

ОЦЕНКА ВКЛАДА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БАЛАНС ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ РАЗНЫХ ТОПЛИВ

М.Д. Секачѐва

marymaya2003@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Тормозные потери в тепловом балансе высокотемпературной плазмы представляют собой мягкое рентгеновское излучение, которое не может быть прямо преобразовано в электричество, как это возможно в случае энергии заряженных частиц или циклотронного излучения. Тормозное излучение является основным механизмом излучения при температуре реактора в несколько килоэлектронвольт. Для рабочих температур реакторов на альтернативном топливе выполнены расчеты тормозного излучения релятивистских электронов и получены аппроксимирующие формулы. Приведены зависимости радиационных потерь от радиуса мишени и объемной мощности тормозного излучения сжимаемой плазмы от геометрических параметров мишени, построены их графики, выполнен сравнительный анализ. При сравнении основных типов термоядерных систем с различной магнитной конфигурацией сделаны выводы об эффективности каждой из них, выявлены наиболее энергетически полезные системы.

Ключевые слова

Заряженные частицы, плазма, рентген, тепловой баланс, энергетическая установка, тормозное излучение, циклотронное излучение, релятивистский эффект

Поступила в редакцию 31.05.2023
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

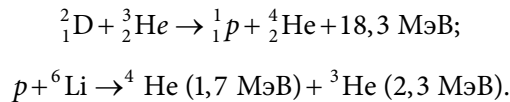
Введение. При обжатии мишени плазменным/твердым лайнером или пучками/струями и практически адиабатном нагреве до условий термоядерного горения магнитное поле сжимается вместе с мишенью и его индукция увеличивается примерно до 100 Тл. Сжатие считается почти адиабатическим из-за наличия этого магнитного поля, сдерживающего электронную и тепловую проводимость, вследствие чего радиационные потери уменьшаются на несколько порядков; плотность плазмы в центре остается относительно низкой, поэтому потери из-за тормозного излучения малы.

В работе рассмотрены процессы, протекающие в системе с плазменными струями. При проведении расчетов основных параметров баланса мощностей сделан вывод, что характеристики магнитной конфигурации могут существенно влиять на удержание плазменного ядра и соответственно на энергетические данные системы. Это говорит о том, что энергоэффективность и мощность всей системы зависят от вида протекающей термоядерной реакции. Одними из глав-

ных удельных потерь в тепловом балансе плазменного ядра являются радиационные потери P_{rad} .

Температура служит мерой средней кинетической энергии частиц. Поэтому, согласно соотношению температуры и энергии частиц в одноатомном газе $\left(E = \frac{3}{2}kT\right)$, температура, аналогично энергии, может быть выражена в электронвольтах. Тормозное излучение является основным механизмом излучения при температурах несколько килоэлектронвольт (кэВ) и может быть оценено с хорошей точностью как для надтепловых частиц, так и для нетепловых электронов [1–5].

Рассмотрим следующие термоядерные реакции, в которых ни среди топлива, ни среди продуктов синтеза нет радиоактивных элементов:



Последняя реакция протекает с выделением 4,02 МэВ энергии, в результате нее возможна наработка изотопа гелия (${}^3\text{He}$) в земных условиях.

Тепловой баланс. Баланс мощностей плазменного ядра можно описать следующим выражением:

$$P_{fus} + P_{in} = P_q + P_n + P_b + P_s,$$

где P_{fus} — термоядерная мощность; P_{in} — инжекция (дополнительный нагрев); P_q — потери энергии заряженных частиц за счет диффузии; P_n — мощность нейтронов; P_b — тормозное излучение; P_s — циклотронные радиационные потери.

Удельное значение (на единицу объема) мощности синтеза, соответствующей термоядерному энерговыделению, может быть представлено как

$$P_{fus} = \left(\frac{\beta B^2}{2\mu_0}\right)^2 \langle\sigma_v\rangle \frac{E_f}{T^2 Z^2},$$

где $\beta = \frac{p(r)}{B_e^2/2\mu_0}$ — отношение давления плазмы к давлению внешнего магнитно-

го поля; B — магнитная индукция, Тл; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная; $\langle\sigma_v\rangle$ — скорость термоядерной реакции; E_f — энергия конкретной реакции синтеза, МэВ; T — температура, эВ; Z — зарядовое число.

