

## ГИБРИДНАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА СИНТЕЗ-ДЕЛЕНИЕ: ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

**Беденко С.В.\*, Луцик И.О.\*\*, Матюшин А.А.\*\*\*, Полозков С.Д.\*,  
Шмаков В.М.\*\*\*\*, Модестов Д.Г.\*\*\*\*, Приходько В.В.\*\*\*\*\*,  
Аржанников А.В.\*\*\*\*\***

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

\*\* *АО «Сибирский химический комбинат»*

635039, г. Северск, ул. Курчатова, д. 1

\*\*\* *АО ОКБ «Гидропресс»*

142103, г. Подольск, ул. Орджоникидзе, д.21

\*\*\*\* *ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина»*

456770, г. Снежинск, ул. Васильева, д. 13

\*\*\*\*\* *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

630090 г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, д. 11



Текущее состояние исследований в области ядерной и термоядерной энергии с целью создания энергопроизводящих установок позволяет прогнозировать дальнейшее развитие современной энергетики в направлении гибридных систем. К таким гибридным системам можно отнести детально проработанный в России токамак с реакторными технологиями и системы с дополнительным источником нейтронов.

Станции по производству энергии с использованием токамаков и ускорителей с необходимым уровнем энергии протонов будут иметь исключительно большие размеры и мощность, и это отодвигает их сооружение в промышленном масштабе в отдаленное будущее. Проводимые исследования направлены на развитие малой генерации и имеют перспективу выхода в область энергетического использования в более короткий срок. Исследуемая в работе гибридная реакторная установка состоит из осесимметричной сборки топливных блоков высокотемпературного газоохлаждаемого реактора и плазменного источника дополнительных нейтронов линейной конфигурации. В работе демонстрируются результаты оптимизационных плазменно-физических, теплофизических и газодинамических исследований, цель которых – нивелировать перекосы поля энерговыделения, формирующиеся в объеме мультиплицирующей части установки за счет импульсного режима работы плазменного источника D-T-нейтронов. Исследования по увеличению «яркости» источника и моделирование режимов его работы выполнены в программах DOL и PRIZMA. Теплофизическая оптимизация и газодинамические расчеты проведены с применением верифицированных программных кодов SERPENT и FloEFD.

Расчёты выполнены на высокопроизводительном кластере Томского политехнического университета.

© *Беденко С.В., Луцик И.О., Матюшин А.А., Полозков С.Д., Шмаков В.М., Модестов Д.Г., Приходько В.В., Аржанников А.В., 2022*

**Ключевые слова:** гибридная реакторная установка «синтез-деление», плазменный источник D-T-нейтронов, профилирование энерговыделения, температурное поле.

## ВВЕДЕНИЕ

Текущее состояние исследований в области ядерной и термоядерной энергии [1 – 17] с целью создания энергоустановок позволяет прогнозировать дальнейшее развитие современной энергетики в направлении гибридных систем. Поэтому в феврале 2022 г. Госкорпорацией «Росатом» на семинаре «Управляемый термоядерный синтез и плазменные технологии» анонсировались системы с использованием источников термоядерных нейтронов на основе токамаков [1, 10].

К таким системам относится детально проработанный в России токамак с реакторными технологиями ТРТ [1, 10], который планируется ввести в эксплуатацию АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» к 2030 г. [1].

К другой концепции относятся системы с дополнительным источником нейтронов, образующихся при бомбардировке мишени пучком протонов высоких энергий [2, 3, 16, 17].

Гибридные энергоустановки на основе токамаков и ускорителей с необходимым уровнем энергии протонов будут иметь исключительно большие размеры и гигантскую мощность, и это отодвигает их сооружение в промышленном масштабе в отдалённое будущее.

Проводимые исследования [7 – 9, 13, 14, 17] направлены на развитие малой генерации и имеют перспективу выхода в область энергетического использования в более короткий срок. Исследуемая в работе установка является гибридным реактором, активная зона (бланкет) которого состоит из сборки призматических графитовых блоков [18, 19] и протяжённого плазменного источника дополнительных D-T-нейтронов (ПИН) линейной конфигурации [20, 21].

Применение такого источника позволяет перевести всю систему в подкритический режим эксплуатации и тем самым кардинально повысить уровень её ядерной безопасности, а также изменением «жёсткости» энергетического спектра нейтронов обеспечить более эффективное использование топлива.

