

УДК 533.9

Термоядерные перспективы обращенной магнитной конфигурации: реакторные режимы

Чирков А. Ю.^{1,*}

[*chirkov@bmstu.ru](mailto:chirkov@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Обращенная магнитная конфигурация (Field Reversed Configuration, FRC) – магнитная ловушка для удержания термоядерной плазмы высокого давления. Высокая плотность выделения энергии в такой плазме привлекательна с точки зрения создания компактных реакторных систем. В работе рассматриваются параметры термоядерных реакторов на основе FRC с коэффициентом усиления мощности в плазме $Q > 10$ и источников термоядерных нейтронов с $Q < 1$ для гибридного термоядерно-ядерного реактора. С технической точки зрения возможные параметры реакторных FRC-систем выглядят приемлемо. Выполнены оценки термоядерных систем на топливе D–T (дейтерий-тритий) и D–³He (дейтерий-гелий-3). В системе с параметрами, близкими к параметрам установок сегодняшнего уровня, коэффициент мощности $Q \sim 0.1$ на D–T-топливе. Показано, что в случае D–T-реактора с $Q \sim 10$ тепловой и нейтронный потоки на первую стенку становятся неприемлемо высокими. В случае низкорadioактивного реактора на D–³He-топливе с $Q \sim 10$ уровень нейтронных и тепловых потоков приемлем с технической точки зрения. Реализация таких режимов в установках с разумными размерами, видимо, потребует применения техники формирования режимов улучшенного удержания (например, генерации сдвиговых течений).

Ключевые слова: обращенная магнитная конфигурация, термоядерный реактор, источник термоядерных нейтронов

Введение

Обращенная магнитная конфигурация (Field Reversed Configuration, FRC) – магнитная ловушка для удержания термоядерной плазмы высокого давления. Современные достижения в экспериментальной физике FRC [1] дают достаточно полную картину процессов в высокотемпературной плазме, которую возможно с определенной долей достоверности экстраполировать в область термоядерных параметров.

Высокая плотность выделения энергии в такой плазме привлекательна с точки зрения создания компактных реакторных систем. В особенности это важно для малорадиоактивных реакторов на топливе D–³He [2–7], так как скорость D–³He-реакции невысока по сравнению с D–T-реакцией.

В настоящей работе выполнен анализ термоядерных режимов FRC. Для условий термоядерных реакторов рассматриваются режимы с коэффициентом усиления мощности в плазме $Q \sim 10$. Также рассмотрена максимальная эффективность системы с параметрами,

близкими к параметрам сегодняшних экспериментальных установок FRC. Такие системы с $Q < 1$ представляют интерес в качестве прототипов источника термоядерных нейтронов для гибридного термоядерно-ядерного реактора, а также для материаловедческих приложений.

Главная цель работы – обоснование перспектив реализации систем термоядерного синтеза на основе FRC.

Описание модели для расчетов

Анализ базируется на моделях термоядерной плазмы в FRC [8–12]. В основе энергетического анализа лежат уравнения баланса энергии в следующем виде [4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_i k_B T_i \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \mathbf{J}_i)}{\partial r} = \alpha_i (P_{fus} - P_n) + h_i P_{ext} - P_{i-e}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k_B T_e \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \mathbf{J}_e)}{\partial r} = \alpha_e (P_{fus} - P_n) + h_e P_{ext} + \sum_i P_{i-e} - P_b - P_s. \quad (2)$$

Здесь n_j , T_j , \mathbf{J}_j и \mathbf{J}_j – концентрация, температура, поток частиц и поток энергии частиц сорта j ($j = i, e$); $[n_j]_S$ и $[n_j]_L$ – источники и стоки частиц; α_j – доля энергии заряженных продуктов, передаваемой частицам данного сорта; P_{fus} – мощность, выделяемая в единице объема при протекании термоядерных реакций; P_n – мощность, выделяемая с нейтронами; P_{ext} – мощность внешнего нагрева; h_i и h_e – доли мощности внешнего нагрева, поглощаемые ионами и электронами, соответственно; P_{i-e} – мощность, передаваемая от ионов к электронам при столкновениях; P_b – мощность тормозного излучения; P_s – мощность циклотронного излучения.