Удельное тормозное излучение (излучение при торможении электрона на других частицах) с учетом релятивистской поправки равно определялось как [6]

$$P_b = 0,00536n_e^2 \sqrt{T_e} \left[z_{eff} + (0,00155z_{eff} + 0,00414)T_e + 7,15 \cdot 10^{-6} \cdot z_{eff} T_e^2 + 0,071z_{2eff} / \sqrt{T_e} \right].$$

где n_e — концентрация электронов, см^{-3} ; T_e — температура электронов, эВ; z_{eff} — зарядовое число электронов.

Радиационные потери складываются из тормозного и циклотронного излучения:

$$P_{rad} = P_b + P_s.$$

Рис. 1 иллюстрирует радиационные потери для магнитной ловушки (а конкретно — компактного тора) в зависимости от радиуса сжимающейся замагниченной мишени. Температура и концентрация мишени возрастают по мере ее сжатия, как показано в [7], согласно зависимостям $T = T_0(V_0/V)^{\gamma-1}$ и $n = n_0(V_0/V)$, где T_0 , V_0 и n_0 — начальная температура, объем и концентрация плазменной конфигурации (мишени). В частном случае при отсутствии потерь энергии из плазмы давления газовой и магнитной составляющих изменяются по адиабатическому закону с показателями адиабаты для газа $\gamma = 5/3$ и магнитного поля $\gamma = 4/3$ (случай изотропного сферического сжатия) [8]. Мощность тормозного излучения показана на рис. 2.

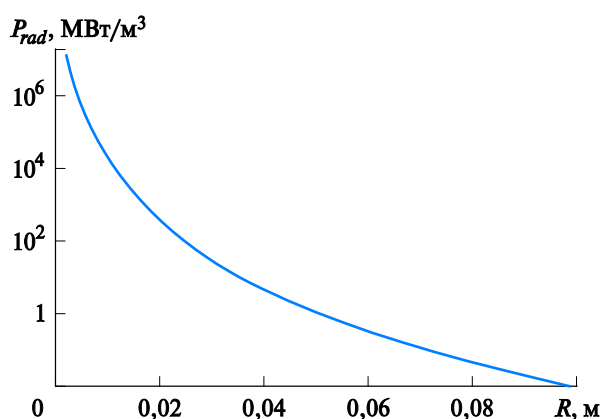


Рис. 1. Зависимость радиационных потерь плазмы компактного тора от радиуса мишени R

Потери на циклотронное излучение пренебрежимо малы по сравнению с остальными, особенно для систем с высоким β , что характерно для компактных систем, таких как тор или пробкотрон. Поэтому данный вид энергии принят равным нулю, т. е. $P_{rad} = P_{br}$.

Начальные параметры мишени $T_0 = 2$ эВ, $n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$

Коэффициент поглощения лазерного излучения χ_ω , см^{-1} , определяется с использованием механизма континуального поглощения, обратного механизму тормозного излучения электронов в условиях локального термодинамического равновесия:

$$\chi_{\omega} = \frac{4,97 g Z_i n_i n_e}{n_c^2 \lambda^2 (kT_e)^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{1 - n_e/n_c}},$$

где g — фактор Гаунта; Z_i — зарядовое число ионов; n_i, n_e — концентрации ионов и электронов, см^{-3} ; $n_c = 10^{21} \cdot \lambda^{-2}$ — критическая концентрация электронов, см^{-3} ; λ — длина волны излучения лазера, мкм; kT_e — электронная температура, кэВ.

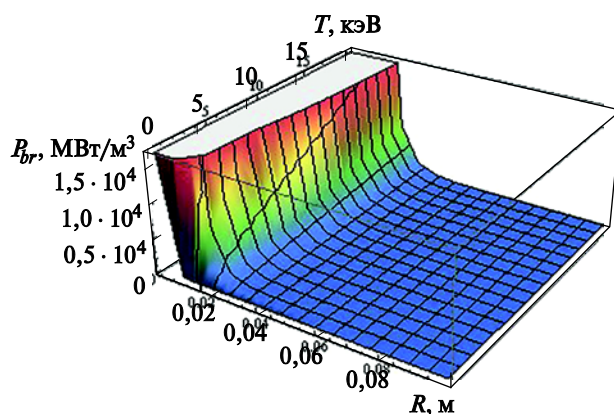


Рис. 2. Зависимость объемной мощности тормозного излучения сжимаемой плазмы от параметров мишени:
 R — радиус замагниченной плазмы; T — ее температура

Далее представлены сравнительные характеристики для $D-^3\text{He}$ -плазмы (толстые линии) и цикла $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ (тонкие). Специально отобраны два крайних случая: минимальные и максимальные (из рассматриваемого диапазона) значения параметров магнитного поля B и β .