В [14, 17] показано, что при поступлении из ПИН в мультиплицирующую часть установки потока нейтронов интенсивностью  $2,56 \cdot 10^{17} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$  поток возрастет до величины  $\sim 1 \cdot 10^{20} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ . При импульсно-периодическом режиме работы ПИН возникают перекосы поля энерговыделения. Вследствие этого формируется градиент температурного поля, что требует исследование динамики процесса формирования пространственного энерговыделения.

В работе продемонстрированы оптимизационные плазменно-физические, теплофизические исследования и результаты газодинамического моделирования, цель которых – нивелировать возникающие перекосы радиального и осевого поля энерговыделения, формирующиеся в бланкете за счёт импульсного режима работы ПИН.

## МЕТОДЫ РАСЧЁТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемая установка (рис. 1) состоит из плазменного источника D-T-нейтронов и бланкетной части. В основу бланкетной части положена концепция активной зоны многоцелевой высокотемпературной газоохлаждаемой реакторной установки малой мощности [18, 19] с модифицированной под ПИН приосевой областью [13]. Модифицированная активная зона [14, 20] представляет собой бланкет, составленный из призматических графитовых топливных и бестопливных блоков, содержащих в цилиндрических каналах дисперсионное  $(\text{Th,Pu})\text{O}_2$ -топливо [19].

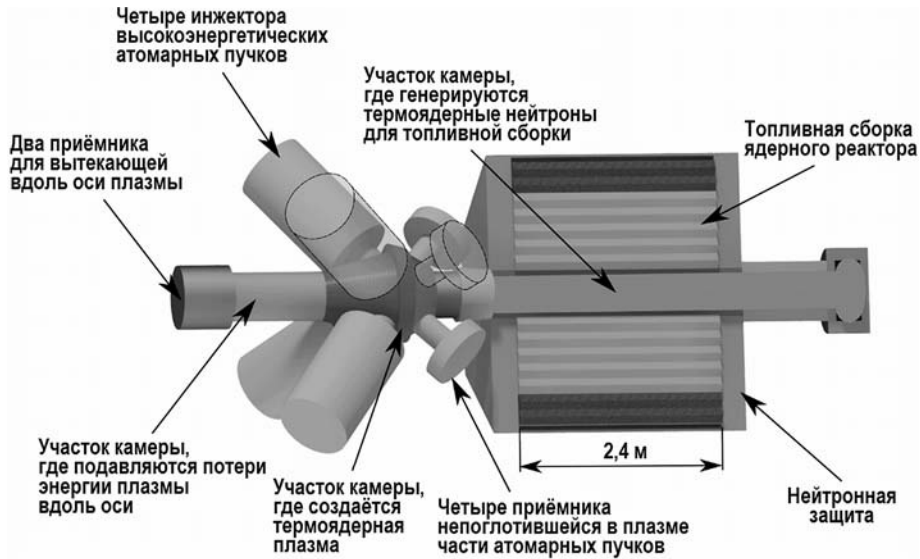


Рис. 1. Концептуальный дизайн гибридной реакторной установки «синтез-деление» [13, 14]

ПИН представляет собой плазменную вакуумную камеру линейной конфигурации [20, 21], в которой магнитное поле удерживает высокотемпературную плазму. Эта область ограничивается магнитными пробками, которые на рис. 2 расположены на координатах  $u_1 = -5$  м и  $u_2 = 10$  м.

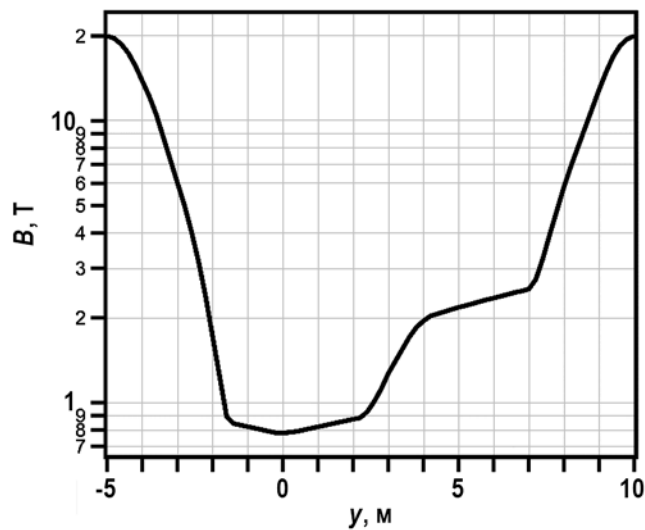


Рис. 2. Индукция магнитного поля  $B(u)$  в зависимости от координаты  $u$  вдоль оси установки

