

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА С УЧЕТОМ РЯДА РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

В.В. Соловьева

solovevavica@gmail.com

SPIN-код: 1543-0570

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

Аннотация

Исследованы радиационные виды воздействия на окружающую среду, персонал и население при эксплуатации термоядерной энергетической установки. Проведено сравнение материальных затрат и степени безопасности термоядерного реактора с аналогичными характеристиками других источников энергии. Представлены варианты систем охлаждения термоядерной электростанции и их недостатки. Рассмотрены разные топливные циклы — реакции синтеза, протекающие в плазме. Описаны возможные проблемы, связанные с взрывом сверхпроводящего магнита. Выполнено сравнение радиационной опасности реакторов с производством нейтронов и без него. Представлены различия между материалами, предназначенными для ядерных и термоядерных реакторов. Приведены значения суммарной радиоактивности ряда реакторов.

Ключевые слова

Радиационная безопасность, термоядерный реактор, экология, энергетическая установка, радиоактивность, топливный цикл, нейтроны, ядерная энергетика

Поступила в редакцию 23.03.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Любая энергетическая технология влияет на экологию, персонал и население при добыче сырья, приготовлении и транспортировке топлива, а также во время строительства, эксплуатации и прекращения работы энергетической станции по окончании срока ее службы. Для определения степени безопасности термоядерной электростанции (ТЯЭС) необходим комплексный анализ полного топливного цикла, включая строительство энергетической станции и предприятий топливного цикла. Основные преимущества термоядерной энергетики достаточно хорошо известны: практически неограниченный запас топлива, отсутствие выбросов пыли и химически активных газов, отсутствие в чистом реакторе синтеза осколков деления и актинидов, присутствующих в реакторах деления.

Полный топливный цикл ТЯЭС. Под полным топливным циклом термоядерной электростанции (ТЯЭС) понимают последовательную совокупность этапов, охватывающую весь комплекс работ, необходимых для создания и эксплуатации энергетического объекта: научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, строительство объектов станции. В табл. 1 и 2 приведены данные по материальным затратам и степени безопасности полных топлив-

ных циклов существующих сейчас и в перспективе энергостанций в расчете на 1 ГВт электрической мощности [1, 2].

Таблица 1

Материальные затраты на ТЯЭС

Энергетический цикл	Металлы, тыс. т на 1 ГВт за год	Бетон, тыс. т на 1 ГВт за год	Топливо, тыс. т на 1 ГВт за год
Угольная энергетика	1–2	5–7	3500
Атомная энергетика	1–2	8–13	200
Гидроэнергетика	1–2	13–70	—
Ветроэнергетика	5–15	6–50	—
Термоядерная энергетика	2–4	10–20	3,5

Таблица 2

Степень безопасности ТЯЭС

Энергетический цикл	Смертность персонала, на 1 ГВт за год	Смертность населения, на 1 ГВт за год	Эмиссия материалов на всех стадиях производства, т/ГВт
Угольная энергетика	1–3	0,5–3,0	50–400
Атомная энергетика	0,3–1,3	0,03–0,06	80–800
Гидроэнергетика	0,15–0,3	0,03–0,20	130–2500
Ветроэнергетика	0,1–0,4	0,03–0,30	70–4500
Термоядерная энергетика	0,3–0,7	0,03–0,10	100–2500

Экологическое воздействие полного топливного цикла ТЯЭС связано с рядом факторов:

- 1) потреблением природных ресурсов (земля, вода, конструкционные и неконструкционные материалы, энергоресурсы);
- 2) воздействием, связанным с эксплуатацией станции (радиационные и нерадиационные виды воздействия при нормальной работе и при авариях;
- 3) образованием радиоактивных отходов (РАО) и их захоронением;
- 4) выведением станции по окончании срока ее службы.

