

УДК 539.12

DOI: 10.18384/2310-7251-2023-2-38-50

## ТРАНСМУТАЦИЯ НУКЛИДОВ В БЛАНКЕТЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

*Давиденко В. Д., Дьячков И. И., Иоаннисиан М. В.*

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Российская Федерация*

### **Аннотация**

**Цель.** Оценка неопределённостей современных библиотек ядерных данных и сравнительный анализ наведённой активности бланкета термоядерного источника нейтронов, содержащего нуклиды U-238 и Th-232.

**Процедура и методы.** Проведены расчёты и анализ, полученных данных по активности нестабильных нуклидов, образующейся в бланкете термоядерного реактора.

**Результаты** исследований показали, что остаточная активность выгружаемого бланкета с U-238 примерно в 2–3 раза больше активности Th-232, нормированной на один образующийся делящийся нуклид. Для приведения активности выгружаемого уранового бланкета к активности бланкета на основе Th-232 потребуется несколько большее время выдержки.

**Теоретическая и / или практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации бланкета термоядерного источника нейтронов.

**Ключевые слова:** оценённые ядерные данные, нейтронные сечения, термоядерный реактор, бланкет, энерговыделение, активность

**Благодарности:** исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 19-29-02011 «Разработка комплексной математической модели бланкета термоядерного реактора для фундаментальных исследований физических процессов переноса излучения, изотопной эволюции и радиационных нагрузок»

## TRANSMUTATION OF NUCLIDES IN THE BLANKET OF A THERMONUCLEAR NEUTRON SOURCE

*V. Davidenko, I. Dyachkov, M. Ioannisian*

*National Research Center Kurchatov Institute  
pl. Akad. Kurchatova 1, Moscow 123182, Russian Federation*

### **Abstract**

**Aim.** We evaluate the uncertainties of modern nuclear data libraries and perform a comparative analysis of the induced activity of the blanket of a thermonuclear neutron source containing uranium-238 and thorium-232 nuclides.

**Methodology.** The obtained data on the activity of unstable nuclides formed in the blanket of a thermonuclear reactor are analyzed.

**Results.** The results of the studies show that the residual activity of the discharged blanket with U-238 is approximately two-to-three times greater than the activity of Th-232 normalized by one formed fissile nuclide. To make the activity of the unloaded uranium blanket similar to that of the Th-232-based blanket, a slightly longer exposure time is required.

**Research implications.** The obtained results can be used to optimize the blanket of a thermonuclear neutron source.

**Keywords:** estimated nuclear data, neutron cross sections, thermonuclear reactor, blanket, energy release, activity

**Acknowledgments:** This research was supported by an RFBR grant No.19-29-02011 “Development of a complex mathematical model of a thermonuclear reactor blanket for fundamental research of physical processes of radiation transfer, isotopic evolution and radiation loads”.

### Введение

В современных прогнозах развития мирового энергообеспечения, несмотря на постоянное развитие ядерных технологий, доля атомной составляющей систематически снижается. Связано это в том числе и с неопределённостями, возникающими при разработке топливных циклов ядерной энергетики, проблемами с переработкой отработавшего ядерного топлива, утилизацией отходов и радиационного воздействия на окружающую среду [1].

Традиционный, и практически единственный, рассматриваемый в настоящее время подход к широкомасштабному развитию ядерной энергетики как самодостаточной системы, связан с различными комбинациями тепловых и быстрых реакторов, в том числе и с последовательным вытеснением тепловых реакторов. Но современные проекты быстрых реакторов ориентируются на низкие коэффициенты воспроизводства топлива, приводящие к существенным увеличениям объёмов переработки, и, следовательно, увеличивающим радиационное воздействие на окружающую среду [2]. Тем не менее это направление развития ядерной энергетики как крупномасштабное и практически неограниченное по сырьевому ресурсу фактически рассматривается на текущий момент в качестве единственно верного и безальтернативного. В конечном итоге быстрые реакторы должны будут заменить собой тепловые практически полностью. Эта замена будет проходить постепенно, начнётся, как показывают результаты исследований [3], не ранее середины XXI в. и продлится не менее двухсот лет.

