

ДИНАМИКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ВНУТРЕННИМ ПРОТЯЖЕННЫМ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ

Шаманин И.В.*, Беденко С.В.*, Шмаков В.М.**, Модестов Д.Г.**,
Луцик И.О.*, Кнышев В.В.*, Полозков С.Д.*

* *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30*

** *ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина»
456770, г. Снежинск, ул. Васильева, д. 13*



Исследуются особенности пространственной кинетики инновационной гибридной ядерной энергетической установки с протяженным источником нейтронов на основе магнитной ловушки. Исследуемая установка «синтез-деление» включает в себя реакторную установку, активная зона которой состоит из сборки торий-плутониевых топливных блоков реактора ВГТРУ унифицированной конструкции и длинной магнитной ловушки, которая пронизывает приосевую область активной зоны. В основу инженерного решения по плазменному генератору нейтронов положена разработанная в Новосибирском Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН реально действующая газодинамическая магнитная ловушка на основе источника термоядерных нейтронов (Gas Dynamic Trap based on Fusion Neutron Source – GDT-FNS). В исследуемой конфигурации гибридной установки высокотемпературный плазменный шнур GDT-FNS образуется в импульсно-периодическом режиме, и при определенной скважности следует ожидать образование расходящейся от осевой части системы «волны» деления, распространяющейся по объему сборки топливных блоков в корреляции по времени с импульсным источником быстрых D-D-нейтронов. В этих условиях возникает необходимость исследования процесса распространения «волны» деления и, соответственно, формирования распределения энерговыделения в объеме blankets установки. В работе выполнены исследования стационарных и пространственно-временных характеристик нейтронных потоков и динамики энерговыделения установки. Моделирование стационарных нейтронно-физических характеристик и пространственно-временного распространения «волны» деления выполнено по программному комплексу PRIZMA, разработанному в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина».

Ключевые слова: «волна» деления, плазменный импульсно-периодический генератор D-D-нейтронов, гибридный реактор «синтез-деление».

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются особенности пространственной кинетики гибридной ториевой реакторной установки с протяженным источником нейтронов на основе газодинамической магнитной ловушки GDT-FNS. Исследуемая реакторная установка «синтез-деление» (рис. 1 [1, 2]) по сути является гибридным реактором, активная зона которого состоит из сборки топливных блоков унифицированной конструкции высокотемпературного газоохлаждаемого реактора ВГТРУ [3, 4] и длинной магнитной ловушки, которая пронизывает приосевую область активной зоны [5].

Длинная магнитная ловушка включает в себя зону для инъекции нейтральных нагревающих пучков, плазменный столб внутри сборки и две части с многопробочным магнитным полем для минимизации продольных потерь энергии плазмы вдоль оси плазменного столба. В основу инженерного решения по данному плазменному генератору D-D (D-T) термоядерных нейтронов положена разработанная в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск) реально действующая газодинамическая многопробочная магнитная ловушка [5 – 9].