Потоки энергии связаны с потоками частиц приближенными соотношениями

$$\mathbf{J}_i \approx \frac{3}{2} k_B T_i \left(-D_{\perp} \frac{\partial n_i}{\partial r} \right), \quad \mathbf{J}_e \approx \frac{3}{2} k_B T_e \left(-D_{\perp} \frac{\partial n_e}{\partial r} \right).$$

Предполагается, что поддержание тока обеспечивается вводом в плазму необходимого количества частиц и нагревом. Предпочтительным методом нагрева, видимо, является инжекция быстрых частиц. Также могут быть использованы методы нагрева радиоизлучением (ВЧ или СВЧ).

Наиболее критической проблемой моделирования FRC является проблема турбулентного транспорта плазмы поперек магнитных силовых линий. Для моделирования транспорта был разработан подход на основе взаимодействия частиц плазмы и колебаний, связанных с развитием неустойчивостей [13–16]. Основываясь на численных результатах, полученных в рамках теории электромагнитных градиентных дрейфовых неустойчивостей [17–20], примем для коэффициента диффузии теоретическую оценку, соответствующую оценке сверху [4]

$$D_{\perp theor} = 0.1 \frac{\rho_{Ti}}{L_n} \frac{k_B T_i}{e B_e}, \quad (3)$$

где значения ρ_{Ti} , L_n и T_i соответствуют слою плазмы, прилегающему к сепаратрисе изнутри.

В результате анализа энергобаланса может быть определено требуемое время удержания. По его значению определяется значение коэффициента диффузии $D_{\perp req}$. Фактор улучшения удержания определим как отношение

$$H_D = D_{\perp theor} / D_{\perp req}. \quad (4)$$

Эта величина является основным критерием оптимизации. Снизить коэффициент диффузии можно за счет генерации сдвигового вращения плазмы вблизи сепаратрисы. В этом случае фактор улучшения удержания $H_D \approx 1 + (\gamma_s / \gamma)^2$, где γ_s – параметр сдвига, γ –

характерное значение инкремента неустойчивости. В условиях FRC возможно поддержание профиля давления, обеспечивающего значения параметра сдвига до $\gamma_s \approx 3\gamma$. Поэтому приемлемым требованием по улучшению удержания можно считать снижение коэффициента диффузии в $H_D = 10$ раз по сравнению с режимом без сдвига скорости. Отметим, что, по нашей модели, это соответствует увеличению времени удержания всего в 3–4 раза.

По результатам предварительного анализа оптимальных режимов, примем $B_e = 5$ Тл, $a = 2$ м для D–³He-реактора и $B_e = 2$ Тл, $a = 1$ м для D–T-реактора. Этим значениям соответствуют произведения $B_e a$, которые ниже, чем значения, соответствующие критерию [21] практически стопроцентного удержания продуктов реакций, но они обеспечивают удержание подавляющего большинства термоядерных продуктов. Примем начальные потери быстрых продуктов равными 5 % от их общего числа.

В качестве метода внешнего нагрева плазмы наиболее предпочтительна инжекция быстрых нейтральных частиц. Энергию инжектируемых частиц примем 200 кэВ. В этом случае инжектируемые частицы передают энергию практически только ионам. Энергия, выделяемая в результате термоядерных реакций, передается в основном электронам, так как энергии термоядерных продуктов превышают несколько МэВ (начальная энергия D–³He-протонов равна 14 МэВ), а при таких энергиях доминирует процесс замедления на электронах. Отметим, что за счет излучения потери энергии по электронному каналу значительно превышают потери по ионному каналу. Мощность нагрева от термоядерных и инжектируемых частиц также в большей части также подводится к электронам. В таких условиях расчеты энергобаланса показали, что разность температур ионов и электронов $\Delta T = T_i - T_e \sim 1$ кэВ. Поэтому температуры ионов и электронов можно принять равными $T_e = T_i$. Коэффициент отражения стенкой циклотронного излучения принят $\Gamma_s = 0.8$. В качестве покрытия первой стенки наиболее предпочтителен жидкий литий (стабилизированный капиллярно-пористой структурой) [22].

Результаты расчетов

Рассматривались режимы термоядерного реактора с плазменным коэффициентом усиления $Q = 20$ (Q – отношение термоядерной мощности к мощности внешнего нагрева).