Концепция развития ядерной энергетики на основе реакторов синтеза-деления подразумевает наработку делящегося нуклида в blankets термоядерного источника нейтронов с последующим использованием в традиционных и (или) перспективных тепловых реакторах [4].

В работе [5] приведена концепция термоядерной установки ДЕМО-ТИН (Термоядерный Источник Нейтронов) как прототипа термоядерного реактора синтез-деления. Отличительной особенностью установки в сравнении с гибридной установкой токамак [6] является: стационарный режим работы,

наличие на наружном обводе камеры бланкета для воспроизводства трития, наработки делящихся изотопов или трансмутации минорных актинидов.

В качестве сырьевого нуклида рассматриваются как изотоп U-238, так и изотоп Th-232. Последний нуклид на первый взгляд является более предпочтительным, поскольку имеет меньшее сечение деления по сравнению с U-238 в области термоядерных энергий нейтронов (14 МэВ), и, следовательно, активность бланкета, поступающего на переработку, также будет меньше. Но, с другой стороны, за счёт большего деления общее число нарабатываемого делящегося нуклида Pu-239 будет больше при облучении U-238, чем при Th-232, т. е. и эффективность использования термоядерного нейтрона в бланкете с U-238 будет заведомо выше. На сегодняшний день за счёт этой особенности бланкета с U-238 практически не рассматриваются в стратегии развития ядерной энергетики [7], поэтому необходимо провести сравнительный анализ удельной активности, выделяющейся в бланкете как с сырьевым нуклидом U-238, так и Th-232.

Как известно, при взаимодействии с Th-232 термоядерного нейтрона образуется 0.45 ядра Th-230, 0.613 Th-231 и 2.53 ядра Th-233 [8]. Так же при взаимодействии делится 0.189 ядра Th-232. При взаимодействии одного термоядерного нейтрона с ураном-238 образуется 0.295 ядра U-236, 0.393 U-237 и 3.95 U-239. Так же делится 0.856 ядра U-238. В результате взаимодействия термоядерного нейтрона с Th-232 и U-238 за счёт реакций  $(n,2n)$ ,  $(n,3n)$  и  $(n,f)$  в конечном итоге образуется примерно 2.6 и 3.95 нейтрона, которые поглощаются в сырьевом нуклиде и дают соответственное количество ядер U-233 и Pu-239.

Таким образом, число делений на U-238 примерно в 4.5 раза больше, чем делений Th-232, соответственно, и энерговыделение продуктов деления U-238 также будет в 4.5 больше. Так же за счёт реакции  $(n,2n)$ ,  $(n,3n)$  образуются ядра тория и урана, которые тоже дают вклад в остаточное энерговыделение.

## 1. Неопределённости ядерных данных

Для расчётных исследований по оптимизации конструкции термоядерного источника нейтронов с целью увеличения эффективности наработки делящихся нуклидов в бланкете необходимо учитывать точность представленной в файлах оценённых ядерных данных информации о сечениях взаимодействия термоядерного нейтрона с материалом бланкета.

Следует отметить, что нейтронно-физические свойства Th-232 в области термоядерных энергий нейтрона изучены в существенно меньшей степени, чем свойства U-238. В частности, для такой важной реакции, как  $(n,3n)$ , существует только одна экспериментальная точка<sup>1</sup>, на основании которой в библиотеки ядерных данных вводятся соответствующие оценки, что явно недостаточно для получения объективной картины по сечениям данной реакции. Необходимы оценки неопределённостей современных библиотек ядерных данных,

<sup>1</sup> См.: Торий [Электронный ресурс]. URL. <https://www.ippe.ru/libr/pdf/90th.pdf> (дата обращения: 04.04.2023).

влияющих на точность расчётного моделирования процессов взаимодействия термоядерного нейтрона с материалом blankets.

Ниже приведён сравнительный анализ нейтронных сечений Th-232, представленных в современных файлах оценённых ядерных данных в области энергии термоядерного нейтрона (14.2 МэВ). Рассматриваются разные версии библиотек<sup>2</sup> ENDF-B, JEFF, JENDL и TENDL, отечественные библиотеки BROND и РОСФОНД, а также китайская библиотека CENDL. Общее число рассмотренных систем файлов оценённых ядерных данных равно 21. Предварительный анализ данных показал, что файл Th-232 библиотеки FENDL-3.0 полностью идентичен файлу библиотеки ENDF/B-VII.1, а файлы библиотек TENDL-2019 и TENDL-2017 используют данные ENDF/B-VIII.0 в области рассматриваемых в данной работе сечений. Поэтому из анализа данных они были исключены.

