRC*) [7].

Процесс формирования происходит непосредственно в плазменной камере и состоит из нескольких стадий. Схема формирования представлена на рис. 2.

В предварительно вакуумированную камеру напускается рабочий газ (в эксперименте использовался водород или дейтерий). Дальше происходит предварительная ионизация рабочего газа и захват внутреннего магнитного потока в начальной плазме (рис. 2, *а*). Магнитный поток, захваченный в плазме в этот момент, остается в плазме в течение всего времени жизни.

На следующей стадии происходит обращение направления внешнего поля на границе плазмы и образование вытянутой конфигурации с антипараллельными внутренним и внешним магнитными полями (рис. 2, *б*). Внешнее продольное поле

изменяет направление на противоположное с переходом через 0. Далее встречные силовые линии вмороженных внутреннего и внешнего полей пересоединяются на торцах камеры и возникает антипараллельная магнитная конфигурация. Конфигурация, получающаяся на стадии *б*, не является равновесной, и она стремится к сжатию в продольном направлении и переходу к полному магнитогидродинамическому (МГД) равновесию.

После сжатия, конфигурация переходит в квазиравновесное состояние (см. рис. 1).

Направление КТ развилось из исследований по магнитным ловушкам с полоидальным током, так называемым θ - пинчам [8] и использует похожие техники формирования и удержания. Получаемая конфигурация имеет ряд преимуществ [9, 10]:

1. Замкнутая магнитная тороидальная конфигурация, отсутствие торцевых потерь, которые характерны для обычных пинчевых систем, однако сохраняется цилиндрическая геометрия камеры, которая существенно упрощает конструкцию системы;
2. Высокое значение β в системе;
3. Отсутствие дополнительных источников нагрева, который происходит параллельно с формированием конфигурации;
4. Возможность транспортировки конфигурации. Эта возможность важна с точки зрения реакторных приложений компактного тора.

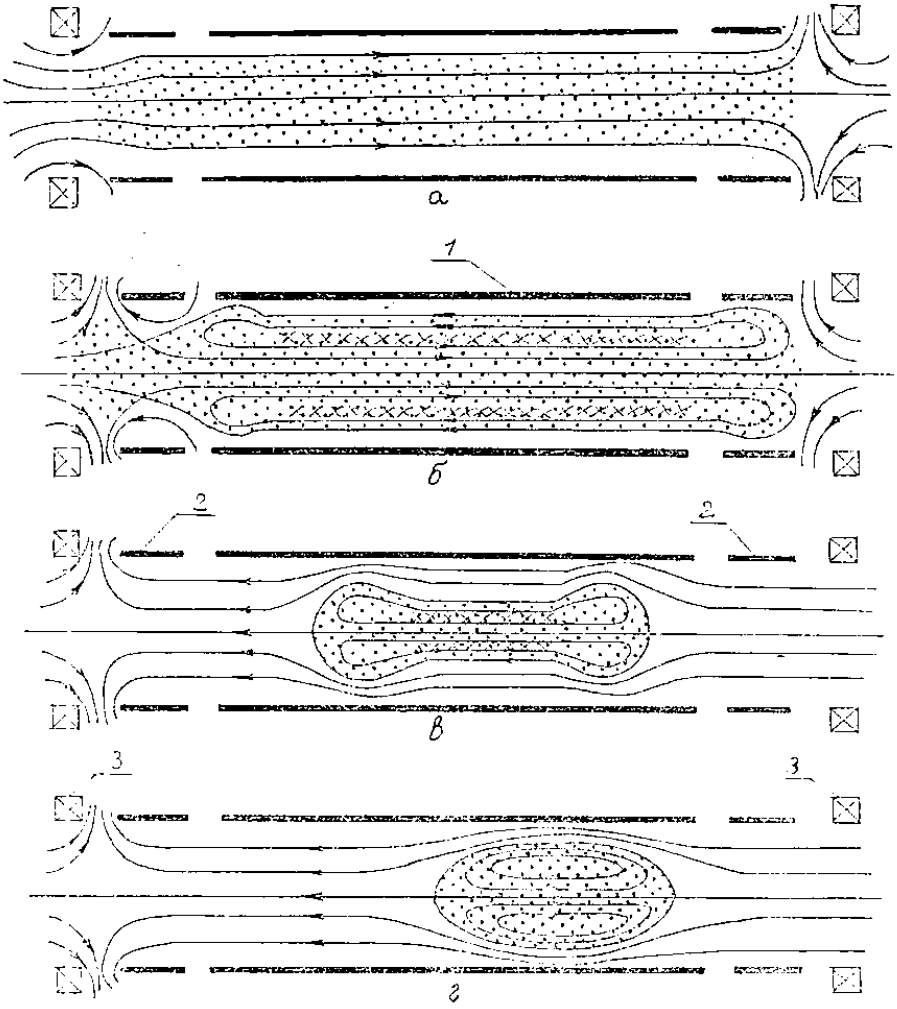


Рис. 2. Схема формирования КТ: а – ионизация рабочего тела и захват начального магнитного потока; б – обращение внешнего поля и пересоединение встречных потоков на торцах; в – продольное ударное сжатие и нагрев; г – МГД-равновесие, транспортировка вдоль оси [9].

Остановимся на пунктах 3 и 4 подробнее. Замкнутая конфигурация, возникающая после пересоединения силовых линий на торцах камеры (см. рис. 2, б), неравновесна по оси. Натяжение замкнутых магнитных линий стремится сжать плазму вдоль оси. Этот процесс носит ударно-волновой характер. Такой механизм делает реальным достижение киловольтных температур только за счет ударных продольных волн.

Возможность транспортировки конфигурации обеспечивается геометрией камеры и магнитных полей. При пинчевом импульсном способе формирования магнитной конфигурации стенки камеры формирования должны быть проницаемы для магнитного поля. Диэлектрическая камера создает проблемы с обеспечением вакуумной гигиены и чистоты системы. Для этого плазменную конфигурацию целесообразно перемещать в

специальную камеру удержания. Камера удержания будет металлической и ведущее продольное поле будет квазистационарным.

Современные исследования предлагают несколько вариантов формирования *FRC*. Основной интерес представляют: слияние сфероманов (рис. 3) [11] или системы с вращающимся магнитным полем (рис. 4) [12] (*rotating magnetic field - RMF*).

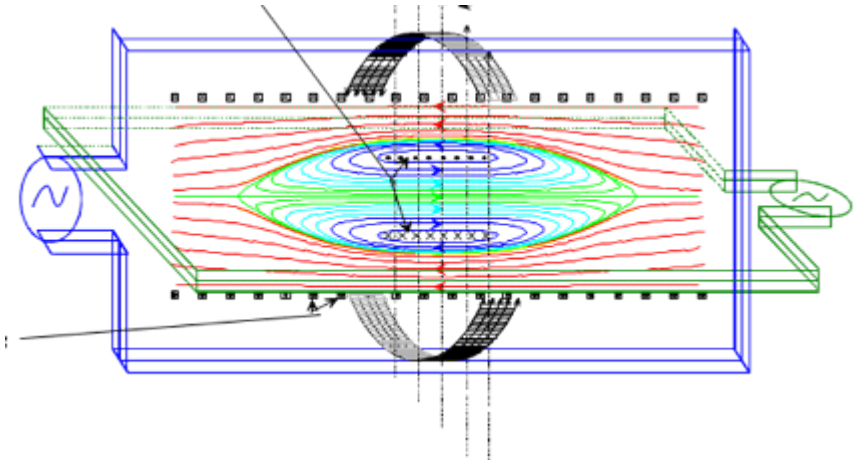


Рис. 3. Схема формирования с RMF антеннами.

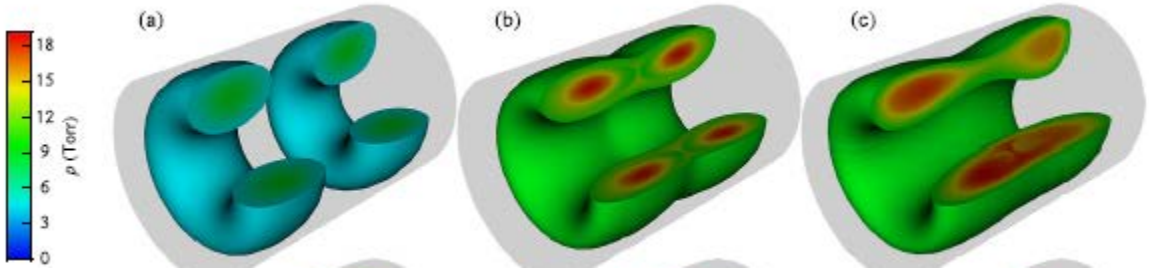


Рис. 4. Формирование конфигурации слиянием сфероманов.

3. Описание схемы эксперимента.

Предлагаемая схема формирования обращенной магнитной конфигурации также основана на принципе формирования θ-пинча [13]. Одной из основных проблем формирования *FRC* является низкий уровень захватываемого потока и, как следствие, низкий уровень энергии передаваемый от источника энергии (чаще всего это конденсаторы) в плазму.