Результаты расчетов представлены в таблице. Варианты FRC-1 и FRC-2 – реакторы на D–³He-топливе. Чтобы показать преимущества FRC как системы для малорадиоактивного D–³He-реактора, были проведены расчеты систем с D–T-топливом. Вариант FRC-3 соответствует параметрам D–T-реактора, вариант FRC-4 – параметрам экспериментальной системы с размерами и магнитными полями, близкими к современным установкам FRC.

В таблице приведены следующие величины: радиус сепаратрисы a ; длина L ; вытянутость плазмы k ; объем плазмы V ; магнитная индукция на внутренней поверхности стенки B_e ; значение бета на сепаратрисе β_s и среднее бета $\langle\beta\rangle$; средняя концентрация электронов $\langle n_e \rangle$; температура плазмы на магнитной оси T_0 и ее среднее значение $\langle T \rangle$; относительные концентрации компонентов плазмы $x_{\text{He}}, x_{\text{T}}, x_{\text{p}}, x_{\alpha}, x_{\text{Li}}$ в единицах концентрации дейтерия; тепловая энергия плазмы E_{th} ; термоядерная мощность W_{fus} ; мощность в нейтронах W_n , мощность тормозного излучения W_b ; мощность циклотронных потерь W_s ; суммарные потери на излучение W_{rad} ; мощность внешнего нагрева W_{aux} ; плазменный коэффициент усиления Q ; времена удержания α -частиц τ_α и протонов τ_p ; время удержания энергии τ_E ; фактор улучшения удержания H_D ; средний поток энергии нейтронов из плазмы J_n ; средний тепловой поток из плазмы J_H .

Таблица. Параметры реактора на основе FRC с D-³He-топливом (варианты FRC-1, FRC-2) и D-T-топливом (FRC-3, FRC-4)

Параметр	D- ³ He FRC-1	D- ³ He FRC-2	D-T FRC-3	D-T FRC-4
a , м	2.0	2.5	1.5	0.5
L , м	20	20	15	2.5
$k = L/a$	10	8	10	5
V , м ³	240	375	101	1.9
B_e , Тл	5.0	5.0	2.0	1.0
β_s	0.80	0.50	0.50	0.8
$\langle\beta\rangle$	0.93	0.83	0.83	0.93
$\langle n_e \rangle$, 10 ²⁰ м ⁻³	5.0	4.6	3.4	1.2
$T_{i0}/\langle T_i \rangle$, кэВ/кэВ	67/64	67/59	12/10.6	10/9.5
x_{3He}	1	1	–	–
x_T	0.0064	0.0059	1	1
x_p	0.16	0.13	–	–
x_α	0.34	0.28	0.072	0.0058
x_{Li}	0.05	0.05	0.05	0.05
E_{th} , МДж	3140	4380	190	1.0
W_{fus} , МВт	1214	1670	1070	1.57
W_n , МВт (W_n/W_{fus})	65 (0.054)	92 (0.055)	860 (0.80)	1.26 (0.80)
W_b , МВт (W_b/W_{fus})	628 (0.52)	859 (0.51)	32 (0.04)	0.05 (0.03)
W_s , МВт (W_s/W_{fus})	22 (0.017)	67 (0.040)	≈ 0	≈ 0
W_{rad} , МВт (W_{rad}/W_{fus})	670 (0.54)	926 (0.55)	32 (0.04)	0.05 (0.03)
P_{aux} , МВт (W_{aux}/W_{fus})	60 (0.05)	84.5 (0.05)	53.5 (0.05)	15.7 (10)
Q	20	20	20	0.1
τ_a , с	20	20	3	0.3
τ_p , с	10	10	–	–
τ_E , с	6.3	6.7	0.84	0.06
H_D	2.8	10	10	1.6
J_n , МВт/м ²	0.26	0.29	6.1	0.16
J_H , МВт/м ²	2.8	3.2	6.3	0.17

Как показали расчеты, в D-³He-реакторе на основе FRC поток энергии нейтронов из плазмы сравнительно невысок (< 0.3 МВт/м²), так, что может быть обеспечена достаточно длительная ее работа без замены. Тепловой поток (около 3 МВт/м²) также вполне приемлем для стенки с жидким литием. В D-T-реакторе потоки энергии на первую стенку сравнительно высоки. Кроме того, в случае использования D-T-топлива, как и в случае D-³He-топлива, требуется существенное улучшение удержания. Поэтому энергетические преимущества D-T-реакции в условиях FRC в значительной степени нивелированы.