Для обработки файлов оценённых ядерных данных использовалась версия программы NJOY [9] 2016<sup>3</sup> года, для подготовки библиотек многогрупповых констант модуль, разработанный для программного комплекса UNK<sup>4</sup>. Сечения основных реакций для энергии нейтрона 14.2 МэВ приведены в табл. 1. Для расчётного анализа использовалась специально подготовленные многогрупповые библиотеки для программного комплекса UNK с более детальным описанием групповых сечений в быстрой области энергий (область реакций (n,2n) и (n,3n)), и был разработан специальный модуль расчёта замедления нейтронов и коэффициента размножения в бесконечной среде для решения задачи с источником по поколениям.

Таблица 1 / Table 1

**Сечения основных реакций Th-232, барн /**

**Cross sections of the main reactions of Th-232, barn**

Библиотека	Nu.eff	(n,2n)	(n,3n)	(n,fiss)	(n,g)	(n,elas)	(n,inel)
JENDLE.4.0	3.943	1.717	5.662E-01	3.667E-01	1.110E-03	2.752	4.646E-01
JENDLE.3.3	4.011	1.136	8.386E-01	3.596E-01	1.891E-03	2.693	7.199E-01
JENDLE.3.2	4.011	1.136	8.386E-01	3.596E-01	1.216E-05	2.695	7.199E-01
JEFF.3.3	3.925	1.487	6.531E-01	3.603E-01	1.167E-03	2.730	5.881E-01
JEFF.3.2	3.925	1.487	6.531E-01	3.603E-01	1.167E-03	2.730	5.881E-01
JEFF.3.1	3.915	1.436	7.549E-01	3.512E-01	9.971E-04	2.772	5.379E-01
JEFF.3.0	4.011	1.136	8.386E-01	3.596E-01	1.132E-06	2.695	7.199E-01

<sup>2</sup> См.: Evaluated Nuclear Data File (ENDF) [Электронный ресурс]. URL. <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (дата обращения 04.04.2022).

<sup>3</sup> См.: The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2016. Los Alamos National Laboratory. LA-UR-17-20093, November 7, 2019.

<sup>4</sup> См.: Davidenko V. D., Tsibulsky V. F. Detailed Calculation of Neutron Spectrum in Cell of a Nuclear Reactor // International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology (Oct. 5–8, 1997). Long Island, New York: American Nuclear Society, P. 1755–1760.

Библиотека	Nu.eff	(n,2n)	(n,3n)	(n,fiss)	(n,g)	(n,elas)	(n,inel)
ENDF/B-VII.0	3.925	1.479	6.544E-01	3.685E-01	1.164E-03	2.721	5.887E-01
ENDF/B-VII.1	3.925	1.487	6.532E-01	3.603E-01	1.169E-03	2.730	5.881E-01
ENDF/B-VIII.0	3.925	1.487	6.532E-01	3.603E-01	1.169E-03	2.730	5.881E-01
РОСФОНД-10	3.925	1.463	6.632E-01	3.502E-01	1.039E-03	2.944	3.878E-01
BROND.3.1	3.941	1.665	5.660E-01	3.715E-01	1.130E-03	2.799	4.646E-01
CENDL.3.1	3.925	1.462	6.418E-01	3.536E-01	1.672E-03	2.701	6.022E-01
TENDL-2015	3.925	1.482	5.758E-01	3.591E-01	1.126E-03	2.717	5.917E-01
Максимум	4.053	1.717	8.386E-01	3.715E-01	5.253E-03	2.944	7.199E-01
Минимум	3.915	1.136	5.423E-01	3.502E-01	1.132E-06	2.693	3.604E-01
Delta, %	3.54	51.1	54.7	6.09	4.64E+05	9.32	99.7

Источник: данные авторов

Представленные в табл. 1 сечения позволяют расчётным путём оценить число вторичных нейтронов, образующихся после взаимодействия одного термоядерного нейтрона с ядром Th-232. Эти значения приведены в табл. 2. Здесь под числом вторичных нейтронов понимается полное число нейтронов, образовавшиеся как за счёт деления Th-232, так и после реакций (n,2n) и (n,3n).