Нетрадиционные виды воздействия на персонал, население и окружающую среду при эксплуатации ТЯЭС. Тепловое воздействие связано с невысокой долей преобразования тепловой энергии в электрическую ($\approx 30\%$) и, как следствие, необходимостью сброса излишек тепла в атмосферу.

Химическое воздействие не изучено.

Механическое воздействие (пыль) ТЯЭС может быть связано только с разрушением графитовых элементов покрытий до размеров, не улавливаемых фильтрами. В этом случае возникнут серьезные проблемы, связанные как с защитой окружающей среды, так и с охраной здоровья населения и персонала

станции. Выбрасываемая графитовая пыль будет содержать большое количество изотопа ^{14}C , который образуется в результате облучения графита интенсивным потоком ионов, идущих из плазмы. Изотоп ^{14}C обладает высокой активностью и может долго находиться в атмосфере в форме $^{14}\text{CO}_2$, распространяясь на большие расстояния и попадая в организм человека через продукты питания.

Водяной пар и капельная влага являются следствием принудительного охлаждения ТЯЭС и вспомогательных систем реактора водой (табл. 3). Предварительные оценки показывают, что следует ожидать увеличения расхода йода в 2–3 раза по сравнению с действующими атомными электростанциями (АЭС) на легководных реакторах. Это заставляет предположить, что локальное воздействие на микроклимат ТЯЭС будет интенсивным [3].

Таблица 3

Варианты систем охлаждения ТЯЭС

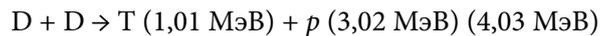
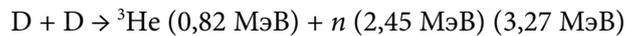
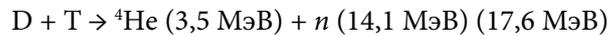
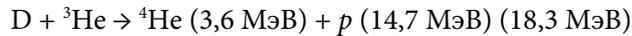
Система охлаждения	Характеристика	Недостатки
Прямоточное охлаждение	Вода из искусственного источника нагревается и возвращается в источник	Большой расход воды (50 м ³ на 1 ГВт электрической мощности); наличие источника воды со стоком не менее 250 м ³ , либо водохранилище площадью больше 30 км ² , либо искусственного водоема-охладителя с площадью водного зеркала примерно 3 км ² . Интенсивное влияние на экологию
Градирни	Расход воды меньше в ≈ 100 раз по сравнению с прямоточным охлаждением	Выброс большого количества пара и влаги (примерно несколько тыс. т/ч на 1 ГВт, интенсивное влияние на микроклимат $R \approx 100$ км)
Воздушное охлаждение	Отсутствует потребление воды	Стоимость электроэнергии возрастает на 25 %, существенно увеличиваются размеры воздуховытяжных башен, резко падает эффективность при температуре выше 25 °С
Комбинированное охлаждение с использованием паровоздушного охлаждения	Практически отсутствует потребление воды и не влияет на микроклимат	Существенных недостатков не выявлено

Таблица 4

Расход природных ресурсов в полном топливном цикле на 1 ГВт за год

Ресурсы	ТЯЭС	ЯТЦ	УТЦ
Земля (без водоемов), га	60–80	50–120	100–400
Вода, безвозвратные потери, млн м ³	—	32	21
Материалы, дес. тыс. т	4–5	1,6	1,2
Топливо (в виде руды), тыс. т	1–2	200	3500

Радиационные виды воздействия на окружающую среду, персонал и население при эксплуатации станции. В плазме протекают следующие реакции синтеза:



Основным фактором, влияющим на радиоактивную обстановку, является выброс трития. По имеющимся оценкам для реактора токамака утечка трития в атмосферу будет характеризоваться активностью до 20 Ки в сутки при нормальной эксплуатации и до $10^5 \dots 10^6$ Ки в случае аварии, что является недостатком реакторов с D–T-циклом по сравнению с реакторами, работающими по D– ${}^3\text{He}$ -циклу [4].