В концептуальном проекте FRC-реактора на D-³He-топливе ARTEMIS [23] рассмотрена возможная конструктивная схема, включая системы преобразования энергии, а также рассчитана себестоимость вырабатываемого электричества, показана конкурентоспособность электростанции. Один из серьезных вопросов физики FRC связан с аномальным переносом в FRC и вызывающими его причинами. В частности, в проекте ARTEMIS запас по аномальному транспорту предполагается таким, что время удержания примерно в 200 раз меньше классического значения. Величина нейтронного потока в ARTEMIS около 0.3 МВт/м².

На основе установки FRC с размерами и магнитными полями уровня сегодняшних экспериментов можно создать термоядерную систему с $Q = 0.1$ при работе на D-T-топливе. Отметим, что температура плазмы для этого должна быть увеличена до 10 кэВ. Для этого требуется комплекс систем нагрева, вводящий в плазму суммарную мощность около 16 МВт. Это не является слишком большой величиной для сегодняшних термо-

ядерных установок. Установка с $Q = 0.1$ может найти применение как компактный источник термоядерных нейтронов. Величина потока энергии нейтронов 0.16 МВт/м^2 является вполне подходящей для этих целей.

Заключение

В качестве реактора с $D-^3\text{He}$ -топливом FRC, на наш взгляд, обладает очевидными преимуществами. Для полного физического обоснования концепции такого реактора, безусловно, необходима экспериментальная проверка предсказаний моделирования транспорта в условиях, близких к термоядерному реактору. Для этого необходимы эксперименты на установках FRC нового поколения или модернизация существующих установок. В результате может быть уточнена зависимость времени удержания от параметров системы, а также продемонстрирована возможность поддержания режимов улучшенного удержания. В нашей модели причиной транспорта считается развитие дрейфовых неустойчивостей, т.е. принят стандартный для магнитных ловушек механизм аномального транспорта. Расчеты показывают, что, видимо, потребуется улучшение удержания по сравнению с предсказаниями теории. Для этого могут быть использованы методы генерации сдвиговых течений, которые неоднократно были продемонстрированы при создании транспортных барьеров в различных магнитных ловушках. В FRC существуют все условия для генерации таких течений.

Кроме того, существует также возможность увеличения времени удержания без уменьшения коэффициента поперечной диффузии. В соответствии с разработанной для FRC моделью транспорта, удержание плазмы внутри сепаратрисы зависит не только от времени поперечного транспорта, но и от времени продольного удержания. Сравнительно небольшой электростатический барьер на торцах системы может поддерживаться за счет инжекции быстрых частиц.

Практическое использование магнитной ловушки на основе FRC как термоядерной системы (источник $D-T$ -нейтронов) возможно уже для модернизированных установок сегодняшнего уровня. Наиболее существенное условие реализации таких систем – повышение мощности нагрева до десятков мегаватт при энергосодержании плазмы 1 МДж . Возможность стационарного или квазистационарного режима работы для таких устройств зависит от длительности рабочего импульса системы нагрева. Согласно нашим оценкам, в такой системе $\tau_E \sim 0.1 \text{ с}$, что можно рассматривать как минимальную требуемую длительность импульса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, задание № 13.2573.2014/К.

Список литературы

1. Steinhauer L.C. Review of field-reversed configurations // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18. Art. no. 070501 (38 pp.). DOI: [10.1063/1.3613680](https://doi.org/10.1063/1.3613680)
2. Хвесьюк В.И., Чирков А.Ю. Производство энергии в амбиполярных реакторах с $D-T$, $D-^3\text{He}$ и $D-D$ топливными циклами // Письма в Журнал технической физики. 2000. Т. 26, № 21. С. 61–66.
3. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Low-radioactivity $D-^3\text{He}$ fusion fuel cycles with ^3He production // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. Vol. 44, no. 2. P. 253–260.
4. Чирков А.Ю. Энергетическая эффективность альтернативных термоядерных систем с магнитным удержанием плазмы // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4, № 11–12. С. 1050–1059.