Таблица 2 / Table 2

**Число вторичных нейтронов после взаимодействия одного термоядерного нейтрона с Th-232 / Number of secondary neutrons after the interaction of one thermonuclear neutron with Th-232**

Библиотека	N1
JENDLE.4.0	1.669
JENDLE.3.3	1.677
JENDLE.3.2	1.678
JEFF.3.3	1.660
JEFF.3.2	1.660
JEFF.3.1	1.678
JEFF.3.0	1.678
ENDF/B-VII.0	1.665
ENDF/B-VII.1	1.660
ENDF/B-VIII.0	1.660
РОСФОНД-10	1.656
BROND.3.1	1.663
CENDLE.3.1	1.655

Библиотека	N1
ENDF/B-6	1.666
ENDF/B-6-R7	1.666
ENDF/B-6-R8	1.666
FENDL.3.0	1.660
Максимум	1.678
Минимум	1.655
Delta,%	1.36

Источник: данные авторов

Как следует из табл. 2, несмотря на достаточно существенные различия в парциальных сечениях все рассматриваемые библиотеки достаточно хорошо согласуются по значениям вторичных нейтронов, различия лежат в пределах 1.5%. Данные, полученные с использованием разных библиотек, в целом хорошо согласуются с результатами, приведёнными в [10]. В расчётах по программе MCU [11] и MCNP<sup>6</sup> были получены значения 1.62 и 1.53 соответственно.

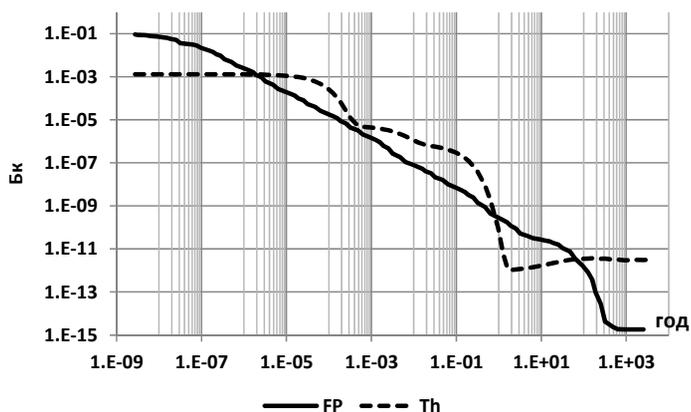
В результате взаимодействия термоядерного нейтрона с ядром Th-232 за счёт реакций (n,2n), (n,3n) и реакции деления образуется примерно 1.67 нейтронов, из которых только 0.25 нейтрона образуется непосредственно за счёт деления. Часть нейтронов (за счёт реакций упругого и неупругого рассеяния) остаётся в области пороговых реакций (n,2n) и (n,3n), что приводит к дальнейшему увеличению числа нейтронов после второго взаимодействия (второе столкновение или поколение нейтронов), часть захватывается Th-232. В конечном итоге все вторичные нейтроны поглощаются в Th-232 с последующим образованием 2.6 ядер U-233.

## 2. Активность нестабильных нуклидов в бланкете

С помощью комплекса UNK были проведены расчёты активности нестабильных нуклидов, образующихся в бланкете термоядерного источника нейтронов.

На рис. 1 показана суммарная активность нестабильных нуклидов тория (231, 230 и 233), продуктов их распада, а так же продуктов его деления (время в годах) после взаимодействия с термоядерным нейтроном.