Общая схема формирования представлена на рисунке 5. Начальная стадия совпадает со стадией а на рис. 2. В камеру напускалось рабочее тело (водород или дейтерий), после чего создавалось продольное магнитное поле (рис. 5, *а*). Поле создается пропусканием тока через соленоид. В момент максимума тока происходит его обрыв. Это

создает в плазме круговой ток, направленный так, что он стремится поддержать убывающее поле (рис. 5, *б*). Для поддержания этого поля сквозь плазму пропускается продольный ток. Поле этого тока круговое, убывающее по радиусу. В результате образуется суммарное винтовое магнитное поле, которое поддерживает полученный ток в плазме и увеличивает величину захватываемого потока. Затем включается соленоид обратного поля (рис. 5, *в*), в результате чего образуется вытянутая конфигурация с круговым магнитным полем. Получившаяся конфигурация сжимается в продольном направлении и переходит в состояние равновесия (рис. 5, *г*).

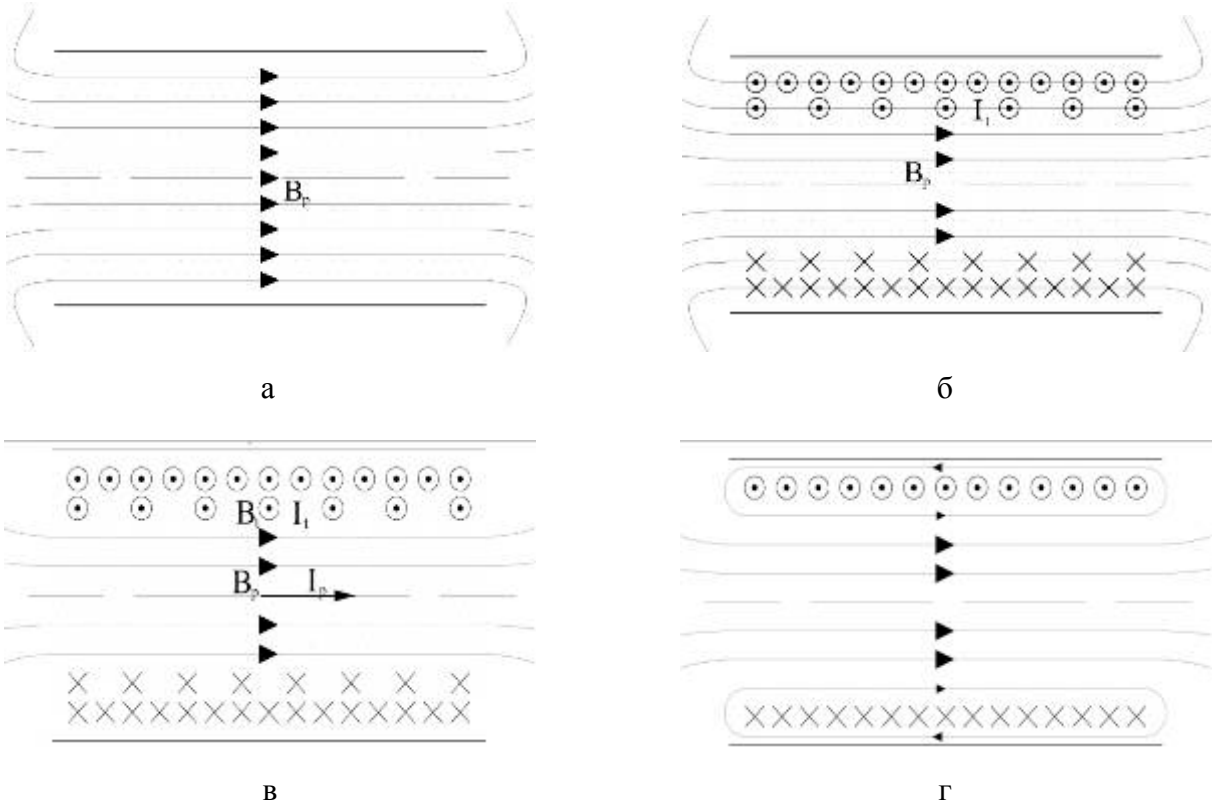


Рис. 5. Стадии формирования компактного тора: B_p – полоидальное магнитное поле; I_p – полоидальный ток; B_t – тороидальное магнитное поле; I_t – тороидальный ток.

Ниже приведена сводная таблица основных параметров различных экспериментальных установок и рассматриваемой.

Таблица 1.

Основные параметры экспериментальных установок *FRC*

Параметр	Название установки			
	ТОР	*XOCOT*[14]	*SSX-FRC*[15]	ФИАН
Радиус камеры, см	15	40	20	25 (12.5)
Длина соленоида основного поля, см	130	30	70	85 (80)
Максимальное поле, Т	2	0.29	0.25	0.1
Период разряда, мксек	32-60	185-450	-	120
Плотность плазмы конечная, $см^3$	10^{14}-10^{16}	10^{12}	10^{15}	10^{15}
Время удержания плазмы, мксек	100	100	150	50 (20)

Установка ТОР находится в ТРИНИТи и на данный момент не действует. Установка *XOCOT* находится в университете Мичиган, где совместно с одной из военно-воздушных баз США ведутся исследования по использованию конфигурации КТ в качестве двигательной установки (еще одна подобная установка находится в Университете штата Вашингтон, также действующая). Установка *SSX-FRC* находится в колледже Swarthmore и на ней ведутся исследования по формированию конфигурации КТ из сфероманов. Для установки в ФИАНе в скобках показаны данные для кварцевой камеры. Большинство экспериментов проводились на камере большего радиуса, также выполненной из диэлектрического материала.

4. Описание эксперимента.

Основным направлением проводимых экспериментов было повышение эффективности передачи энергии в плазму и повышение уровня захвата магнитного потока. В современных экспериментах этот показатель не превышает уровня 20-30 % в лучших экспериментах. В результате проведенных экспериментов показано, что уровень захватываемого магнитного потока составляет не менее 60 % (в экспериментах с кварцевой камерой до 90 %). Эти результаты позволяют считать данный метод формирования перспективным.

Наибольший интерес представляет собой первая фаза эксперимента, до включения соленоида для обращения поля, так как именно она определяет уровень захватываемого поля, а соответственно и отвечает за эффективность процесса.

Второе направление – это исследование возможности использования конфигурации типа КТ в качестве основы для плазменного двигателя. На данном этапе представляет большой интерес исследование энергетических характеристик возможного двигателя, примерная оценка необходимого уровня запасаемой энергии, характеристики импульсного режима работы. Также проводится оценка существующей материально-технической базы для определения возможности создания экспериментальной установки предназначенной только для исследования двигательных приложений и создания работающего прототипа.

Формирование *FRC* конфигурации это, в основном, импульсный или переходной процесс. В данном случае рассматривается импульсное формирование конфигурации.

Основной частью установки является вакуумная камера диаметром 50 см и длиной 85 см. Камера предварительно вакуумируется диффузионным насосом до уровня порядка 0.01 мТорр. На камеру намотаны накопительный соленоид и соленоид для обращения поля. Накопительный соленоид представляет собой 7 последовательно соединенных обмоток по 6 витков в каждой. Соленоид обращения поля это 24 обмотки по 2 витка. На рис. 6 представлен общий вид камеры.

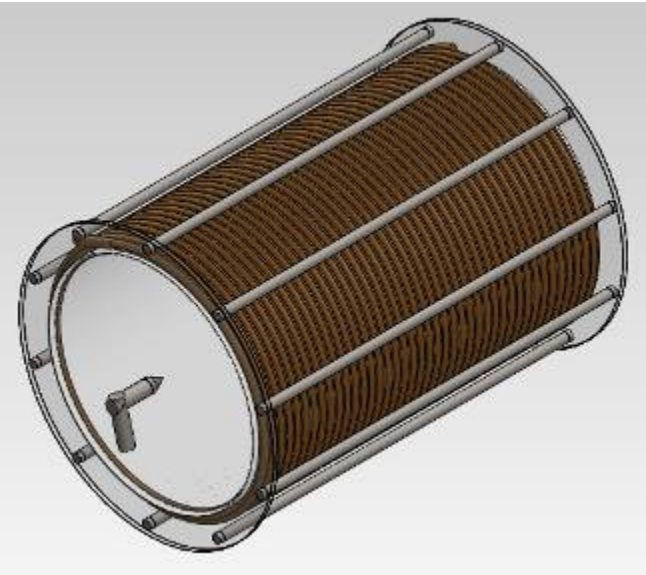


Рис. 6. Общий вид камеры, используемой в экспериментах;
диаметр камеры 500 мм, длина 820 мм.

Ток в катушках создается за счет разряда конденсаторной батареи и является синусоидальным. Нарастание поля в камере определяется временем разряда (время нарастания поля до максимума – это ¼ периода). Основная идея заключалась в том, чтобы в момент максимума тока оборвать его. Это позволяет перевести всю

электрическую энергию в энергию магнитного поля. Обрыв ток осуществляется перегоранием медной проволоки, длина которой подбирается таким образом, что при токе близком к максимальному проволока перегорает.