5. Чирков А.Ю. О возможности использования $D-^3\text{He}$ -цикла с наработкой ^3He в термоядерном реакторе на основе сферического токамака // Журнал технической физики. 2006. Т. 76, № 9. С. 51–54.
6. Чирков А.Ю. Малорадиоактивный термоядерный реактор на основе сферического токамака с сильным магнитным полем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/167577.html> (дата обращения 01.11.2014).
7. Chirkov A.Yu. Low radioactivity fusion reactor based on the spherical tokamak with a strong magnetic field // Journal of Fusion Energy. 2013. Vol. 32, no. 2. P. 208–214.
8. Хвесьюк В.И., Чирков А.Ю. Параметры реактора с обращенным магнитным полем в режиме низкочастотных аномальных потерь // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2000. Вып. 3. С. 17–27.
9. Чирков А.Ю. Оценка параметров плазмы в $D-^3\text{He}$ -реакторе на основе обращенной магнитной конфигурации // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2006. Вып. 4. С. 57–67.
10. Чирков А.Ю. О скейлингах для времени удержания плазмы в обращенной магнитной конфигурации // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 31–36.
11. Чирков А.Ю., Бендерский Л.А., Бердов Р.Д., Большакова А.Д. Модель транспорта в квазиравновесных обращенных магнитных конфигурациях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. № 4. С. 15–27.
12. Бендерский Л.А., Чирков А.Ю. Эволюция глобальной структуры плазмы обращенной магнитной конфигурации в режимах турбулентного транспорта // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т. 14, вып. 2. Режим доступа: <http://chemphys.edu.ru/article/328/> (дата обращения 01.11.2014).
13. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Stochastic drift wave model for anomalous transport in tandem mirror and FRC // Fusion Technol. 2001. Vol. 39, no. 1T. P. 398–401.
14. Хвесьюк В.И., Чирков А.Ю., Ковалев А.В. Некоторые особенности стохастической динамики частиц в замагниченной плазме // Физика плазмы. 2002. Т. 28, № 9. С. 854–857.
15. Хвесьюк В.И., Чирков А.Ю. Анализ закономерностей рассеяния частиц плазмы на нестационарных флуктуациях // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, № 4. С. 18–26.
16. Чирков А.Ю. О влиянии слабых электростатических возмущений на траектории пролетных частиц в магнитном поле токамака // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, № 12. С. 47–51.
17. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Peculiarities of Collisionless Drift Instabilities in Poloidal Magnetic Configurations // Plasma Physics Reports. 2010. Vol. 36, no. 13. P. 1112–1119. DOI: [10.1134/S1063780X10130052](https://doi.org/10.1134/S1063780X10130052)
18. Chirkov A.Yu., Khvesyuk V.I. Electromagnetic drift instabilities in high-beta plasma under conditions of a field reversed configuration // Phys. Plasmas. 2010. Vol. 17, no. 1. Art. no. 012105 (8 pp.). DOI: [10.1063/1.3283399](https://doi.org/10.1063/1.3283399)
19. Чирков А.Ю., Хвесьюк В.И. Особенности бесстолкновительных градиентных дрейфовых неустойчивостей в плазме с сильно неоднородным магнитным полем и высоким бета // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 5. С. 473–483.
20. Chirkov A.Yu. The effect of trapped particles on gradient drift instabilities in finite pressure plasma with longitudinally nonuniform magnetic field // J. Fusion Energy. 2014. Vol. 33, no. 2. P. 139–144. DOI: [10.1007/s10894-013-9649-2](https://doi.org/10.1007/s10894-013-9649-2)
21. Божокин С.В. Об удержании альфа-частиц в установках типа компактный тор // Физика плазмы. 1986. Т. 12. С. 1292–1296.
22. Mirnov S.V., Azizov E.A., Alekseev A.G., Lazarev V.B., Khayrutdinov R.R., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Vershkov V.A. Li experiments on T-11M and T-10 in support of a

- steady-state tokamak concept with Li closed loop circulation // Nuclear Fusion. 2011. Vol. 51, no. 7. Art. no. 073044 (9 pp.). DOI: [10.1088/0029-5515/51/7/073044](https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/7/073044)
23. Momota H., Ishida A., Kohzaki Y., Miley G.H., Ohi S., Ohnishi M., Sato K., Steinhauer L.C., Tomita Y., Tuszewski M. Conceptual design of D-³He FRC reactor ARTEMIS // Fusion Technol. 1992. Vol. 21. P. 2307–2323.