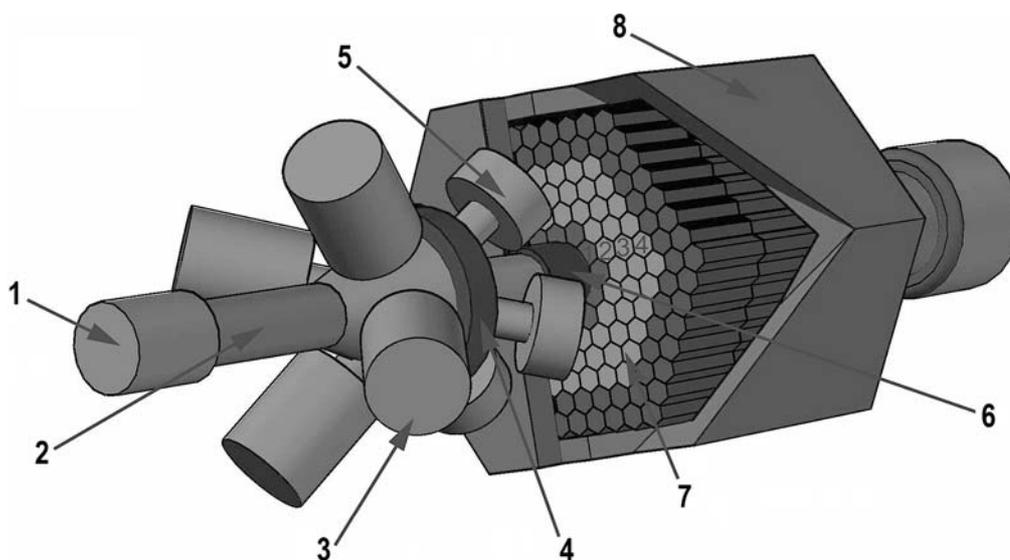


Рис. 1. Концептуальный дизайн гибридной реакторной установки «синтез-деление»: 1 – приёмник вытекающей плазмы; 2 – камера торможения продольного течения плазмы; 3 – инжекторы нагревных атомарных пучков; 4 – камера нагрева плазмы; 5 – приёмник прошедших пучков; 6 – камера генерации термоядерных нейтронов; 7 – топливная сборка ядерного реактора; 8 – нейтронная защита

В исследуемой конфигурации гибридной установки высокотемпературный плазменный шнур образуется в импульсно-периодическом режиме, и при определенной скважности следует ожидать образования расходящейся от осевой части системы «волны» деления, распространяющейся по объему топливной сборки в корреляции по времени с импульсным источником быстрых D-D-нейтронов. В этих условиях возникает необходимость исследовать процесс распространения «волны» деления и, соответственно, формирование распределения энерговыделения в объеме установки. Такие исследования позволят оптимизировать активную часть системы и нивелировать возникающие офсеты радиального и осевого полей энерговыделения в топливе.

С точки зрения решения актуальных прикладных задач современной ядерной

энергетики можно констатировать, что результаты данного исследования лягут в основу организации устойчивой работы гибридных систем, управляемых внешним импульсно-периодическим источником дополнительных нейтронов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная модель

Для исследования распространения «волны» деления детализированная 3D-модель установки (рис. 2 [1]) упрощена до бесконечного двухслойного цилиндра с центральной областью, предназначенной для плазменного генератора D-D-нейтронов (рис. 3).

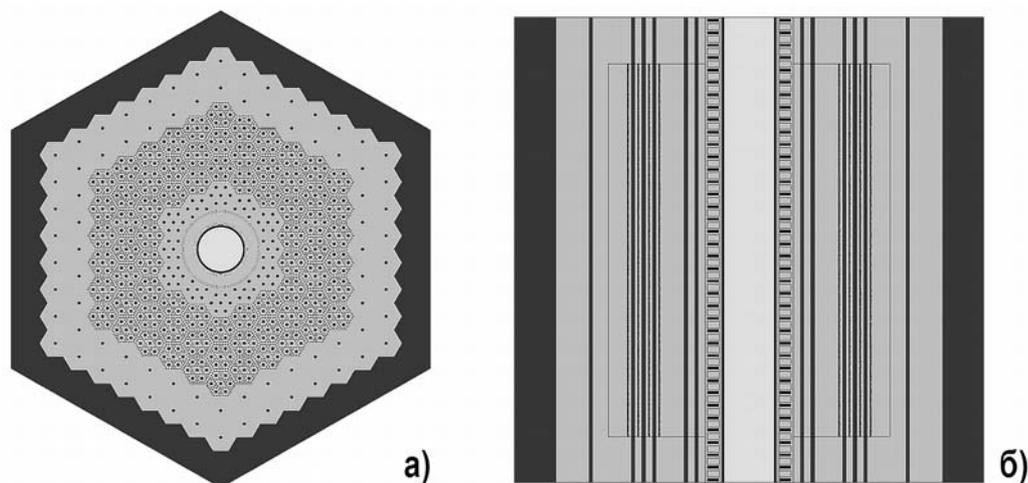


Рис. 2. Детализированная 3D-модель гибридной реакторной установки «синтез-деление»: а) – поперечное сечение; б) – продольное сечение