Простейшая эквивалентная электрическая цепь представлена на рис. 7 Цепь состоит из конденсатора (*C*), соленоида (*L*) и эквивалентного сопротивления (*R*). В эксперименте сопротивление не участвует и под эквивалентным сопротивлением понимается сопротивление элементов цепи.

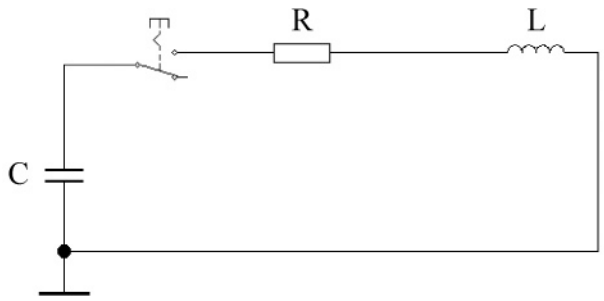


Рис. 7. Эквивалентная цепь экспериментальной установки.

Разряд батарей осуществляется через вакуумные разрядники.

Энергетическая часть эксперимента состоит из 3-х конденсаторных батарей, всего 96 конденсаторов. Распределение энергии происходит следующим образом:

- батарея из 22 конденсаторов разряжается на накопительный соленоид.
- батарея из 32 конденсаторов идет на пропускание тока в продольном направлении.
- батарея из 42 конденсаторов разряжается на обмотку сжатия.

Емкость конденсаторов составляет 5 мкФ для каждого. Максимальное зарядное напряжение – 40 кВ. Это позволяет (теоретически) запасать энергию до 200 кДж. В экспериментах же напряжение редко было выше 20-25 кВ.

Схема эксперимента представлена на рис. 8.

Конденсаторная батарея *C2*, разряжается через вакуумный разрядник *D2* и создает полоидальное магнитное поле B_p. При достижении максимума тока эта цепь разрывается. Генератором импульсов, примерно за 5 микросекунд до этого момента, подается сигнал на разрядник *D1* конденсаторной батареи *C1*, которая создает тороидальное магнитное поле B_t. Ток *I*, создающий это поле, течет сквозь плазму.

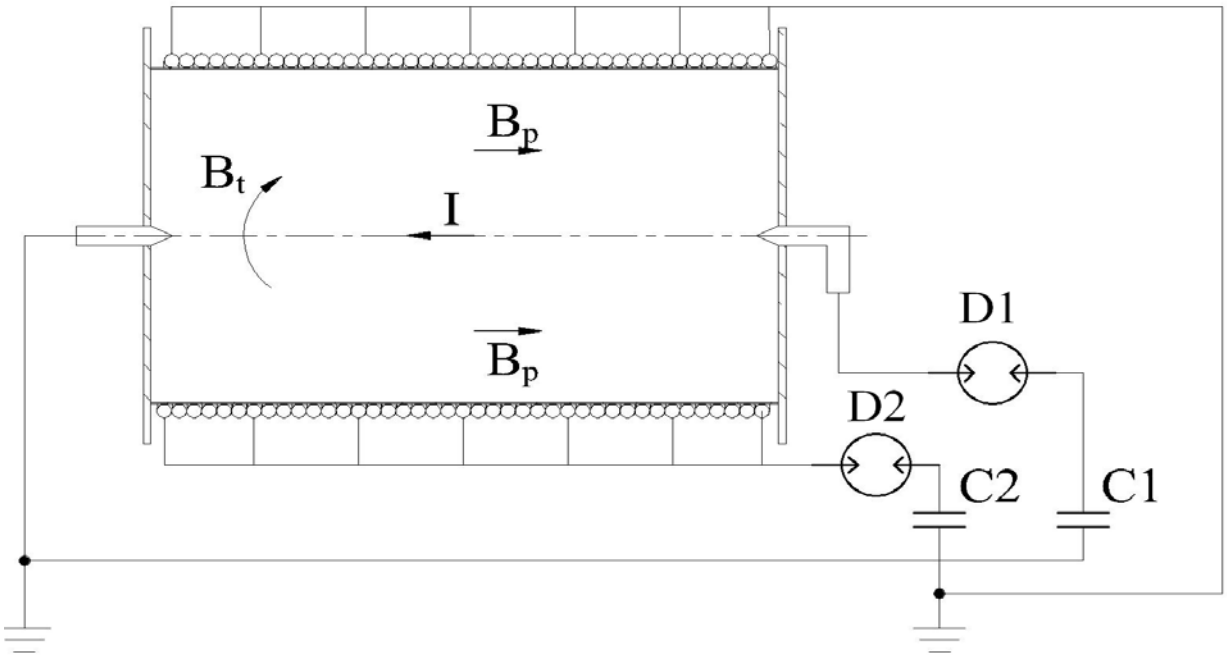


Рис. 8. Схема эксперимента: *C1* – конденсаторная батарея тороидального магнитного поля; *D1* – вакуумный разрядник конденсаторной батареи *C1*; *C2* – конденсаторная батарея полоидального магнитного поля; *D2* – вакуумный разрядник конденсаторной батареи *C2*; B_t – тороидальное магнитное поле; B_p – полоидальное магнитное поле; *I* – продольный ток.

На фотографиях ниже представлены: общий вид камеры (рис. 9) и фотографии экспериментов (рис. 10), выполненные камерой со скоростью съемки 1200 к/сек.

Рис. 9. Общий вид камеры (фотография).

1- вид в профиль

2 – вид с торца

3 – предыонизация

4- кадр сделан на скорости 25 кадров/с

Рис. 10. Фотографии экспериментов.

5. Система диагностики.

В качестве основной диагностики используются магнитные пробы (*B*-зонды). С помощью этих зондов можно получить картину изменения магнитного поля с высоким разрешением. Для получения данных о распределении поля по радиусу и длине камеры

использовалось 7 *B*-зондов: 3 на оси камеры, 3 на расстоянии 12,5 см от оси и одна, непосредственно на стенке камеры. Схема расположения зондов представлена на рис. 11.

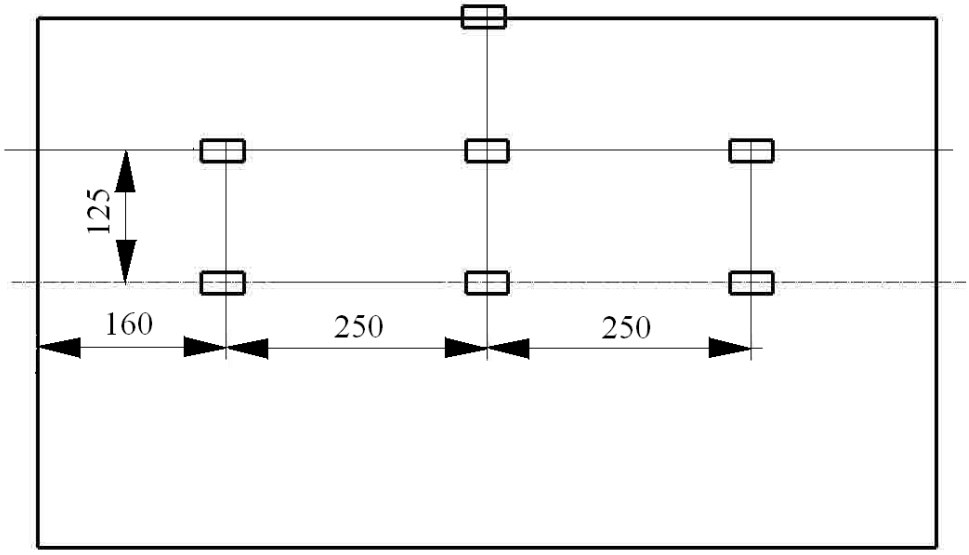


Рис. 11. Схема расположения зондов на камере формирования;
диаметр камеры 500 мм, длина 820 мм.

В основе работы *B*-зондов лежит принцип электромагнитной индукции. Изменяющийся магнитный поток, проходящий через пробы, вызывает появление напряжения, которое измеряется осциллографом. Так как на данном этапе интересует лишь относительно изменение потока, то абсолютные показания датчиков не определялись.

В качестве системы сбора данных использовались два осциллографа фирмы Tektronix, позволяющие собирать данные со скоростью до 1 ГГц. Каждый осциллограф имеет по 4 измерительных канала.

Триггерный сигнал приходит с системы, управляющей запуском эксперимента. После нажатия кнопки генерируется импульс, по которому срабатывают вакуумные разрядники и запускаются измерения. После этого, примерно за 5 микросекунд до ¼ периода разряда конденсатора (момент максимума тока) выдается импульс на разрядник продольного тока. Этот ток также обрывается через ½ периода. Последним приходит триггерный сигнал на разрядник для создания обращенного поля. Это происходит, примерно через 5 мксек, после прекращения продольного тока. Вся триггерная схема реализована с помощью генераторов управляющих импульсов (*TTL* сигналы), на разрядники сигнал приходит с генераторов одиночных импульсов, так как для них требуется высоковольтный импульс. Ниже рассмотрим модель электрической цепи для

формирования конфигурации, а так же рассмотрим процессы, происходящие при этом. Пока ограничимся рассмотрением цепи и схемы для накопительного соленоида.