Fusion Prospects of the Field Reversed Magnetic Configuration: Reactor Regimes

A.Yu. Chirkov^{1,*}

*chirkov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: field reversed configuration, fusion reactor, fusion neutron source

Field Reversed Configuration (FRC) is the magnetic trap with a high ratio of plasma pressure to the magnetic pressure (beta ratio ~ 1). FRC combines the properties of closed and open magnetic traps. High β potentially allows us to achieve high power in a relatively compact system. For D–³He fueled fusion systems, high β is required for energy efficiency. The main advantage of D–³He reaction as compared to D–T reaction is the ability to operate with neutron yield of about 5 %, which is significantly lower than 80 % in the D–T reactor. From a technical point of view, the possible parameters of FRC reactors seem to be acceptable. From the point of view of the FRC fusion prospects, the greatest problem is the evaluation of turbulent transport. The article presents estimates of fusion systems with D–T and D–³He fuel. A system with parameters close to those of today's devices, has a power gain factor $Q \sim 0.1$ for D–T fuel. Such a system can be considered as a source of thermonuclear neutrons. In the fusion regimes with $Q \sim 10$, there are unacceptably high heat and neutron fluxes to the first wall. In case of low-radioactivity D–³He reactor, neutron flux $< 0.3 \text{ MW/m}^2$, heat flux $\sim 3 \text{ MW/m}^2$. Regimes with $Q > 10$ at plasma radius of 2–2.5 m, require using a technique to form an improved confinement regime (for example, generation of shear flows). Presented results allow us to reach a valid conclusion concerning the prospects of fusion systems based on FRC.

References

1. Steinhauer L.C. Review of field-reversed configurations. *Phys. Plasmas*, 2011, vol. 18, art. no. 070501 (38 pp.). DOI: [10.1063/1.3613680](https://doi.org/10.1063/1.3613680)
2. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Energy production in ambipolar reactors with D-T, D-3He, and D-D fuel cycles. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2000, vol. 26, no. 21, pp. 61–66. (English translation: *Technical Physics Letters*, 2000, vol. 26, is. 11, pp. 964-966. DOI: [10.1134/1.1329685](https://doi.org/10.1134/1.1329685)).
3. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Low-radioactivity D–³He fusion fuel cycles with ³He production. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2002, vol. 44, no. 2, pp. 253–260.
4. Chirkov A.Yu. Energy efficiency of alternative fusion systems with magnetic confinement. *Yadernaya fizika i inzhiniring = Nuclear Physics and Engineering*, 2013, vol. 4, no. 11–12, pp. 1050–1059. (in Russian).
5. Chirkov A.Yu. Possibility of utilizing the D-3He fuel cycle with ³He production in a spherical tokamak reactor. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2006, vol. 76, no. 9, pp. 51–54. (English translation: *Technical Physics*, 2006, vol. 51, is. 9, pp. 1158-1162. DOI: [10.1134/S1063784206090088](https://doi.org/10.1134/S1063784206090088)).