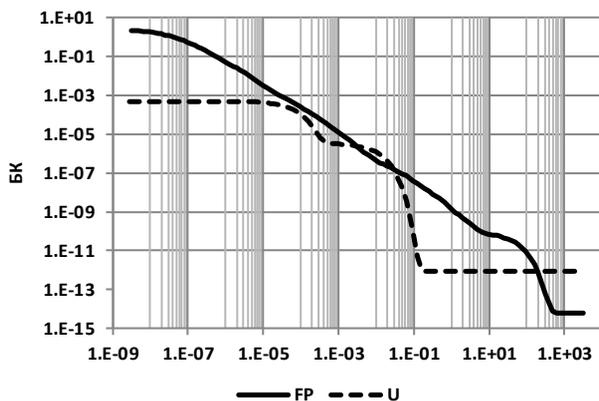
<sup>6</sup> См.: MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Vers. 5. X-5 Monte Carlo Team. LA-UR-03-1987.



**Рис. 1 / Fig. 1.** Активность продуктов взаимодействия (Бк) одного термоядерного нейтрона с ториевым бланкетом в зависимости от времени (годы), FP – продукты деления, Th – активность нуклидов тория / Activity of interaction products (Bq) of one thermonuclear neutron with a thorium blanket as a function of time (years): FP, fission products and Th, activity of thorium nuclides.

Источник: данные авторов.

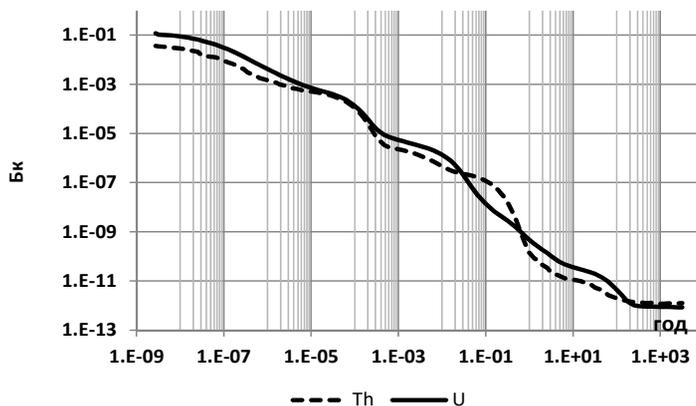
На рис. 2 показана активность (Бк) нестабильных изотопов урана (236, 237 и 239) и продуктов их распада + активность продуктов деления урана-238 в зависимости от времени выдержки (год) после взаимодействия одного термоядерного нейтрона в бланкете.



**Рис. 2 / Fig. 2.** Активность продуктов взаимодействия (Бк) одного термоядерного нейтрона с урановым бланкетом в зависимости от времени (годы), FP – продукты деления, U – активность нуклидов урана / Activity of interaction products (Bq) of one thermonuclear neutron with a uranium blanket as a function of time (years): FP, fission products and U, activity of uranium nuclides

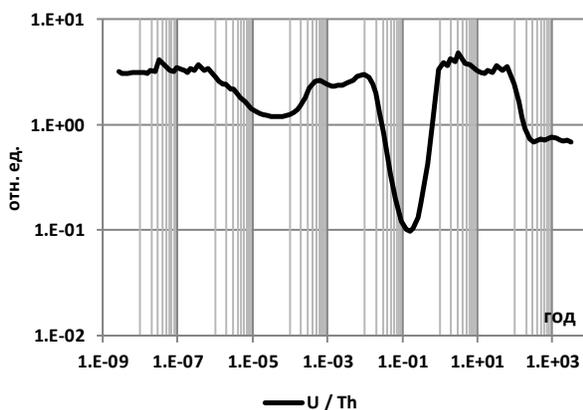
Источник: данные авторов.

Отметим, что интерес представляет не абсолютная активность blankets с сырьевым нуклидом, а относительная, т.е. нормированная на один образующийся делящийся нуклид (U-233 или Pu-239). На рис. 3 приведена удельная активность (на одно образующееся ядро делящегося нуклида U-233 и Pu-239), на рис. 4 – их отношение.



**Рис. 3 / Fig. 3.** Удельная активность продуктов взаимодействия (Бк) одного термоядерного нейтрона с урановым и ториевым blanketом на одно ядро образовавшегося делящегося изотопа в зависимости от времени (годы) / Specific activity of interaction products (Bq) of one thermonuclear neutron with uranium and thorium blanket per one nucleus of the formed fissile isotope as a function of time (years)

Источник: данные авторов.