6. Расчет электрической цепи и плазмы.

Для определения напряжений и токов, возникающих в цепи, воспользуемся уравнением Кирхгоффа для напряжений: $v_C + v_R + v_L = v(t)$, где V_R, V_L, V_C – напряжения на сопротивлении, индуктивности и конденсаторе соответственно. Раскрывая значения напряжений, получим:

$$R \cdot i(t) + L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{\tau=t} i(\tau)d\tau = v(t), \quad (1)$$

где i(t) – ток в цепи. В нашем случае v(t) = 0 и переходим к:

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC}i(t) = 0 \quad (2)$$

В более удобной форме уравнение (2) записывается:

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + 2\alpha\frac{di(t)}{dt} + \omega_0^2 i(t) = 0,$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и $\alpha = \frac{R}{2L}$.

Также полезным параметром является коэффициент усиления, который определяется как:

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} \quad (3)$$

Характеристическим уравнением этого дифференциального уравнения будет:

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0 \quad (4)$$

Корни уравнения (4): $s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$ и $s_1 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$.

В зависимости от значения коэффициента ζ уравнение может иметь разные решения. Для нашего случая ζ<1. В этом случае решение выглядит как:

$$i(t) = B_3 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega_d \cdot t + \varphi), \quad (5)$$

где $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \omega_0\sqrt{1-\zeta^2}$. Значения независимых констант B_3 и φ определяются из начальных условий i(0) = 0 и V(0) = V_0, где V_0 - заряд на конденсаторе. В итоге для тока получаем:

$$i(t)=\frac{V_0}{\omega_d \cdot L}\cdot e^{-\alpha\cdot t}\cdot\alpha\cdot\sin(\omega_d\cdot t) \qquad (6)$$

для напряжения получим:

$$V(t)=L\cdot B_3\cdot e^{-\alpha\cdot t}\cdot(\omega_d\cdot\cos(\omega_d\cdot t)-\alpha\cdot\sin(\omega_d\cdot t)) \qquad (7)$$

Использование значений только активного сопротивления и индуктивности в RLC цепи может привести к неправильным результатам. Поэтому необходимо определить полное значение сопротивления цепи:

$$z(j\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L\,.$$

Индуктивность конденсатора:

$$L = \frac{1}{\omega^2_d \cdot C}\,.$$

Тогда импеданс равен:

$$Z=\sqrt{R^2+\left(\omega\cdot L-\frac{1}{\omega\cdot C}\right)^2}\,.$$

На рис. 12 и 13 представлены функции напряжения и тока, соответственно. Из полученных уравнений можно определить несколько важных параметров, таких как максимальный ток и время за которое будет достигнут этот ток.

Время, за которое этот ток будет достигнут, определяется из уравнения (6):

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{V_0}{\omega_d \cdot L}\cdot e^{-\alpha\cdot t}\cdot(\omega_d\cdot\cos(\omega_d\cdot t)-\alpha\cdot\sin(\omega_d\cdot t)) = 0\,,$$

решение которого:

$$t = \frac{1}{\omega_d}\arctan\frac{\omega_d}{\alpha}\,. \qquad (8)$$

Максимальный ток получается из уравнений (6) и (8):

$$I_{max} = \frac{V_0}{\omega_d \cdot L}\cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega_d}\arctan\frac{\omega_d}{\alpha}}\cdot\alpha\cdot\sin(\arctan\frac{\omega_d}{\alpha})\,.$$

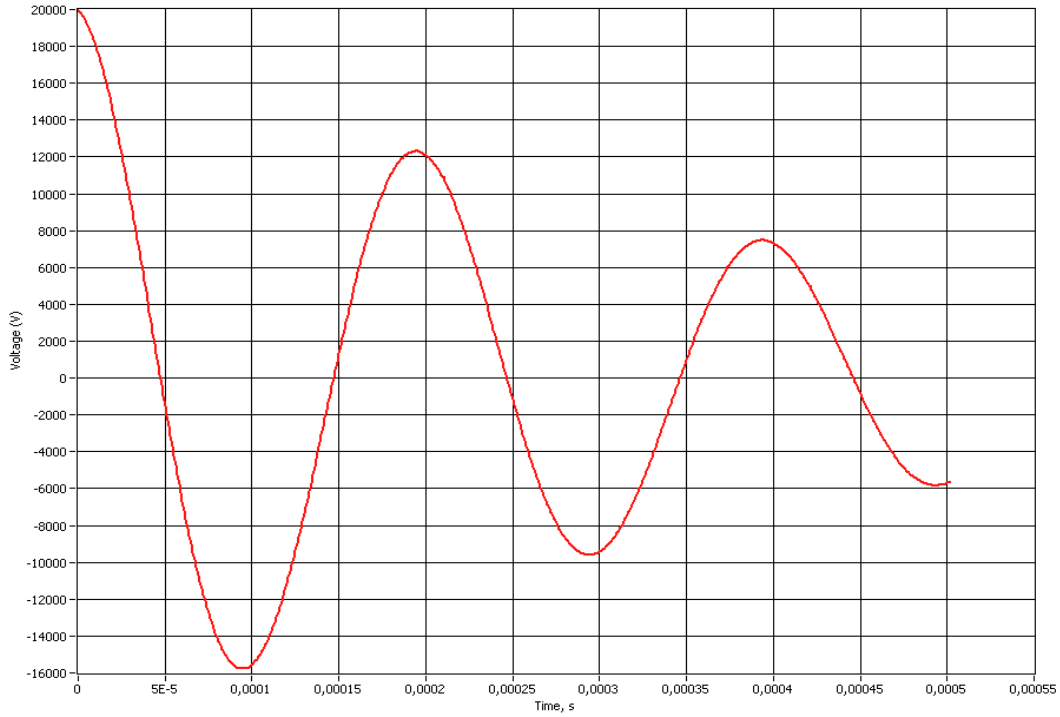


Рис. 12. Зависимость напряжения разряда от времени.

Конденсаторная батарея заряжена до напряжения 20 кВ.

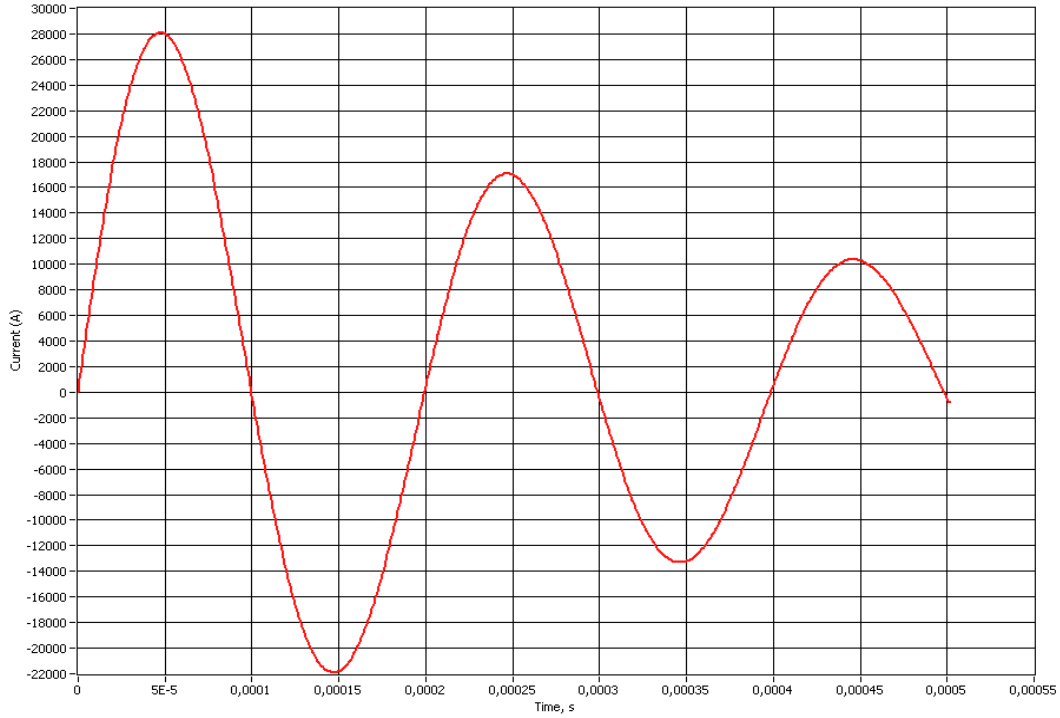


Рис. 13. Зависимость тока разряда от времени. Конденсаторная батарея заряжена до 20 кВ. Из графика видно, что ¼ периода разряда составляет примерно 50 микросекунд.

Определим поле внутри соленоида. Соленоид представляет собой систему из 7 обмоток по 6 витков на каждой. Всего 42 витка. Диаметр камеры – 500 мм, длина – 850 мм. Распределение поля вдоль оси камеры будет:

$$B=\frac{\mu_0 \cdot i \cdot N}{2 \cdot l} \cdot \left[\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2+r^2}} - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2+r^2}} \right], \qquad (9)$$

где x_1, x_2 расстояния вдоль оси от конца соленоида, r – радиус соленоида, i – ток, определяемый из уравнения (8), N – число витков, l – длина соленоида.