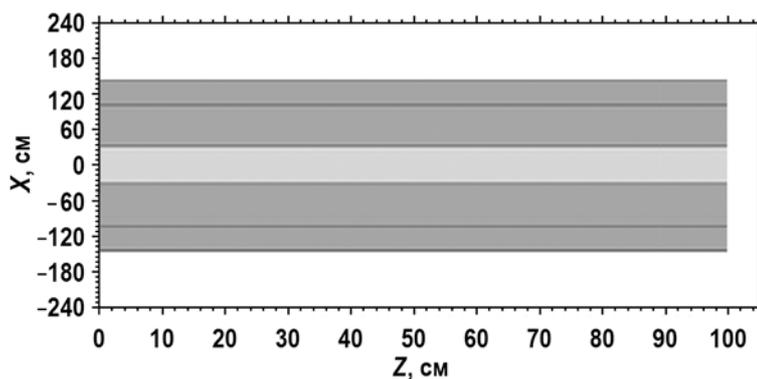


Рис. 3. Расчетная 3D-модель: продольное сечение модели в плоскости X-Z

Расчетная модель, используемая в симуляциях, представляет собой бесконечную вдоль оси OZ цилиндрически-симметричную систему (рис. 3), состоящую из трех областей, ограниченных радиусами 30, 118,34 и 154,7 см. Высота всей системы 100 см, по торцам белое зеркало. Во внутренней области модельной системы импульсно-периодический источник D-D-нейтронов (GDT-FNS), в наружной области графит отражателя плотностью 2,2 г/см³. Между этими областями расположена активная зона с гомогенизированным $\text{Th}_{(1-\alpha)}\text{-Pu}_\alpha$ -топливом, состоящая из 50-ти слоев равного объема. Исходный ядерный состав гомогенизированной области приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав гомогенизированной топливной части blankets установки

Нуклид	Концентрация нуклида, нуклид/(б·см)
²³² Th	6,57E-5
²³⁹ Pu	6,18E-5
²⁴⁰ Pu	3,29E-6
²⁴¹ Pu	6,60E-7
¹⁶ O	2,63E-4
¹² C	9,35E-2
Si	1,36E-3
Ti	3,41E-4
He	2,53E-5

Методы расчетных исследований

Моделирование стационарных нейтронно-физических характеристик и пространственно-временного распространения «волны» деления выполнено по программному комплексу PRIZMA [10] с системой констант ENDF/B-VII.1 [11], разработанному в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина».

Для определения стационарных нейтронно-физических характеристик ($k_{eff}(\alpha)$, где α – содержание Pu) проведены расчеты условно-критической задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Стационарные нейтронно-физические характеристики

Результаты расчета стационарных нейтронно-физических характеристик активной зоны, модифицированной под дополнительный D-D-источник, приведены на рис. 4 и в табл. 2.

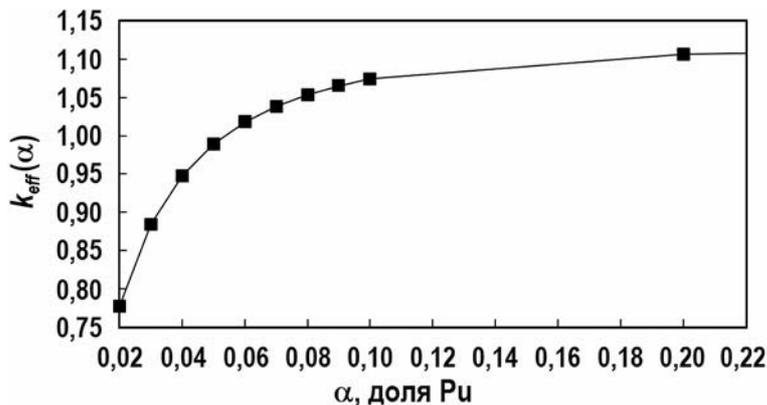


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента размножения установки от массового содержания плутония Pu (α) в Th_(1- α)-Pu $_{\alpha}$ -композиции

Таблица 2

Стационарные нейтронно-физические характеристики моделируемой системы

²³² Th, wt. %	Pu, wt. %	Концентрация нуклида, нуклид/(б·см)				k_{eff}
		²³² Th	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	
96	4	1,90E-5	1,10E-6	2,10E-7	5,09E-4	0,9460

Из рисунка и таблицы видно, что подобранный состав обеспечил требуемое для гибридных систем значение $k_{eff} = 0,95$ [12 – 17]. При этом содержание плутония в $Th_{(1-\alpha)}-Pu_{\alpha}$ -композиции составило 4%.