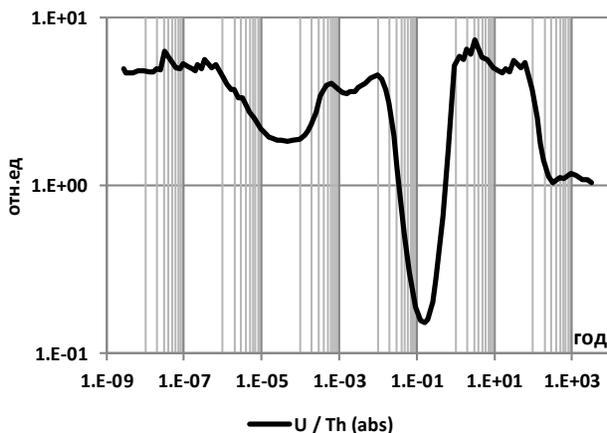


**Рис. 4 / Fig. 4.** Отношение активности при образования одного ядра Pu-239 к активности при образовании одного ядра U-233 в зависимости от времени (годы) / Ratio of activity during the formation of one Pu-239 nucleus to activity during the formation of one U-233 nucleus as a function of time (years).

Источник: данные авторов.

Таким образом, при взаимодействии одного термоядерного нейтрона с blanketом активность образования одного ядра Pu-239 примерно в 2–3 раза больше активности, выделяющейся при образовании одного ядра U-233. Отметим, что в районе 0.1 года (36.5 суток) эта активность примерно на порядок меньше.

Абсолютное отношение активностей, образовавшееся при взаимодействии одного термоядерного нейтрона, ведёт себя примерно так же в урановом blanketе, как и было указано выше, примерно в 3–4 раза больше (рис. 5).



**Рис. 5 / Fig. 5.** Отношение активности в урановом blanketе по отношению к активности в ториевом blanketе в зависимости от времени (годы) / Ratio of activity in the uranium blanket to activity in the thorium blanket as a function of time (years)

Источник: данные авторов.

Учитывая, что при облучении уранового blanketа не образуется U-232, а также тот факт, что период полураспада Pa-233 равен 27 дней, а Np-239 – 2.4 дня, урановый blanket может оказаться предпочтительнее ториевого и позволит более эффективно использовать термоядерный нейтрон, из которого можно получить 3.96 ядра Pu-239 против 2.56 ядра U-233.

### Заключение

Результаты анализа современных файлов оценённых ядерных данных выявили существенные расхождения в оценках сечений Th-232 в области энергий 14.2 МэВ, что необходимо учитывать в расчётных исследованиях нейтронно-физических свойств термоядерного источника нейтронов. Различия в оценке сечений реакций (n,2n) и (n,3n) составляют порядка 50%, упругого и неупругого рассеяния 9 и 95% соответственно, полного сечения – 5%. Различия в оценке числа вторичных нейтронов, образующихся в результате деления Th-232, составляют 3.5%, а в сечении деления – 6%. Тем не менее выявленные различия слабо сказываются на значении общего числа вторичных нейтронов,

образующихся как за счёт реакций  $(n,2n)$ ,  $(n,3n)$ , так и деления при взаимодействии термоядерного нейтрона с ядром Th-232. Различия в оценке составляют 1.5%. При этом разброс в оценке общего числа нейтронов, родившихся и, следовательно, поглотившихся в Th-232, составляют примерно 15%. Если же учитывать только последние версии библиотек (ENDF/B-VIII.0, JENDL.4.0, JEFF.3.3 и т. п.), что в целом не совсем корректно, то различия в оценке общего числа образовавшихся дополнительных нейтронов на один термоядерный сокращаются до 5%.

Сравнительный анализ активации бланкета термоядерного источника нейтронов с сырьевыми нуклидами U-238 и Th-232 показывает, что остаточная активность выгружаемого бланкета с U-238 примерно в 2–3 раза больше активности Th-232, нормированной на один образующийся делящийся нуклид. Для приведения активности выгружаемого уранового бланкета к активности бланкета на основе Th-232 потребуется несколько большее время выдержки. Таким образом, за счёт большего накопления Pu-239 в урановом бланкете он может оказаться более предпочтительным по сравнению с бланкетом из Th-232. Также следует учитывать, что при облучении U-238 не образуется U-232, на который существуют нормативные ограничения по содержанию в топливных композициях.