Максимум тока в соленоиде достигается через четверть периода или 25 мкс, дальше происходит обрыв тока. Первая четверть периода с достижением максимума по току представлена на рис. 14.

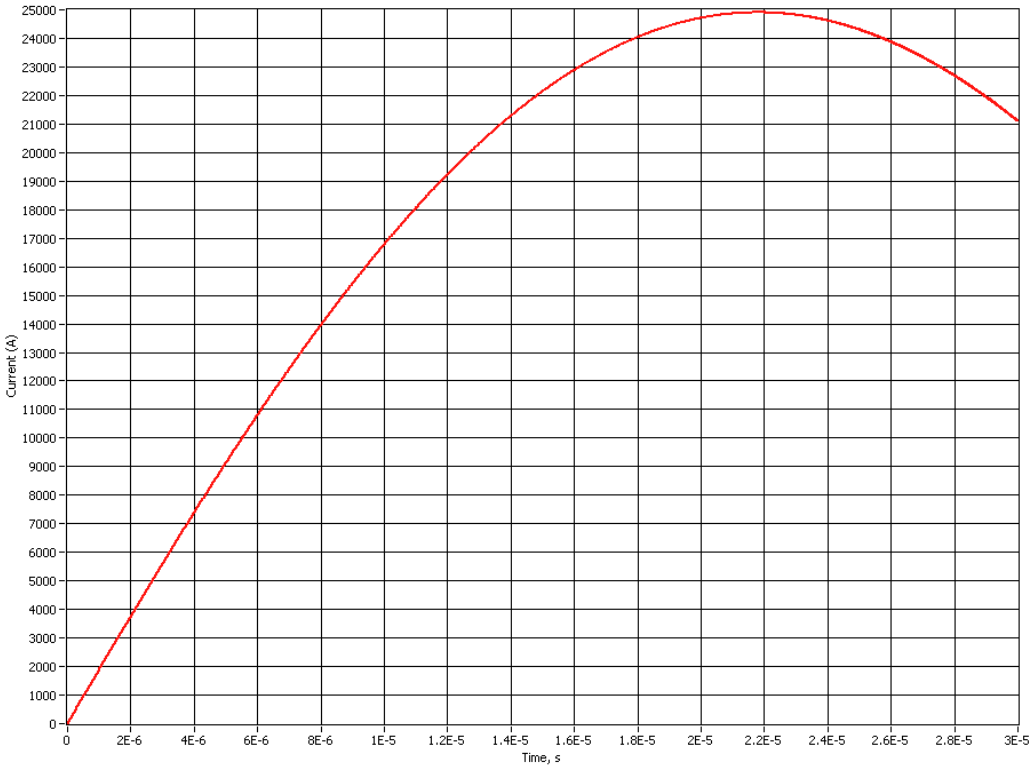


Рис. 14. График зависимости тока разряда от времени
(напряжение заряда конденсаторов – 25 кВ).

Так как плазма не является идеально проводящей средой, то магнитное поле проникает в плазму за некоторое время диффузии, определяемое из следующего соотношения:

$$\tau=L^2 \cdot \mu_0 \cdot \sigma, \qquad (10)$$

где, L – характерный размер системы, который в данном случае является радиусом катушки, σ – проводимость плазмы. В общем случае проводимость в плазме является тензорной величиной, так как в магнитном поле плазма по-разному проводит ток вдоль и поперек магнитного поля.

Классическая электропроводность плазмы:

$$\sigma = \frac{e^2 \cdot n_e}{m_e \cdot \upsilon_e}, \tag{11}$$

где частота столкновений электронов - υ_e, определяется как:

$$\upsilon_e = 2.91 \cdot 10^{-6} n_e \ln\Lambda n_e^{-3/2}, \tag{12}$$

где $\ln\Lambda$ - Кулоновский логарифм, принимаемый равным 15.

В предлагаемой схеме, в отличие от многих существующих, предполагается обрыв тока, после достижения максимального значения. Это вызывает в плазме ток, который стремится сохранить магнитный поток.

На рис. 15 представлено магнитное поле внутри соленоида (в вакууме). Максимальное значение поля порядка 0.05 Тесла.

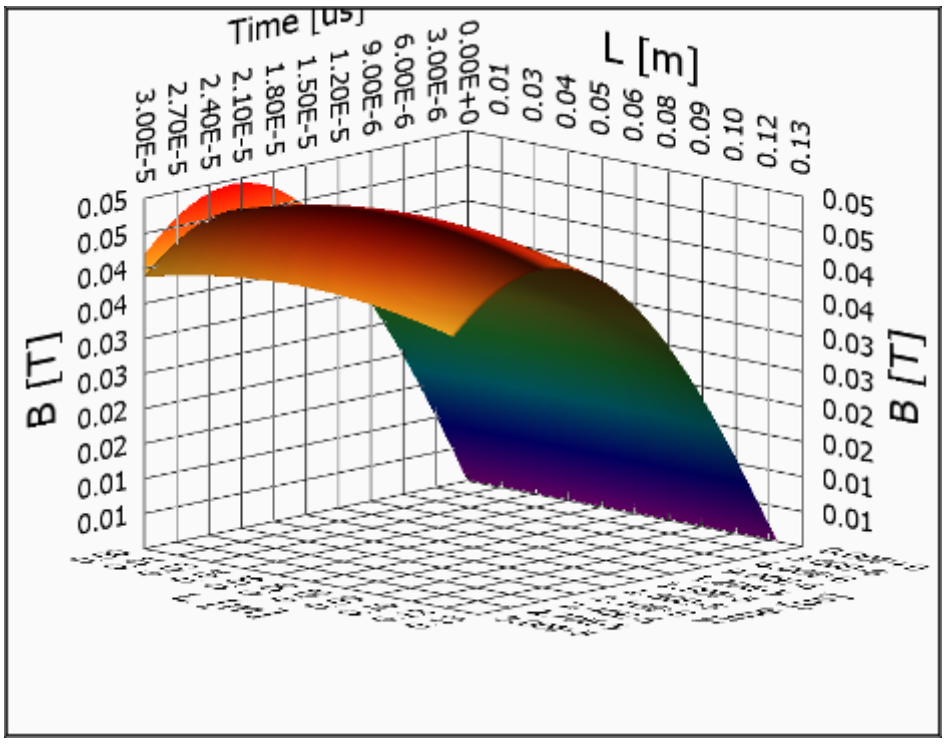


Рис. 15. Изменение магнитное поля соленоида в зависимости от тока по длине камеры и по времени.

Для поддержания тока в плазме, возникающего при протекании тока в соленоиде создадим дополнительное тороидальное поле, вдоль силовых линий которого будут двигаться заряженные частицы плазмы. Тем самым мы увеличим величину захваченного магнитного потока. Ток будем пропускать через центр камеры, разряжая на него конденсатор.

Ток определяется соотношением:

$$I=\frac{E}{\sigma}\cdot e^{-\frac{t}{\sigma C}} \qquad (13)$$

Магнитное поле, создаваемое таким током будет определятся как:

$$B=\frac{\mu_0 \cdot I}{2\cdot\pi\cdot r} \qquad (14)$$

Изменение магнитного поля от времени и радиуса представлено на рис. 16.