6. Chirkov A.Yu. Low-radioactivity fusion reactor based on a spherical tokamak with a strong magnetic field. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 3. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/167577.html> , accessed 01.11.2014. (in Russian).
7. Chirkov A.Yu. Low radioactivity fusion reactor based on the spherical tokamak with a strong magnetic field. *Journal of Fusion Energy*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 208–214.
8. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Parameters of field reversed configuration reactor in the low frequency anomalous losses regime. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyy sintez = Problems of atomic science and technology. Ser. Thermonuclear fusion*, 2000, no. 3, pp. 17–27. (in Russian).
9. Chirkov A.Yu. Estimation of plasma parameters for D-3He reactor based on field reversed magnetic configuration. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyy sintez = Problems of atomic science and technology. Ser. Thermonuclear fusion*, 2006, no. 4, pp. 57–67. (in Russian).
10. Chirkov A.Yu. About scalings for plasma confinement time in the field reversed magnetic configuration. *Prikladnaya fizika*, 2007, no. 2, pp. 31–36. (in Russian).
11. Chirkov A.Yu., Benderskiy L.A., Berdov R.D., Bol'shakova A.D. Model of Transport in Quasi-Equilibrium Field-Reversed Configurations. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye nauki = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Natural science*, 2011, no. 4, pp. 15–27. (in Russian).
12. Benderskiy L.A., Chirkov A.Yu. Evolution of the global plasma structure of field reversed configuration in the turbulent transport regimes. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike*, 2013, vol. 14, no. 2. Available at: <http://chemphys.edu.ru/article/328/> , accessed 01.11.2014. (in Russian).
13. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Stochastic drift wave model for anomalous transport in tandem mirror and FRC. *Fusion Technol.*, 2001, vol. 39, no. 1T, pp. 398–401.
14. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu., Kovalev A.V. Some features of the stochastic particle dynamics in a magnetized plasma. *Fizika plazmy*, 2002, vol. 28, no. 9, pp. 854–857. (English translation: *Plasma Physics Reports*, 2002, vol. 28, is. 9, pp. 787-789. DOI: [10.1134/1.1508031](https://doi.org/10.1134/1.1508031)).
15. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Analysis of the mechanisms for the scattering of plasma particles by non-steady-state fluctuations. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2004, vol. 74, no. 4, pp. 18–26. (English translation: *Technical Physics*, 2004, vol. 49, is. 4, pp. 396-404. DOI: [10.1134/1.1736904](https://doi.org/10.1134/1.1736904)).
16. Chirkov A.Yu. Influence of weak electrostatic perturbations on the trajectories of circulating particles in a tokamak magnetic field. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2004, vol. 74, no. 12, pp. 47–51. (English translation: *Technical Physics*, 2004, vol. 49, is. 12, pp. 1586-1590. DOI: [10.1134/1.1841407](https://doi.org/10.1134/1.1841407)).
17. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu. Peculiarities of Collisionless Drift Instabilities in Poloidal Magnetic Configurations. *Plasma Physics Reports*, 2010, vol. 36, no. 13, pp. 1112–1119. DOI: [10.1134/S1063780X10130052](https://doi.org/10.1134/S1063780X10130052)
18. Chirkov A.Yu., Khvesyuk V.I. Electromagnetic drift instabilities in high-beta plasma under conditions of a field reversed configuration. *Phys. Plasmas*, 2010, vol. 17, no. 1, art. no. 012105 (8 pp.). DOI: [10.1063/1.3283399](https://doi.org/10.1063/1.3283399)
19. Chirkov A.Yu., Khvesyuk V.I. Distinctive features of collisionless gradient drift instabilities in a high- β plasma in a highly nonuniform magnetic field. *Fizika plazmy*, 2011, vol. 37, no. 5, pp. 473–483. (English translation: *Plasma Physics Reports*, 2011, vol. 37, is. 5, pp. 437-446. DOI: [10.1134/S1063780X11040039](https://doi.org/10.1134/S1063780X11040039)).
20. Chirkov A.Yu. The effect of trapped particles on gradient drift instabilities in finite pressure plasma with longitudinally nonuniform magnetic field. *Journal of Fusion Energy*, 2014, vol. 33, no. 2, pp. 139–144. DOI: [10.1007/s10894-013-9649-2](https://doi.org/10.1007/s10894-013-9649-2)

21. Bozhokin S.V. On the alpha particle confinement in compact toroid devices. *Fizika plazmy*, 1986, vol. 12, pp. 1292–1296. (in Russian).
22. Mirnov S.V., Azizov E.A., Alekseev A.G., Lazarev V.B., Khayrutdinov R.R., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Vershkov V.A. Li experiments on T-11M and T-10 in support of a steady-state tokamak concept with Li closed loop circulation. *Nuclear Fusion*, 2011, vol. 51, no. 7, art. no. 073044 (9 pp.). DOI: [10.1088/0029-5515/51/7/073044](https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/7/073044)
23. Momota H., Ishida A., Kohzaki Y., Miley G.H., Ohi S., Ohnishi M., Sato K., Steinhauer L.C., Tomita Y., Tuszewski M. Conceptual design of D–³He FRC reactor ARTEMIS. *Fusion Technol.*, 1992, vol. 21, pp. 2307–2323.