Как следует из рис. 3–5, $D-^3\text{He}$ -плазма обладает бóльшим энерговыделением по сравнению с $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ -смесью, причем в последнем цикле присутствуют большие потери на излучение. Т. е. в любом случае с энергетической точки зрения термоядерный $D-^3\text{He}$ -цикл более перспективен. Но для вывода о преимуществе того или иного топлива нужно рассматривать модель реактора со всеми затратами и полной оценкой его энергетической эффективности.

На рис. 4 видно, что и для $D-^3\text{He}$ -плазмы и для комплекса $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ существуют области, где $\xi = P_{\text{rad}}/P_{\text{fus}} < 1$. Для $D-^3\text{He}$ это диапазон до 190 кэВ, а с ^6Li — до 90 кэВ. Значит, зажигание цикла реакций $D, ^3\text{He}, ^6\text{Li}$ и его использование в термоядерном синтезе теоретически возможно.

Это же доказывает и следующий график. Здесь уже для $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ плазмы $\xi < 1$ в области до 200 кэВ. Хотя, как видно из рис. 5, при данных значениях B и β получаются огромные значения удельных мощностей и это усложняет задачу, но при этом расширяется диапазон применимости $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ -цикла.

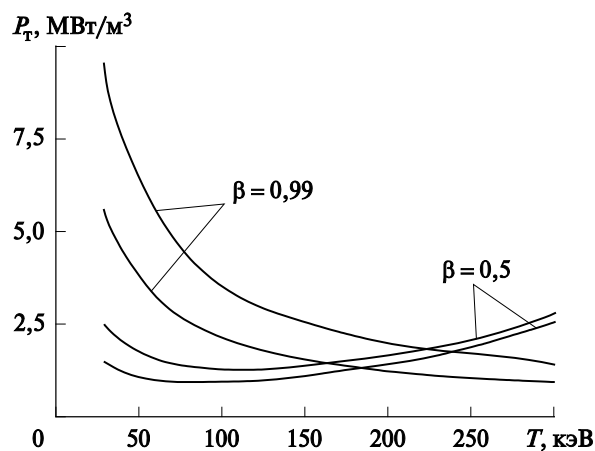


Рис. 3. Зависимость потерь на тормозное и циклотронное излучение от температуры плазмы [8]

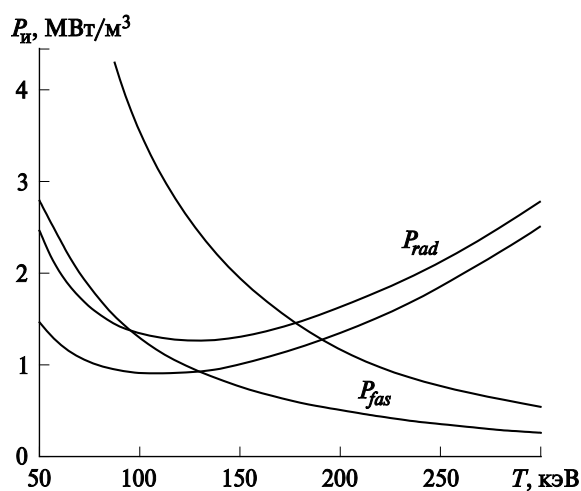
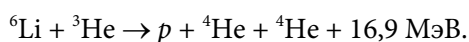
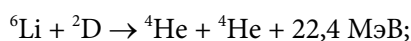
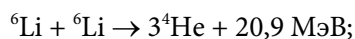
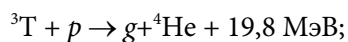


Рис. 4. Сравнение удельного энерговыделения и потерь на излучение для $V = 5$ Тл и $\beta = 0,5$ [8]

Отметим, что кроме перечисленных выше были рассмотрены следующие реакции синтеза:



Их вклад в энергетические характеристики плазмы также может быть учтен, но он относительно мал (по сравнению с $\text{D}-{}^3\text{He}$).