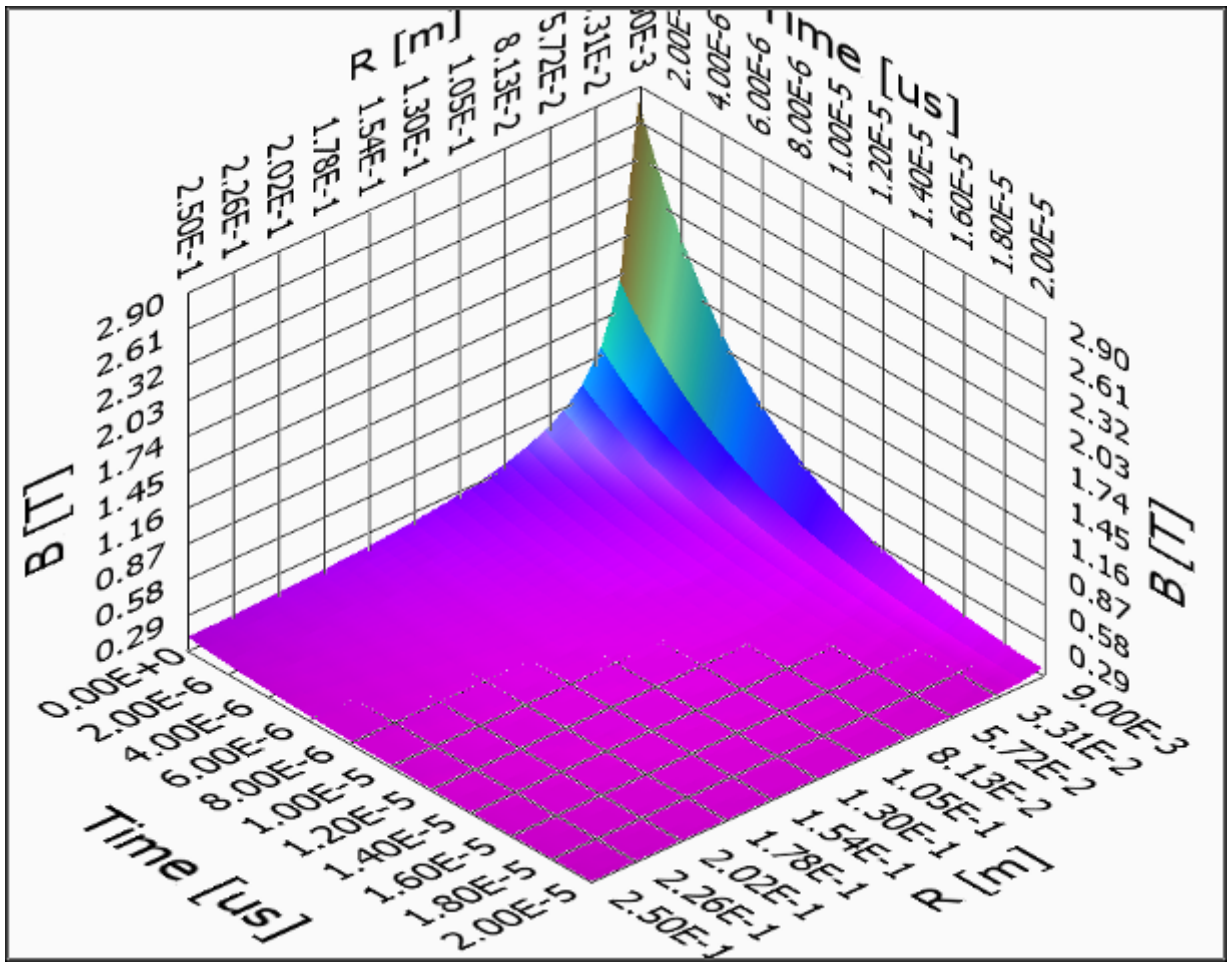


Рис. 16. Распределение тороидального магнитного поля по радиусу в зависимости от времени.

Сумма двух этих полей в плазме вызывает появление суммарного поля с винтовыми силовыми линиями, шаг которых равен:

$$h = 2\pi r \frac{B_p}{B_t} \tag{15}$$

Частота вращения частицы вокруг своей оси будет равна:

$$\Omega = v_{II} \frac{B_p}{r\sqrt{B_t^2 + B_p^2}}, \tag{16}$$

где v_{II} - скорость частицы, параллельно оси камеры.

Это движение создает ток, равный:

$$j = en\Omega \tag{17}$$

Этот ток также направлен по спирали и он создает магнитное поле, нас интересует только та часть поля, которая направлена параллельно оси. Поле равно:

$$B = \frac{4\pi}{c} j \tag{18}$$

На рис. 17 представлен график изменения этого поля со временем. Отвесный участок графика – момент обрыва тока. Как видно часть магнитного потока не захватывается.

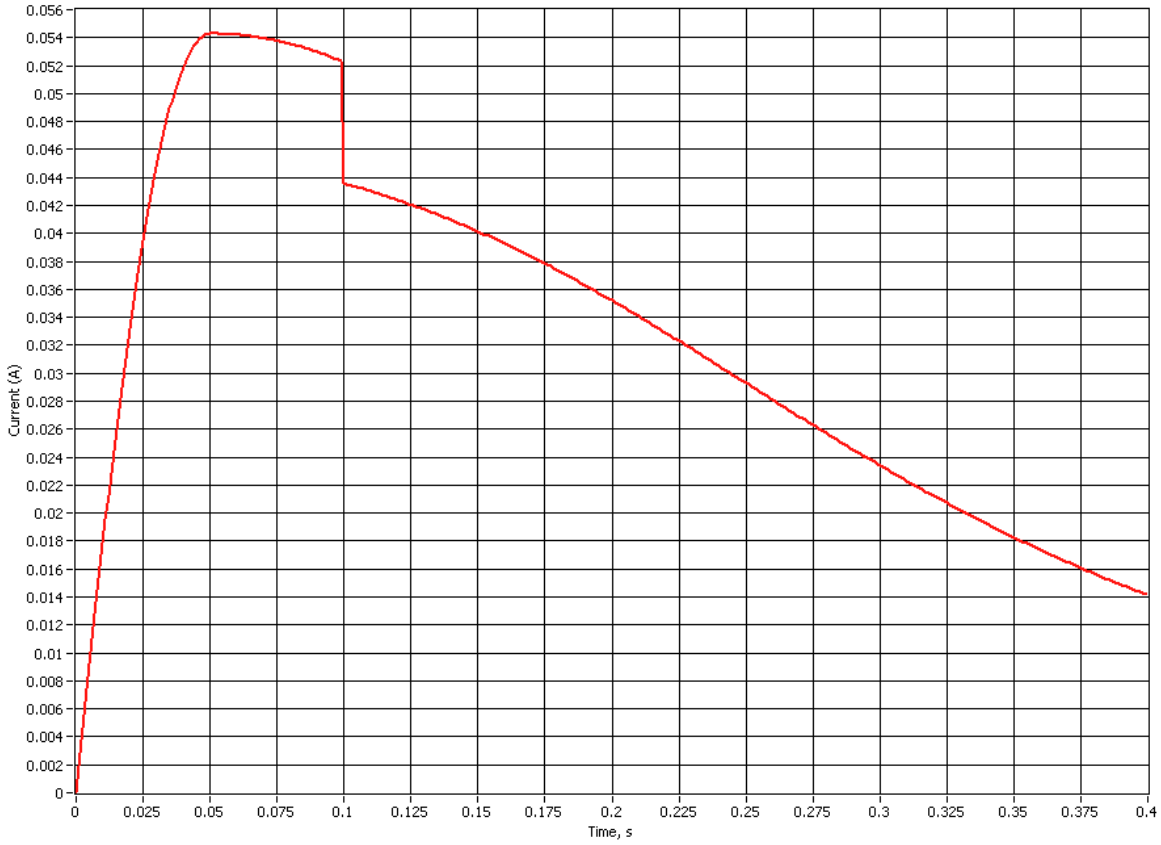


Рис. 17. Изменение величины магнитного потока от времени.

7. Экспериментальные данные.

Рассмотрим экспериментальные данные и сравним их с теми, что получаются из расчетов. Результаты экспериментов представлены на рис. 18 и 19.

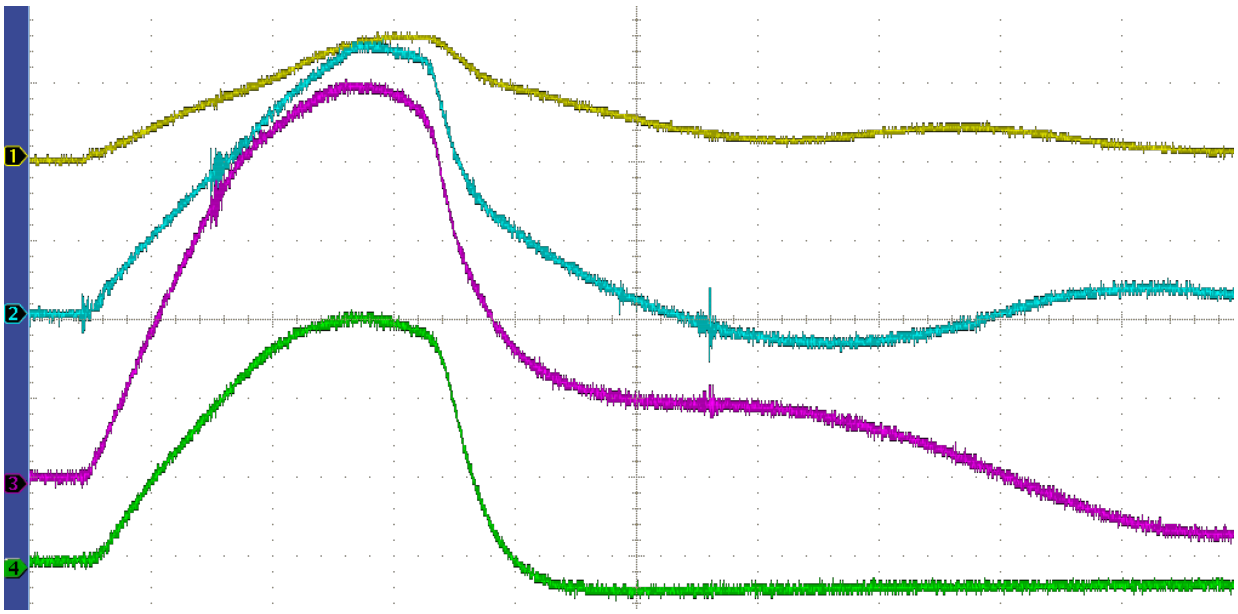


Рис. 18. Экспериментальные данные (осциллограф №1). 4 – ток, текущий в накопительном соленоиде; 3 – магнитный поток в центре камеры; 2 – поле на радиусе 12,5 см (центральный датчик); 1 – поле на стенке камеры (центральный датчик). Одна клетка, по оси ординат соответствует 10 мксек.