Доля энергии нейтронов, ответственных за активацию конструкционных материалов, резко падает по сравнению с D–T-реакцией. Нейтронный поток в реакциях с малой радиоактивностью уменьшается на 2–3 порядка. В вышеприведенных реакциях тритий практически отсутствует, но исключение составляет D–D-реакция. По некоторым оценкам D–D-реакция может эффективно подавляться при определенных условиях.

Дополнительным преимуществом D– ${}^3\text{He}$ -цикла является меньшее количество активированных конструкционных материалов и, следовательно, отсутствие проблем по их захоронению.

По данным NASA (Report on Lunar Helium-3) на сегодняшний день не существует конструкционных материалов первой стенки для D–T-реакторов со сроком службы более 3 лет. За это время нейтронное разбухание конструкции приведет к невозможности выполнения ею своих функций, при этом суммарная активация при непрерывном режиме работы составит несколько гигаюри. Возникнут большие проблемы с монтажом и захоронением первой стенки. Термоядерный реактор на D– ${}^3\text{He}$ лишен этого недостатка. Хотя в нем и выше тепловые потоки (рост выхода энергии в виде излучения и рост температуры плазмы), но обеспечить рациональное охлаждение стенки легче, чем создать новый конструкционный материал, способный удерживать нейтронные потоки высокой плотности.

Особую опасность могут представлять предельные аварии с выходом активированных материалов и всего трития в атмосферу. Причиной таких аварий может стать преднамеренное внешнее механическое или термическое воздействие на конструкцию термоядерного реактора, вызвавшее разрушение защиты, инженерных систем, разрушение корпуса реактора, связанное с взрывом сверхпроводящего магнита (СПМ). В случае спонтанного образования в СПМ нормальной фазы она начинает распространяться по магниту с большой скоростью. В месте нормальной фазы при мегаамперных токах резко возрастает тепловыделение. Это вызывает закипание гелия и резкий скачок давления под корпусом магнита. Несмотря на то что все СПМ снабжены необходимыми предохрани-

тельными клапанами и системами защиты от нормальной фазы, реализованными в усложненной конструкции проводников обмотки СПМ, нельзя полностью исключить такого рода аварию [5, 6].

Радиационная опасность D-³He-реактора. Определение радиационной опасности требует детального проекта реактора с учетом наведенной радиоактивности в первой стенке и защите, в магнитной обмотке, пронизываемой потоком нейтронов и гамма-лучей, радиоактивности биологической защиты, а также таких сменных деталей реактора, как ионные источники, антенны и приемные пластины, распыляемые потоками плазмы и быстрых частиц. Кроме того, необходимо учитывать перенос радиоактивности теплоносителями, а также подробно анализировать возможные аварии и выбросы радиоактивности в воду и воздушную среду.

Атомное реакторостроение имеет все возможности для создания мер защиты от радиации, неуправляемого разгона реактора, распространения радиоактивных отходов. Термоядерный синтез, во-первых, полностью предотвращает неуправляемый разгон, а во-вторых, позволяет широко регулировать значение суммарной радиоактивности, рождающейся в реакторе и в его защите [7].

Суммарная радиоактивность пропорциональна потоку нейтронов, рождающихся в плазме, и крайне сильно зависит от применяемых материалов во всех частях реактора. При D-³He-синтезе радиоактивность реактора может быть значительно ниже, чем при D-T-синтезе.

Радиоактивность I (Ки/м³) изотопа, наведенная потоком J_1 (МВт/м²) нейтронов с энергией E (МэВ) за время облучения $T_{обл}$ в веществе с плотностью ρ (т/м³), с атомным весом A и содержанием материнского изотопа α в природной смеси (в одноизотопном веществе $\alpha = 1$) при сечении захвата нейтронов σ_n (барн), приводящем к образованию рассматриваемого изотопа с периодом полураспада $t_{1/2} = \ln(2)\tau = 0,69\tau$, выражается формулой

$$I = I_0 \left(1 - \exp \left(- \frac{t_{J_n/E}}{\tau} \right) \right),$$

Таким образом, радиоактивность единицы объема вещества пропорциональна плотности потока нейтронов J_n/E (число нейтронов/(с · м²)) [8].