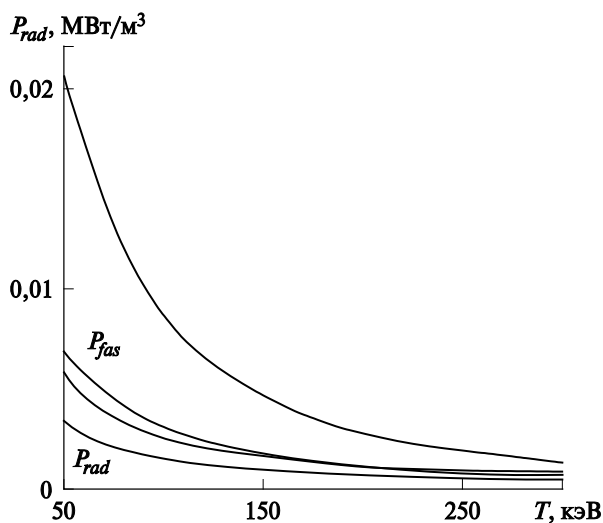


Рис. 5. Термоядерная мощность и радиационные потери $D-^3\text{He}$ и $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ -циклов для $B = 25$ Тл и $\beta = 0,99$ при $50 < T < 300$ кэВ) [8]

Существует несколько типов термоядерных систем (реакторов), подразделяемых по принципу работы и параметрам мощности: токамак, сферический токамак, стелларатор, FRC, компактный тор.

Токама́к (тороидальная камера с магнитными катушками) — тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза.

Сферический токамак — тороидальная установка, в которой вакуумная камера, где формируется и удерживается плазма, имеет почти сферическую форму.

Стелларатор — замкнутая магнитная ловушка для удержания высокотемпературной плазмы. Принципиальное отличие стелларатора от токамака заключается в том, что магнитное поле для изоляции плазмы от внутренних стенок тороидальной камеры полностью создаётся внешними катушками, что, помимо прочего, позволяет использовать его в непрерывном режиме.

FRC (конфигурация с обращенным полем) — это тип плазменного устройства, изучаемого как средство получения ядерного синтеза. Он удерживает плазму на замкнутых силовых линиях магнитного поля без центрального проникновения.

Компактный тор — относится к альтернативным схемам удержания плазмы. В основе компактного тора лежит компактная конфигурация, в которой плазма удерживается в равновесии замкнутым полем и отделена от стенки областью разомкнутого магнитного потока.

Мощность тормозного излучения зависит от температуры и концентрации электронов и не зависит от формы и размеров плазменного образования в отличие от циклотронных потерь, которые определяются также значениями маг-

нитного поля, что существенно для магнитно-инерционного режима [12–15]. Но с учетом современного уровня развития науки и технологий считается, что циклотронное излучение практически полностью возвращается в плазму, поскольку среднее значение коэффициента поглощения излучения плазмой при многократных отражениях от стенок составляет примерно 0,9, т. е. мощностью циклотронных потерь можно пренебречь.

Реакция D–T преобладает в исследованиях термоядерного синтеза, поскольку протекает с наибольшей скоростью. Однако реакции D–³He и p–¹¹B уменьшают производство нейтронов и являются экологически чистыми термоядерными реакциями. Основные характеристики установок/проектов на мало-радиоактивном D–³He-топливе с точки зрения радиационного теплообмена, и в первую очередь тормозного излучения представлены на табл. 1 и 2. Интерес к ним проявляют венчурные компании и стартапы, финансируемые из частных источников. Топливо на основе p–¹¹B не имеет ограничений, но при температуре, соответствующей максимальной скорости энерговыделения (около 300 кэВ) плазма характеризуется огромными потерями энергии на тормозное излучение, что делает невозможным поддержание реакции.

Таблица 1. Параметры тормозного излучения для разных типов D–³He-реакторов термоядерных систем

Характеристика	Токамак	Сферический токамак	Стелларатор	FRC	Компактный тор
Термоядерная мощность P_{fus} , МВт	2500	1500	1500	1000	1937
Относительная мощность тормозного излучения P_{br}/P_{fus}	0,40	0,60	0,15	0,53	0,38

Таблица 2. Основные параметры теплового баланса D–³He-реакторов на основе токамака и компактного тора

Характеристика	Значение мощности, МВт, для различных типов реакторов			
	Apollo [8]	ARIES-III [9]	Artemis [10]	FRC RV [11]
Электрическая мощность	1000	1000	1000	1000
Мощность синтеза	2144	2682	1610	1962
Мощность тормозного излучения	652	Радиация 0,72	Излучение 357	776
Мощность циклотронного излучения	1027			8,7
Мощность заряженных частиц	456	–	1181	1188

Заключение. Для рабочих температур реакторов на альтернативном топливе выполнены расчеты тормозного излучения релятивистских электронов и получены аппроксимирующие формулы [16–18]. Стелларатор и компактный тор имеют наибольшие температуры плазмы и наименьшее значение доли тормозного излучения.