*Статья поступила в редакцию 03.04.2023 г.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Приемлемость замыкания топливного цикла ядерной энергетики / Велихов Е. П., Гольцев А. О., Давиденко В. Д., Ельшин А. В., Ковалишин А. А., Родионова Е. В., Цибульский В. Ф. // Вопросы Атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. № 1. С. 5–12. DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-5-12.
2. Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза – стратегический ориентир развития отрасли / Велихов Е. П., Ковальчук М. В., Ильгисонис В. И., Игнатъев В. В., Цибульский В. Ф., Андрианова Е. А., Бландинский В. Ю. // Вопросы Атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. № 4. С. 5–13. DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-5-13.
3. Андрианова Е. А., Цибульский В. Ф. Быстрые реакторы с умеренным воспроизводством и структура ядерной энергетики // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 2. С. 71–74.
4. Гибридный термоядерный реактор-токамак для производства делящегося топлива и электроэнергии / Велихов Е. П., Глухих В. А., Гурьев В. В., Кадомцев Б. Б., Колбасов Б. Н., Котов В. В., Моносзон Н. А. и др. // Атомная энергия. 1978. Т. 45. № 1. С. 3–9.
5. Токамак ДЕМО-ТИН: концепция электромагнитной системы и вакуумной камеры / Азизов Э. А., Ананьев С. С., Беляков В. А., Бондарчук Э. Н., Воронова А. А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 2. С. 5–18. DOI: 10.21517/0202-3822-2015-38-2-5-18.

6. Орлов В. В., Пономарев Л. И. Ядерные проблемы термоядерной энергетики // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 2. С. 105–114.
7. Гибридная «синтез-деление» реакторная установка на ториевом топливе с источником дополнительных термоядерных нейтронов / Шаманин И. В., Аржанников А. В., Приходько В. В., Шамаков В. М., Модестов Д. Г., Луцик И. О., Полозков С. Д., Беденко С. В. // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16. № 1. С. 21–43. DOI: 10.25205/2541-9447-2021-16-1-21-43.
8. Оценка возможности наработки делящихся изотопов для реакторов деления в бланкете термоядерного реактора / Моряков А. В., Зинченко А. С., Цибульский В. Ф., Давиденко В. Д., Чукбар Б. К. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 2. С. 38–48. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-2-38-48.
9. MacFarlane R. E., Boicourt R. M. NJOY: A neutron and photon processing system // Transactions of the American Nuclear Society. 1975. Vol. 22. P. 720.
10. Энергетические перспективы термоядерного синтеза / Бландинский В. Ю., Давиденко В. Д., Зинченко А. С., Моряков А. В., Родионова Е. В., Чукбар Б. К., Цибульский В. Ф. // Атомная энергия. 2020. Т. 128. № 1. С. 37–40.
11. Статус МСУ-5. / Алексеев Н. И., Большагин С. Н., Гомин Е. А., Городков С. С., Гуревич М. И., Калугин М. А., Кулаков А. С. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2011. № 4. С. 4–23.