Пространственно-временные характеристики

Результаты расчета пространственно-временных характеристик установки (см. табл. 2) в момент ее пуска с «холодной» активной зоной демонстрирует рис. 5. Пять поперечных сечений отображают распространение «волны» делений по объему blanketsа от приосевой области, прилегающей к магнитной ловушке, в радиальном направлении. Из рисунка видно, что влияние источника нейтронов, работающего в импульсно-периодическом режиме, заметно в прилегающих к источнику слоях и исчезает не позже, чем через 0,01 мс на периферии топливных графитовых блоков blanketsа установки.

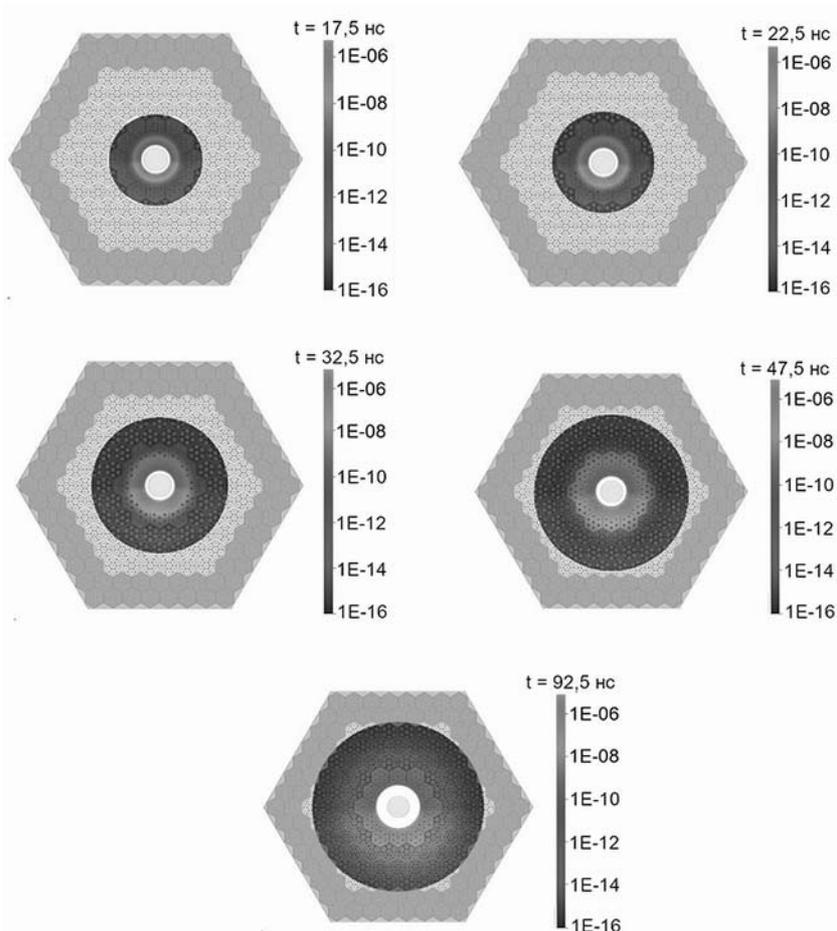


Рис. 5. Динамика энерговыделения в гибридной установке «синтез-деление»

Диффузное распределение плотности делений по всему объему blanketsа после однократного импульса быстрых нейтронов из магнитной ловушки устанавливается в течение промежутка времени порядка 0,1 мс, а время выхода на стационар составляет 0,1 с (100 мс). Результаты моделирования показали, что решение дальнейшей нейтронно-физической задачи (т.е. нахождения $k_{eff}(t)$ и других требуемых нейтронно-физических функционалов) допустимо путем замены импульсно-периодического источника нейтронов (длительность импульса 1 мс и скважность 2) на постоянно действующий квазистационарный источник.