Проведенные исследования доказывают обоснованность интереса к D–³He-плазме по причине его энергоэффективности на рассмотренном интервале мощностей. Для получения полного представления о перспективности применения данного топлива необходимо провести ряд натуральных экспериментов, сравнить полученные данные с характеристиками ранее исследованных видов топлива и уточнить описанные выше расчеты. Опираясь на уже известные результаты исследований и растущий со стороны частных компаний интерес, можно полагать, что топливо D–³H будет востребовано после получения необходимого объема данных о его характеристиках и области применения.

Литература

- [1] Svensson R. Electron-positron pair equilibria in relativistic plasmas. *Astro. Phys. J.*, 1982, vol. 258, pp. 335–348. <http://doi.org/10.1086/160082>
- [2] Чирков А.Ю., Рыжков С.В. Воздействие мощных тепловых и нейтронных потоков на элементы конструкции термоядерных и ядерных энергоустановок. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2017, т. 8, № 6, с. 513–522. <http://doi.org/10.1134/S2079562917050050>
- [3] Ryzhkov S.V. Comparison of a deuterium — helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement. *Fusion Science and Technology*, 2007, vol. 51, no. 2, pp. 190–192. <http://doi.org/10.13182/FST07-A1347>
- [4] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Плазмодинамическое моделирование взаимодействия импульсных плазменных струй. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2018, т. 9, № 1, с. 63–68. <http://doi.org/10.1134/S207956291706015X>
- [5] Zeković V., Arbutina B., Dobardžić A., Pavlović M.Z. Relativistic Non-Thermal Bremsstrahlung Radiation. *International Journal of Modern Physics A*, 2013, vol. 28, 29, no. 1350141. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1310.5639>
- [6] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Physics of Plasmas*, 2014, vol. 21, no. 022501. <http://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [7] Ryzhkov S.V. Compact toroid and advanced fuel — together to the Moon?! *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, no. 1T, pp. 342–344. <http://doi.org/10.13182/FST05-A684>
- [8] McNally Jr.J.R. Physics of fusion fuel cycles. *Nuclear Technology/ Fusion*, 1982, vol. 2, pp. 9–28. <https://doi.org/10.13182/fst2-1-9>
- [9] Kulcinski G.L. et al. Summary of APOLLO, a D–³He tokamak reactor design. *Fusion Technology*, 1992, vol. 21, pp. 2292–2315.
- [10] Bathke C.G. Systems analysis in support of the selection of the ARIES-RS design point. *Fusion Eng. and Design*, 1997, vol. 38, pp. 59–74. [http://doi.org/10.1016/S0920-3796\(97\)00112-9](http://doi.org/10.1016/S0920-3796(97)00112-9)

- [11] Momota H., Ishida A., Kohzaki Y. et al. Conceptual design of D-³He FRC reactor AR-TEMIS. *Fusion Technology*, 1992, vol. 21, pp. 2307–2323.
- [12] Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. Progress in an alternate confinement system called a FRC. *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 43, no. 1T, pp. 304–308. <http://doi.org/10.13182/FST03-A11963620>
- [13] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target. *Fusion Science and Technology*, 2023, vol. 79, pp. 399–406. <http://doi.org/10.1080/15361055.2022.2112037>
- [14] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 092704. <http://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [15] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., Anikeev A.V. Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices. *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 59, no. 1T, pp. 39–42. <http://doi.org/10.13182/FST11-A11570>
- [16] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Science and Technology*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161. <http://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [17] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами. *ТВТ*, 2021, т. 59, № 4, с. 492–501. <http://doi.org/10.31857/S0040364421040141>
- [18] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. *Системы альтернативной термоядерной энергетики*. Москва, Физматлит, 2017, 200 с.