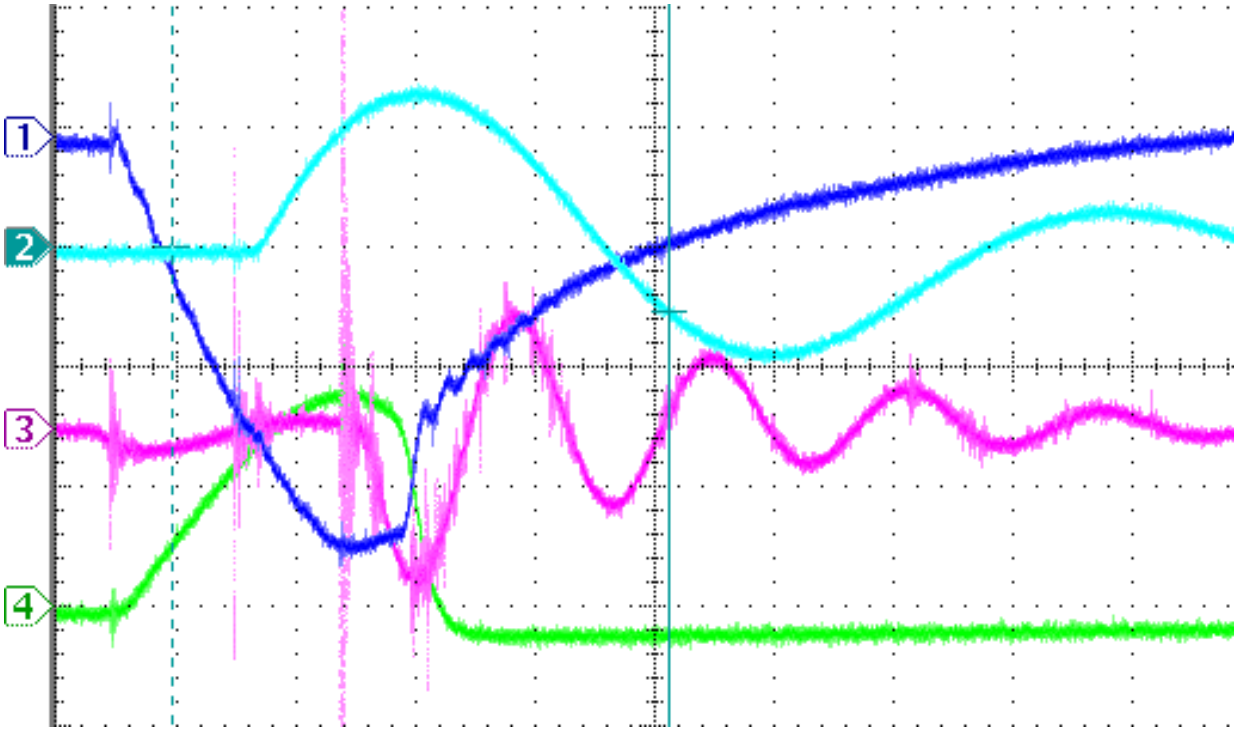


Рис. 19. Экспериментальные данные (осциллограф №2). 4 – ток, текущий в накопительном соленоиде; 3 – ток в продольном направлении; 2 – помехи; 1 – поле на стенке камеры (правый датчик). Одна клетка, по оси ординат соответствует 10 мксек.

На рис. 20 представлены данные, полученные на той же установке, но с использованием кварцевой камеры с радиусом 12.5 см. Используются обозначения с предыдущих рисунков.

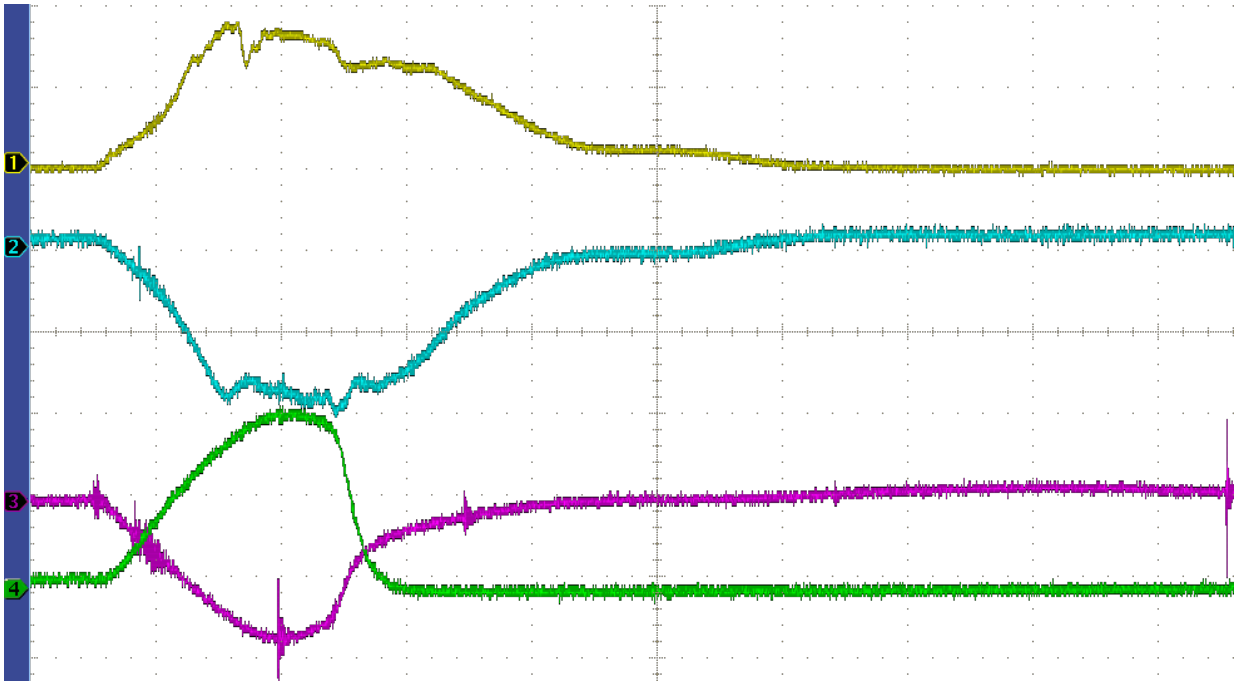


Рис. 20. Экспериментальные данные для кварцевой камеры (осциллограф №1).

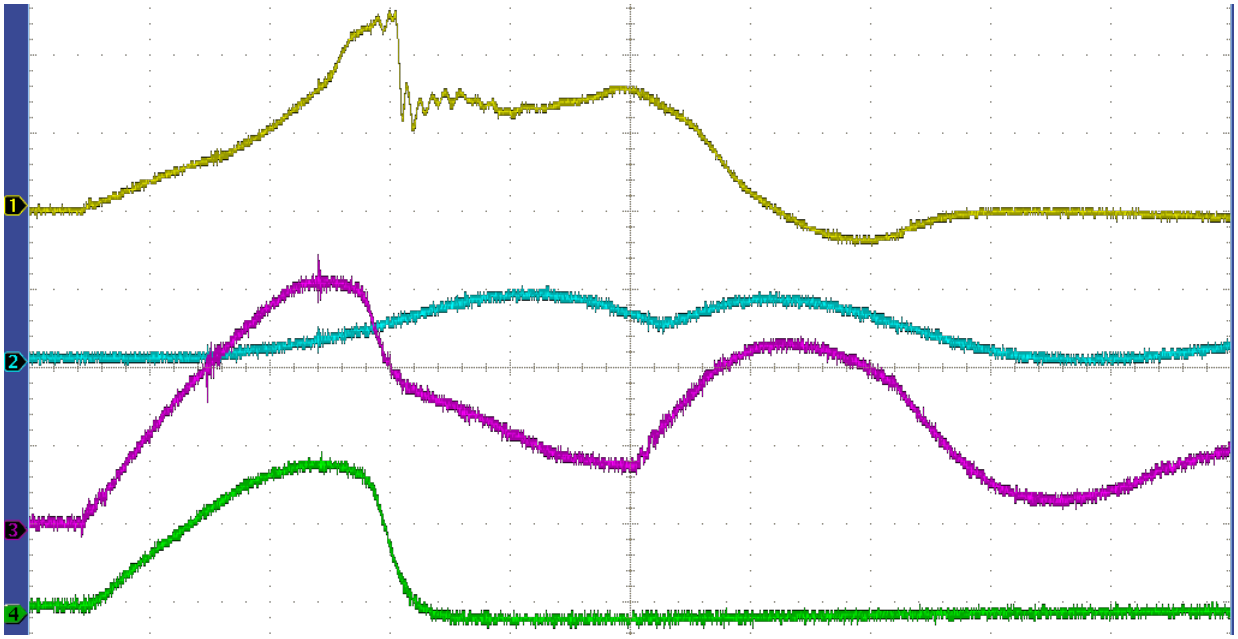


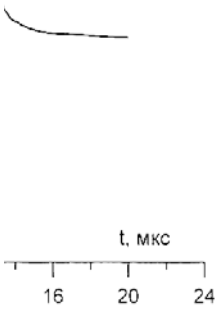
Рис. 21. Экспериментальные данные с включением обмотки сжатия.