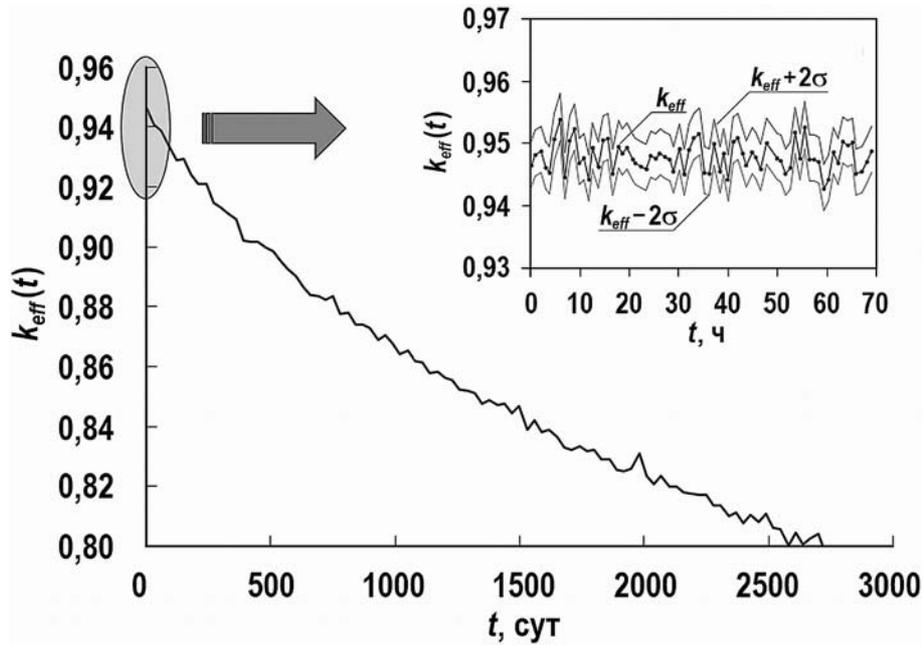


Рис. 6. Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени работы установки «синтез-деление»

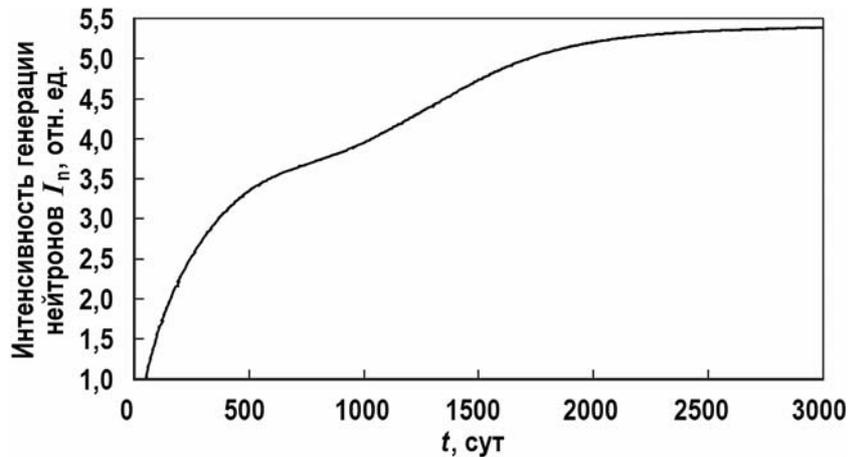


Рис. 7. Увеличение скорости производства нейтронов GDT-FNS в зависимости от времени работы установки «синтез-деление»

На рисунке 6. приведены результаты расчета зависимости $k_{eff}(t)$ для длительного режима облучения и времени облучения от 0,1 с до 3000 дней.

Результаты, показанные на рис. 6, подтверждают, что

- выбранный состав обеспечил длительную эксплуатацию установки;
- для поддержания $k_{eff}(t)$ на постоянном уровне D-D-источник должен подпитывать активную зону нейтронами; при этом интенсивность генерации нейтронов I_n должна плавно расти (рис. 7) в течение всей топливной кампании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние газодинамической ловушки GDT-FNS, работающей в импульсно-периодическом режиме, заметно в прилегающих к источнику слоях бланкета и исчезает не позже, чем через 0,01 миллисекунду на периферии топливной части блан-

кета установки.