Формулы показывают, что использование веществ, приводящих к образованию периодов полураспада в несколько дней и меньше, обеспечивает малорадиоактивную энергетику. Вещества с периодами полураспада от сотен дней до сотен лет способствуют наивысшей радиоактивности, поскольку время облучения может достигать 30–40 лет — времени амортизации реактора — и только периоды более сотен тысяч лет вновь ведут к использованию малорадиоактивных реакторов.

Различие в выборе материалов для ядерных и термоядерных реакторов заключается, прежде всего, в том, что для активной зоны ядерного реактора пригодны только материалы с очень малым поглощением нейтронов, а для термоядерных реакторов такого ограничения нет. Для D-³He-реакторов радиацион-

ные повреждения не стесняют выбора, поэтому можно направить усилия на подбор наиболее слабо активируемых материалов.

Подробный анализ радиационной опасности термоядерных реакторов выполнен комиссией, работавшей в Ливерморской лаборатории США в 1987 г. под руководством Джона П. Холдрена. Комиссия сравнила реакторы ядерных и термоядерных электростанций с электрической мощностью 1200 МВт [9].

Суммарная радиоактивность ядерного водяного реактора PWR перед перегрузкой топлива оценена в 5600 МКи. Суммарная радиоактивность реактора токамака на D–T-топливе перед сменой первой стенки по истечении шести лет эксплуатации оценена в 2490 МКи. Полная радиоактивность реактора токамака на D–³He после 30 лет эксплуатации достигает 67 МКи.

В ядерном реакторе практически вся радиоактивность заключается в твэлах, в термоядерных — в наведенной радиоактивности первой стенки, blankets и защиты. Радиоактивность трития (10 МКи/кг) относительно мала.

Для материала D–T-реактора предельный флюенс нейтронов принимали равным 20 МВт/м² при мощности потока нейтронов на первую стенку 3 МВт/м². Для D–³He-реактора поток нейтронов на первую стенку был принят равным 0,09 МВт/м², а в действительности он может быть меньше при объемной плотности выделения энергии в плазме, превышающей принимаемую в проектах INTOR и ITER. Было показано, что оба типа термоядерных реакторов значительно менее опасны, чем реакторы деления [10, 11].

Заключение. Основное различие между ядерными и термоядерными реакторами состоит в том, что в ядерных реакторах всегда находится многотонный запас ядерного топлива, а в термоядерных — от долей грамма до килограммов. Преимуществом D–³He-реактора является то, что это топливо безвредно и не радиоактивно. В ядерных реакторах нужно принимать специальные меры, чтобы избежать неуправляемого разгона, тогда как в термоядерных реакторах разгон принципиально невозможен. Ядерные реакторы, отработавшие свой ресурс, необходимо хоронить навечно из-за высокой радиоактивности, что является сложной и дорогой работой. Термоядерный D–³He-реактор можно разбирать через год после остановки и перерабатывать материалы для повторного использования. Ядерная энергетика связана с перевозками высокоактивных отходов и твэлов, а также с радиационно-опасным производством по извлечению плутония и урана из твэлов. В термоядерной D–³He-энергетике, напротив, отсутствуют перевозки радиоактивных материалов.

Литература

- [1] Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г. и др. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [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.

- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Phys. Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 9, art. 092704. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [4] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Плазмодинамическое моделирование взаимодействия импульсных плазменных струй. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2018, т. 9, № 1, с. 63–68.
- [5] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Shumaev V.V. Application of Thomas-Fermi model to evaluation of thermodynamic properties of magnetized plasma. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, no. 1(95), pp. 97–99.
- [6] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Phys. Plasmas*, 2014, vol. 21, no. 2, art. 022501. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4863452>
- [7] Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. Progress in an alternate confinement system called a FRC. *Fusion Sci. Technol.*, 2003, vol. 43, no. 1T, pp. 304–308. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST03-A11963620>
- [8] Ryzhkov S.V. Compact toroid and advanced fuel — together to the Moon?! *Fusion Sci. Technol.*, 2005, vol. 47, no. 1T, pp. 342–344. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST05-A684>
- [9] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 830, art. 012049. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/830/1/012049>
- [10] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., et al. Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices. *Fusion Sci. Technol.*, 2011, vol. 59, no. 1T, pp. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST11-A11570>
- [11] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М., Физматлит, 2017.

Соловьева Виктория Владиславовна — студентка кафедры «Вакуумная и компрессорная техника», 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:

Соловьева В.В. Экологическое воздействие термоядерного топливного цикла с учетом ряда различных факторов. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 03(44). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-03-590>

**THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE THERMONUCLEAR FUEL CYCLE,
TAKING INTO ACCOUNT A NUMBER OF DIFFERENT FACTORS**

V.V. Solovieva

solovevavica@gmail.com

SPIN-code: 1543-0570

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**Abstract**

The paper is devoted to radiation impacts on the environment, personnel and the public during the operation of a thermonuclear power plant. The material costs and the safety of a thermonuclear reactor are compared with similar characteristics of other energy sources. The options for cooling systems of a thermonuclear power plant and their disadvantages are presented. Various fuel cycles (synthesis reactions occurring in the plasma) are considered. Possible problems associated with the explosion of a superconducting magnet are described. A comparison is made of the radiation hazard of reactors with and without neutron production. The differences between the materials intended for nuclear and thermonuclear reactors are presented. The values are given for the total radioactivity of a number of reactors.

Keywords

Mining, cryptocurrency, pool, hashing, algorithm, exchange, hashrate, blockchain

Received 23.03.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Kuzenov V.V., Lebo A.I., Lebo I.G., et al. Fiziko-matematicheskie modeli i metody rascheta vozdeystviya moshchnykh lazernykh i plazmennykh impul'sov na kondensirovannye i gazovye sredy [Physical-mathematical models and calculation methods for effect of power laser and plasma pulses on condensed and gas medium]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017 (in Russ.).
- [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* [Nuclear Physics and Engineering], 2017, vol. 8, no. 6, pp. 513–522 (in Russ.).
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure. *Phys. Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 9, art. 092704. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5109830>
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Plasma dynamics simulation of the interaction of pulsed plasma jets. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2018, vol. 9, no. 1, pp. 63–68 (in Russ.).
- [5] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Shumaev V.V. Application of Thomas-Fermi model to evaluation of thermodynamic properties of magnetized plasma. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, no. 1(95), pp. 97–99.
- [6] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency. *Phys. Plasmas*, 2014, vol. 21, no. 2, art. 022501. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4863452>

- [7] Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. Progress in an alternate confinement system called a FRC. *Fusion Sci. Technol.*, 2003, vol. 43, no. 1T, pp. 304–308. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST03-A11963620>
- [8] Ryzhkov S.V. Compact toroid and advanced fuel – together to the Moon?! *Fusion Sci. Technol.*, 2005, vol. 47, no. 1T, pp. 342–344. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST05-A684>
- [9] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 830, art. 012049. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/830/1/012049>
- [10] Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., et al. Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices. *Fusion Sci. Technol.*, 2011, vol. 59, no. 1T, pp. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST11-A11570>
- [11] Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu. *Sistemy al'ternativnoy termoyadernoy energetiki [Systems of alternative thermonuclear energetics]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017 (in Russ.).

Solovieva V.V. — Student, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

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

Please cite this article in English as:

Solovieva V.V. The environmental impact of the thermonuclear fuel cycle, taking into account a number of different factors. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 03(44). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-03-590.html> (in Russ.).