Секачѐва Марина Дмитриевна — студентка кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рыжков Сергей Витальевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Секачѐва М.Д. Оценка вклада тормозного излучения в баланс термоядерной плазмы для разных топлив. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 06 (83). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-909>

ASSESSING CONTRIBUTION OF THE BREMSSTRAHLUNG RADIATION TO THE FUSION PLASMA BALANCE WITH DIFFERENT FUELS

M.D. Sekacheva

marymaya2003@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Bremsstrahlung losses in the high-temperature plasma thermal balance appears to be the soft X-ray radiation, which could not be directly converted into electricity, as is possible in the case of the charged particle energy or the cyclotron radiation. Bremsstrahlung is the main radiation mechanism at the reactor temperature of several keVs. For operating temperatures of the alternative fuel reactors, relativistic electron bremsstrahlung was calculated, and the approximating formulas were obtained. The radiation losses dependence on the target radius and the volumetric bremsstrahlung power of the compressible plasma on the target geometric parameters are presented, their graphs are plotted, and a comparative analysis is performed. When comparing main types of the thermonuclear systems with different magnetic configurations, conclusions were drawn on effectiveness of each of them, and the most energetically useful systems were identified.

Keywords

Charged particles, plasma, X-ray, heat balance, power plant, bremsstrahlung, cyclotron radiation, relativistic effect

Received 31.05.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Svensson R. Electron-positron pair equilibria in relativistic plasmas. *Astro. Phys. J.*, 1982, vol. 258, pp. 335–348. <http://doi.org/10.1086/160082>
- [2] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. Impact of intense thermal and neutron fluxes on the structural elements of fusion and fission reactors. *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2017, vol. 8, no. 6, pp. 513–522. (In Russ.). <http://doi.org/10.1134/S2079562917050050>
- [3] Ryzhkov S.V. Comparison of a deuterium — helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement. *Fusion Science and Technology*, 2007, vol. 51, no. 2, pp. 190–192. <http://doi.org/10.13182/FST07-A1347>
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics simulation of the interaction of pulsed plasma jets. *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 63–68. (In Russ.). <http://doi.org/10.1134/S207956291706015X>
- [5] Zeković V., Arbutina B., Dobardžić A., Pavlović M.Z. Relativistic Non-Thermal Bremsstrahlung Radiation. *International Journal of Modern Physics A*, 2013, vol. 28, 29, no. 1350141. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1310.5639>
- [6] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Physics of Plasmas*, 2014, vol. 21, no. 022501. <http://doi.org/10.1063/1.4863452>

- [7] Ryzhkov S.V. Compact toroid and advanced fuel — together to the Moon?! *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, no. 1T, pp. 342–344. <http://doi.org/10.13182/FST05-A684>
- [8] McNally Jr.J.R. Physics of fusion fuel cycles. *Nuclear Technology/ Fusion*, 1982, vol. 2, pp. 9–28. <https://doi.org/10.13182/fst2-1-9>
- [9] Kulcinski G.L. et al. Summary of APOLLO, a D-3He tokamak reactor design. *Fusion Technology*, 1992, vol. 21, pp. 2292–2315.
- [10] Bathke C.G. Systems analysis in support of the selection of the ARIES-RS design point. *Fusion Eng. and Design*, 1997, vol. 38, pp. 59–74. [http://doi.org/10.1016/S0920-3796\(97\)00112-9](http://doi.org/10.1016/S0920-3796(97)00112-9)
- [11] Momota H., Ishida A., Kohzaki Y. et al. Conceptual design of D-3He FRC reactor AR-TEMIS. *Fusion Technology*, 1992, vol. 21, pp. 2307–2323.
- [12] Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. Progress in an alternate confinement system called a FRC. *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 43, no. 1T, pp. 304–308. <http://doi.org/10.13182/FST03-A11963620>
- [13] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target. *Fusion Science and Technology*, 2023, vol. 79, pp. 399–406. <http://doi.org/10.1080/15361055.2022.2112037>
- [14] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 092704. <http://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [15] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., Anikeev A.V. Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices. *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 59, no. 1T, pp. 39–42. <http://doi.org/10.13182/FST11-A11570>
- [16] Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration. *Fusion Science and Technology*, 2009, vol. 55, no. 2T, pp. 157–161. <http://doi.org/10.13182/FST09-A7004>
- [17] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of the interaction of a magnetic-inertial fusion target with plasma and laser drivers. *TVT*, 2021, vol. 59, no. 4, pp. 492–501. (In Russ.). <http://doi.org/10.31857/S0040364421040141>
- [18] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. *Sistemy al'ternativnoy termoyadernoy energetiki* [Alternative fusion energy systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017, 200 p. (In Russ.).

Sekacheva M.D. — Student, Department of Refrigeration, Cryogenic Equipment, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Ryzhkov S.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Sekacheva M.D. Assessing contribution of the bremsstrahlung radiation to the fusion plasma balance with different fuels. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 06 (83). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-909>