В момент старта установки для «холодного» blankets GDT-FNS должна обеспечить стабильную интенсивность генерации D-D-нейтронов в диапазоне от $1 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{18}$ нейтронов в секунду со всего плазменного столба.

При длительности импульса 1 мс и скважности 2 GDT-FNS, работающая в требуемом диапазоне генерации D-D-нейтронов, обеспечит разогрев blankets со скоростью $10 \text{ K} \cdot \text{с}^{-1}$, что удовлетворяет требованиям соблюдения теплотехнической надежности при пуске из «холодного» состояния.

Для поддержания $k_{\text{eff}}(t)$ на постоянном уровне GDT-FNS должна постоянно подпитывать активную зону дополнительными нейтронами; при этом интенсивность генерации D-D-нейтронов должна плавно расти в течение всей топливной кампании.

Полученные в работе результаты подтвердили возможность использования программного комплекса PRIZMA, разработанного в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», для обеспечения всего перечня полномасштабных расчетов нейтронно-физических характеристик гибридной установки в различных режимах работы плазменного источника термоядерных нейтронов.

Работа поддержана РФФИ. Грант № 19-29-02005 мк.

Литература

1. Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V., Knyshev V., Lutsik I., Prikhodko V., Shamanin I. Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons. // Nuclear Science and Techniques. – 2019. – Vol. 30. – No. 181. – PP. 1-11.
2. Аржанников А.В., Шаманин И.В., Беденко С.В., Кнышев В.В., Луцки И.О., Приходько В.В., Шаманин И.В. Гибридная ториевая реакторная установка с источником термоядерных нейтронов на основе магнитной ловушки. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 43-54. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.04>.
3. Shamanin I.V., Chertkov Y.B., Bedenko S.V., Mendoza O., Knyshev V.V., Grachev V.M. Neutronic properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel. // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 113. – PP. 286-293.
4. Bedenko S.V., Ghal-Eh N., Lutsik I.O., Shamanin I.V. A fuel for generation IV nuclear energy system: Isotopic composition and radiation characteristics. // Applied Radiation and Isotopes – 2019. – Vol. 147. – PP. 189-196.
5. Yurov D.V., Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Brednikhin S.A., Frolov S.A., Lezhnin S.I., Prikhodko V.V. Parameters optimization in a hybrid system with a gas dynamic trap-based neutron source. // Fusion Engineering and Design – 2012. – Vol. 87. – PP. 1684-1692.
6. Beklemishev A., Anikeev A., Astrelin V. et al. Novosibirsk Project of Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap. // Fusion Science and Technology. – 2013. – Vol. 63(1T). – PP. 46-51.
7. Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D. et al. The GDT Experiment: Status and Recent Progress in Plasma Parameters. // Fusion Science and Technology. – 2015. – Vol. 68 (1). – PP. 1-7.
8. Bagryansky P., Chen Z., Kotelnikov I. et al. Development strategy for steady-state fusion volumetric neutron source based on the gas-dynamic trap. // Nuclear Fusion. 2020. – Vol. 60. – No. 036005. – PP. 1-15.
9. Arzhannikov A.V., Anikeev A.B., Beklemishev A.D. et al. Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel. // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1771. – No. 090004. – PP. 1-5.
10. Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntsev K.E. PRIZMA status. // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. – PP. 116-120.
11. Nuclear Energy Agency. Электронный ресурс: https://oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm (дата доступа 03.03.2020).
12. Velasquez C.E., Pereira C., Veloso M.A.F., Costa A.L., Barros G. de P. Fusion-Fission Hybrid Systems for Transmutation. // Journal of Fusion Energy. – 2016. – Vol. 35. – PP. 505-512.