Как видно из графиков, качественно картина остается той же, происходят лишь количественные изменения во времени жизни, связанные с уменьшением объема

плазмы. Однако, величина захватываемого потока больше, что связано, видимо, с гигиеническими качествами поверхности.

На рис. 21 представлены данные для большой камеры с включенной обмоткой обращения поля. Ток в этой обмотке не обрывался, поэтому видна осцилляция поля, однако рост магнитного поля показывает, что конфигурация сжимается.

Для сравнения приведены экспериментальные данные с установки ТОР, на которой формирование конфигурации происходило с обращением поля за счет осцилляции тока в соленоиде. Так же приведен график, показывающий уровень захватываемого потока.



а начальной стадии формирования КТ. n_0

Рис. 22. Захваченный магнитный поток на начальной стадии формирования КТ (до обращения поля).

8. Заключение.

Было проведено исследование формирования компактного тора с применением продольного тока. Этот метод формирования раньше не применялся и был испытан впервые. В результате проведенных экспериментов было показано, что этот метод позволяет существенно увеличить энерговложение в плазму.

Проведено теоретическое исследование возможности использования такой конфигурации в качестве плазменного двигателя. Показана принципиальная возможность.

Эксперименты проводились с использованием двух камер, выполненных из диэлектрических материалов, разного диаметра. Использование камеры большего диаметра дало ожидаемое увеличение времени жизни конфигурации. Эксперименты с малой камерой давали увеличение величины захватываемого магнитного потока, за счет лучших гигиенических качеств материала (кварц). Была разработана система

диагностики с использованием *B*-зондов для определения уровня захватываемого магнитного потока.

Список литературы

1. Ромаданов И.В., Рыжков С.В. О создании тяги за счет ускорения потока рабочего тела в магнитном плазменном двигателе с помощью магнитного сопла // Тезисы международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. С. 163-167. 2010.
2. Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Space propulsion based on high-beta magnetic fusion rocket, abstracts of 8th Int. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, 2010, P. 22.
3. Ромаданов И.В., Рыжков С.В. Теплофизические характеристики энергоустановки плазменного двигателя // Электронный сборник трудов № 0321001780. Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» 22-25 сентября 2010 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. Секция В1.
4. Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A., Progress in an Alternate Confinement System Called a FRC // Fusion Science and Technology. 2003. V. 43 (1T). P. 304–308.
5. Рыжков С.В. Обращенная магнитная конфигурация и приложения высокотемпературной плазмы FRC // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 47–54.
6. Куртмуллаев Р.Х., Малютин А.Н., Семенов В.И. Компактный тор // Итоги науки и техники. Физика плазмы. М.: ВИНИТИ Т. 7. С. 80-135. 1985.
7. L.C. Steinhauer, in *Proc. IEEE Symposium on Fusion Engineering*, Champaign, Illinois, 1-6 October 1995.
8. Kolb A.C. et al. Confinment of High Plasma with Shear in a Hard Core Theta Pinch. Proc. 3-rd Int. Conf. On Plasma Phys. And Contr. Fusion Res., Novosibirsk. 1968, IAEA, v.2. 567.
9. Семенов В.И. Математическое моделирование плазмы в системе компактный тор: Дис. доктора физ.-мат. наук. Москва, 2003. 272 с.
10. Ryzhkov S.V. Features of Formation, Confinement and Stability of the Field Reversed Configuration // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2002. № 4 (7). P. 73-75.
11. Three-dimensional MHD simulations of Counter-helicity spheromak merging in the Swarthmore Spheromak Experiment / C. E. Myers [et al.] PPPL-4684. 2011. 16 p.
12. Michiaki I., Katsuhisa K., and Shigefumi O. Field-Reversed Configuration Maintained by Rotating Magnetic Field with High Spatial Harmonics // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 4.

13. Мозговой А.Г. Способ получения компактных торов // Тезисы XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. Москва, 2009.
14. High Density Magnetized Toroid Formation and Translation with XOCOT: An Annular Field Reversed Configuration Plasma Concept / K.David [et al.] AFRL-PR-ED-TP-2007-387, 2007. 51 p.
15. Andrew F. Formation and Stability of Spheromak/Field Reversed Configuration (FRC) Hybrids in SSX-FRC // Ph.D. Thesis. Swarthmore College, 2003. 160 p.

electronic scientific and technical periodical
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS 77 - 30569. №0421100025. ISSN 1994-0408

Theoretical and experimental research of Field Reversed Configuration.

77-30569/322717

02, February 2012

Romadanov I.V.

Bauman Moscow State Technical University

The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

i.v.romadanov@gmail.com

The main aim of this work was the study of the process of formation of reverse-field magnetic configuration (RMC) and search of the way to increase the plasma's energy content at this stage. New method was proposed to manage this task; it suggested to form a compact tore. Experimental research of this method was carried out; it was shown that the usage of this scheme allowed to increase the efficiency of energy transfer from capacitors batteries into plasma. The main result was that method of RMC formation was experimentally confirmed. Efficiency of energy transfer up to 90% was achieved. The main distinctive feature of this method was a new technique of configuration formation. Obtained results could be applied to the research of possibility to use a compact tore configuration as a fundamental of fusion reactor that is the source of high-density plasma. Also the possibility of using RMC as a basis of a rocket engine was discussed. Various types of thrust were presented in this article. For a more detailed investigation of the properties of obtained plasma and possibilities of its application the future development of experimental set-up was needed.

Publications with keywords: compact torus, formation system, field reversed configuration, managed fusion

Publications with words: compact torus, formation system, field reversed configuration, managed fusion

Reference

1. Romadanov I.V., Ryzhkov S.V., On creation of thrust by accelerating the flow of working fluid in a magnetic plasma thruster using a magnetic nozzle, in: Proceedings of International Conference on Nonequilibrium Processes in Nozzles and Jets, 2010, pp. 63-167.
2. Romadanov I.V., Ryzhkov S.V., Space propulsion based on high-beta magnetic fusion rocket, in: Abstracts of 8th Int. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Novosibirsk, 2010, p. 22.
3. Romadanov I.V., Ryzhkov S.V., Thermophysical characteristics of power plant of a plasma engine, in: Proc. of the Third All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists,

"The Future of Engineering of Russia", September 22-25, 2010, Moscow, MGTU im. N.E. Baumana – BMSTU, Section B1, Electronic proceeding № 0321001780.

4. Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A., Progress in an Alternate Confinement System Called a FRC, Fusion Science and Technology V. 43 (1T) (2003) 304–308.
5. Ryzhkov S.V., Reversed magnetic configuration and the applications of high temperature plasma FRC, Prikladnaia fizika 1 (2010) 47–54.
6. Kurtmullaev R.Kh., Maliutin A.N., Semenov V.I., Compact torus, Itogi nauki i tekhniki. Ser. Fizika plazmy, Moscow, VINITI 7 (1985) 80-135
7. L.C. Steinhauer, in Proc. of IEEE Symposium on Fusion Engineering, Champaign, Illinois, October 1-6, 1995.
8. Kolb A.C., et al., Confinement of High Plasma with Shear in a Hard Core Theta Pinch, in: Proc. of the 3-rd Int. Conf. On Controlled and Plasma Physics, USSR, Novosibirsk, 1968, Plasma Physics And Controlled Nuclear Fusion Research, Vol.2, Vienna, IAEA, 1969, p. 567.
9. Semenov V.I., Mathematical modeling of the plasma in the compact torus (Ph Dr. Dissertation), Moscow, 2003, 272 p.
10. Ryzhkov S.V., Features of Formation, Confinement and Stability of the Field Reversed Configuration, Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Physics 7 (4) (2002) 73-75.
11. C. E. Myers, et al., Three-dimensional MHD simulations of Counter-helicity spheromak merging in the Swarthmore Spheromak Experiment, PPPL Technical Reports - 4684, 2011, 16 p.
12. Michiaki I., Katsuhisa K., Shigefumi O., Field-Reversed Configuration Maintained by Rotating Magnetic Field with High Spatial Harmonics, Phys. Rev. Lett. 99 (17) (2007) 175003 <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.99.175003>.
13. Mozgovoi A.G., A method of producing of compact tori, in: Abstracts of XXXVI International (Zvenigorod) conference on plasma physics and controlled thermonuclear fusion, Moscow, 2009.
14. K.David, et al., High Density Magnetized Toroid Formation and Translation with XOCOT: An Annular Field Reversed Configuration Plasma Concept, in: Proc. of the 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, Sept. 17-20, 2007, IEPC-2007-041.
15. Andrew F., Formation and Stability of Spheromak/Field Reversed Configuration (FRC) Hybrids in SSX-FRC (Ph.D. Thesis), Swarthmore College, 2003, 160 p.