#### REFERENCES

1. Velikhov E. P., Goltsev A. O., Davidenko V. D., Elshin A. V., Kovalishin A. A., Rodionova E. V., Tsibul'skiy V. F. [Admissibility of the closed fuel cycle of nuclear power engineering]. In: *Voprosy Atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyi sintez* [Problems of atomic science and technology. Series: Thermonuclear fusion], 2021, vol. 44, no. 1, pp. 5–12. DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-5-12.
2. Velikhov E. P., Kovalchuk M. V., Ilgisonis V. I., Ignat'ev V. V., Tsibul'skiy V. F., Andrianova Ye. A., Blandinskiy V. Yu. [Nuclear energy system based on fission and fusion reactors as a strategic line of nuclear power engineering development]. In: *Voprosy Atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyi sintez* [Problems of atomic science and technology. Series: Thermonuclear fusion], 2017, vol. 40, no. 4, pp. 5–13. DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-4-5-13.
3. Andrianova E. A., Tsibul'skiy V. F. [Moderate-breeding fast reactors and structure of nuclear power]. In: *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2018, vol. 125, no. 2, pp. 71–74.
4. Velikhov E. P., Glukhikh V. A., Gur'yev V. V., Kadomtsev B. B., Kolbasov B. N., Kotov V. V., Monoszon N. A. et al. [Hybrid thermonuclear tokamak reactor for the production of fissile fuel and electricity]. In: *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 1978, vol. 45, no. 1, pp. 3–9.
5. Azizov E. A., Anan'ev S. S., Belyakov V. A., Bondarchuk E. N., Voronova A. A. et al. [Tokamak DEMO-FNS: concepts of magnet system and vacuum chamber]. In: *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyi sintez* [Problems of atomic science and technology. Series: Thermonuclear fusion], 2015, vol. 38, no. 2, pp. 5–18. DOI: 10.21517/0202-3822-2015-38-2-5-18.
6. Orlov V. V., Ponomarev L. I. [Nuclear problems of thermonuclear power generation]. In: *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2018, vol. 124, no. 2, pp. 105–114.
7. Shamanin I. V., Arzhannikov A. V., Prikhod'ko V. V., Shmakov V. M., Modestov D. G., Lutsik I. O., Polozkov S. D., Bedenko S. V. [Hybrid “fusion-fission” reactor facility on

- thorium fuel with a source of additional thermonuclear neutrons]. In: *Sibirskii fizicheskii zhurnal* [Siberian journal of physics], 2021, vol. 16, no. 1, pp. 21–43. DOI: 10.25205/2541-9447-2021-16-1-21-43.
8. Moryakov A. V., Zinchenko A. S., Tsibul'skiy V. F., Davidenko V. D., Chukbar B. K. [Estimation of reproduction fission isotopes for a nuclear reactor in a blanket thermonuclear reactor]. In: *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reakturnyye konstanty* [Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants], 2019, no. 2, pp. 38–48. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-2-38-48.
  9. MacFarlane R. E., Boicourt R. M. NJOY: A neutron and photon processing system. In: *Transactions of the American Nuclear Society*, 1975, vol. 22, P. 720.
  10. Blandinskiy V. Yu., Davidenko V. D., Zinchenko A. S., Moryakov A. V., Rodionova Ye. V., Chukbar B. K., Tsibul'skiy V. F. [Energy outlook for thermonuclear fusion]. In: *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], 2020, vol. 128, no. 1, pp. 37–40.
  11. Alekseev N. I., Bolshagin S. N., Gomin E. A., Gorodkov S. S., Gurevich M. I., Kalugin M. A., Kulakov A. S. et al. [The status of the MCU-5]. In: *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov* [Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2011, no. 4, pp. 4–23.
- 

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давиденко Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, руководитель отделения физики и моделирования энергетики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;

e-mail: Davidenko\_VD@nrcki.ru

Дьячков Иван Игоревич – младший научный сотрудник лаборатории моделирования развития энергетики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;

e-mail: Djachkov\_ii@nrcki.ru;

Иоаннисуан Михаил Викторович – кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории моделирования развития энергетики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;

e-mail: Ioannisian\_MVI@nrcki.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir D. Davidenko – Dr. Sci. (Engineering), Departmental Head, Department of Physics and Energy Modeling, National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Davidenko\_VD@nrcki.ru

Ivan I. Dyachkov – Research Assistant, Laboratory for Modeling Energy Development, National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Djachkov\_ii@nrcki.ru;

Mihail V. Ioannisian – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Laboratory Head, Laboratory for Modeling Energy Development, National Research Center “Kurchatov Institute”;

e-mail: Ioannisian\_MVI@nrcki.ru

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Давиденко В. Д., Дьячков И. И., Иоаннисиан М. В. Трансмутация нуклидов в blankets термоядерного источника нейтронов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2023. № 2. С. 38–50.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-2-38-50.

### FOR CITATION

Davidenko V. D., Dyachkov I. I., Ioannisian M. V. Transmutation of nuclides in the blanket of a thermonuclear neutron source. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2023, no. 2, pp. 38–50.  
DOI: 10.18384/2310-7251-2023-2-38-50.