13. *Simonen T.C., Moir R.W., Molvik A.W., Ryutov D.D.* A 14MeV fusion neutron source for material and blanket development and fission fuel production. // *NuclearFusion.* – 2013. – Vol. 53. – No. 063002. – PP. 1-5.
14. *Gudowski W., Arzhanov V., Broeders C. et al.* Review of the European project – Impact of Accelerator-Based Technologies on nuclear fission safety (IABAT). // *Progress in Nuclear Energy.* – 2001. Vol. 38 (1-2). – PP. 135-151.
15. *Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kurnaev V.A. et al.* Hybrid Fusion-fission Reactor with a Thorium Blanket: it's Potential in the Fuel Cycle of Nuclear Reactors. // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2015. – Vol. 78. – PP. 1100-1111.
16. *Knastera J., Arbeiter F., Carac P.E et al.* IFMIF, the European-Japanese efforts under the Broader Approach agreement towards a Li(d,xn) neutron source: Current status and future options. // *Nuclear Materials and Energy.* – 2016. Vol. 8. – PP. 46-54.
17. *Moir R.W., Martovetsky N.N., Molvik A.W., Ryutov Dimitri and Simonen T.C.* Mirror-based hybrids of recent design. // *AIP Conference Proceedings.* – 2012. – Vol. 1442. – PP. 43-54.

Поступила в редакцию 05.03.2020 г.

Авторы

Шаманин Игорь Владимирович, руководитель отделения, профессор

E-mail: shiva@tpu.ru

Беденко Сергей Владимирович, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: bedenko@tpu.ru

Шмаков Владимир Михайлович, зав. лаб., канд. физ.-мат. наук

E-mail: v.m.shmakov@vniitf.ru

Модестов Дмитрий Геннадьевич, старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук

E-mail: d.g.modestov@vniitf.ru

Кнышев Владимир Владимирович, аспирант

E-mail: vvk28@tpu.ru

Луцик Игорь Олегович, аспирант

E-mail: iol4@tpu.ru

Полозков Сергей Дмитриевич, студент

E-mail: sdp2@tpu.ru

UDC 621.039.5

POWER DENSITY DYNAMICS IN A NUCLEAR REACTOR WITH AN EXTENDED IN-CORE PULSE-PERIODIC NEUTRON SOURCE BASED ON A MAGNETIC TRAP

Shamanin I.V. *, Bedenko S.V. *, Shmakov V.M. **, Modestov D.G. **, Knyshhev V.V. *, Lutsik I.O. *, Polozkov S.D. *

* National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Pr., Tomsk, 634050 Russia

** FSUE «RFNC - VNIITF n.a. Academician E.I. Zababakhin»

13 Vasilyeva Avenue, Snezhinsk, 456770 Russia

ABSTRACT

Spatial kinetics peculiarities of an innovative hybrid nuclear power facility with an extended neutron source based on a magnetic trap are investigated. The investigated fusion-fission facility includes a reactor plant the core of which consists

of a unitized HTGR reactor thorium-plutonium fuel block assembly and a lengthy magnetic trap which runs through the near-axis reactor core region. The engineering solution for the neutron plasma generator is based on an online gas dynamic trap based on a fusion neutron source (GDT-FNS) developed at the Novosibirsk G.I. Budker Nuclear Physics Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The GDT-FNS high-temperature plasma pinch is formed in a pulse periodic mode in the investigated hybrid facility configuration, and, at a certain pulse ratio, one should expect the formation of a fission wave that diverges from the axial part of the system and propagates over the volume of the fuel block assembly in a time correlation with the fast D-D neutron pulse source. In these conditions, it is essential to study the fission wave propagation process and, accordingly, the power density distribution formation within the facility's blanket. The paper presents the results of a study into the steady-state and spatial-time performance of neutron fluxes and the power density dynamics in the facility under investigation. The steady-state neutronic performance and the spatial-time fission wave propagation were simulated using the PRIZMA code developed at VNIITF.

This research was supported by RFBR, Project no. 19-29-02005 mk.

Key words: fission wave, D-D neutron plasma pulse periodic generator, fusion-fission hybrid reactor.

REFERENCES

1. Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V. et al. Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons. *Nuclear Science and Techniques*. 2019, v. 30, no. 181, pp. 1-11.
2. Arzhannikov A.V., Shamanin I.V., Bedenko S.V., et al. Hybrid thorium energy producing subcritical stand with a fusion neutron source based on a magnetic trap. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 2, pp. 43-54. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.04> (in Russian).
3. Shamanin I.V., Chertkov Y.B., Bedenko S.V., Mendoza O., Knyshev V.V., Grachev V.M. Neutronic properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel. *Annals of Nuclear Energy*. 2018, v. 113, pp. 286-293.
4. Bedenko S.V., Ghal-Eh N., Lutsik I.O., Shamanin I.V. A fuel for generation IV nuclear energy system: Isotopic composition and radiation characteristics. *Applied Radiation and Isotopes*. 2019, v. 147, pp. 189-196.
5. Yurov D.V., Anikeev A.V., Bagryansky P.A., et al. Parameters optimization in a hybrid system with a gas dynamic trap-based neutron source. *Fusion Engineering and Design*. 2012, v. 87, pp. 1684-1692.
6. Beklemishev A., Anikeev A., Astrelin V. et al. Novosibirsk Project of Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap. *Fusion Science and Technology*. 2013, v. 63(1T), pp. 46-51.
7. Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D. et al. The GDT Experiment: Status and Recent Progress in Plasma Parameters. *Fusion Science and Technology*. 2015, v. 68(1), pp. 1-7.
8. Bagryansky P., Chen Z., Kotelnikov I. et al. Development strategy for steady-state fusion volumetric neutron source based on the gas-dynamic trap. *Nuclear Fusion*. 2020, v. 60, no. 036005, pp. 1-15.
9. Arzhannikov A.V., Anikeev A.B., Beklemishev A.D. et al. Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-physical Characteristics of Thorium Fuel. *AIP Conference Proceedings*. 2016, v. 1771, no. 090004, pp. 1-5.
10. Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntsev K.E. PRIZMA status. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 82, pp. 116-120.
11. Nuclear Energy Agency. Available at: https://oecd-nea.org/dbdata/data/nds_eval_libs.htm, (accessed Mar 03, 2020).
12. Velasquez C.E., Pereira C., Veloso M.A.F. et al. Fusion-Fission Hybrid Systems for

Transmutation. *Journal of Fusion Energy*. 2016, v. 35, pp. 505-512.

13. Simonen T.C., Moir R.W., Molvik A.W., Ryutov D.D. A 14MeV fusion neutron source for material and blanket development and fission fuel production. *Nuclear Fusion*. 2013, v. 53, no. 063002, pp. 1-5.

14. Gudowski W., Arzhanov V., Broeders C., et al. Review of the European project – Impact of Accelerator-Based Technologies on nuclear fission safety (IABAT). *Progress in Nuclear Energy*. 2001, v. 38 (1-2), pp. 135-151.

15. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kurnaev V.A. et al. Hybrid Fusion-Fission Reactor with a Thorium Blanket: it's Potential in the Fuel Cycle of Nuclear Reactors. *Physics of Atomic Nuclei*. 2015, v. 78, pp. 1100-1111.

16. Knastera J., Arbeiter F., Carac P. et al. IFMIF, the European-Japanese efforts under the Broader Approach agreement towards a Li(d,xn) neutron source: Current status and future options. *Nuclear Materials and Energy*. 2016, v. 8, pp. 46-54.

17. Moir R.W., Martovetsky N.N., Molvik A.W., Ryutov Dimitri and Simonen T.C. Mirror-based hybrids of recent design. *AIP Conference Proceedings*. 2012, v. 1442, pp. 43-54.

Authors

Shamanin Igor Vladimirovich, Head of Department, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: shiva@tpu.ru

Bedenko Sergey Vladimirovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: bedenko@tpu.ru

Shmakov Vladimir Mikhailovich, Head of Lab., Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: v.m.shmakov@vniitf.ru

Modestov Dmitry Gennadyevich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: d.g.modestov@vniitf.ru

Knyshev Vladimir Vladimirovich, PhD Student

E-mail: vvk28@tpu.ru

Lutsik Igor Olegovich, PhD Student

E-mail: iol4@tpu.ru

Polozkov Sergey Dmitrievich, Student

E-mail: sdp2@tpu.ru