Данную область вакуумной камеры можно разделить на две части. Первая предназначена для размещения инжекторов атомарных пучков, осуществляющих ввод энергии в плазму. Эта часть камеры имеет большой диаметр и служит основным объемом, где удерживается компонент плазмы с тёплыми ионами. Индукция магнитного поля в этой части камеры практически не зависит от координаты  $u$  в интервале значений  $-1,8 \text{ м} < u < 2,2 \text{ м}$ . Вторая часть камеры (см. координаты  $4 \text{ м} < u < 7 \text{ м}$  на рис. 2) располагается внутри подкритического бланкета. В этой трехметровой части камеры генерируются D-T-нейтроны, поступающие в бланкет. Магнитное поле здесь медленно нарастает, обеспечивая равномерный профиль производства нейтронов. С

ориентацией на достигнутые в расчетных экспериментах параметры плазмы (см. профиль поля  $B(y)$  на рис. 2) в коде DOL [21] выполнено моделирование процесса генерации D-T-нейтронов с максимальным выходом  $I_n$  в бланкетную часть на уровне  $\sim 1 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{19} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Продольный профиль выхода этих нейтронов  $I_n(y)$  применялся для определения пиковых значений энерговыделения в задаче по теплофизической оптимизации мультиплицирующей части установки.

Следует отметить, что в исследуемой конфигурации «ПИН – бланкет» плазменный шнур формируется в импульсно-периодическом режиме, а «волна» делений ядер  $(\text{Th}, \text{Pu})\text{O}_2$ -топлива распространяется от приосевой области по всей мультиплицирующей части пропорционально по времени с работой ПИН. Исследование динамики процесса деления ядер топлива выполнено по коду PRIZMA [22] в комбинации с подпрограммами, специально разработанными сотрудниками РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина.

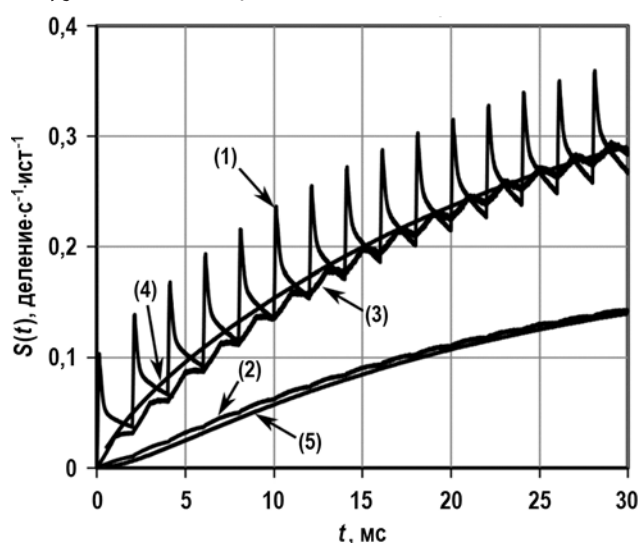


Рис. 3. Сравнение скорости делений ядер в бланкете установки при импульсно-периодическом (линии 1 – 3) и стационарном (линии 4, 5) режимах работы ПИН: (1) – слой 1 [ $t = 0,1 \text{ мс}$ ,  $T = 2 \text{ мс}$ ]; (2) – слой 50 [ $t = 0,1 \text{ мс}$ ,  $T = 2 \text{ мс}$ ]; (3) – слой 1 [ $t = 1 \text{ мс}$ ,  $T = 2 \text{ мс}$ ]; (4) – слой 1; (5) – слой 50

В ходе моделирования исследованы импульсно-периодический и стационарный режимы работы установки. Результаты моделирования (рис. 3, слой 1 входит в расчетную область второго ряда топливных блоков, слой 50 входит в расчетную область четвертого (периферийного) ряда топливных блоков) показали, что сокращение длительности импульса при одном и том же периоде следования импульсов приводит к увеличению числа  $S(t)$  делящихся ядер топлива в единицу времени, а с увеличением длительности импульса при том же значении нейтронов в импульсе наблюдается противоположный эффект. Из рисунка 3 (см. линии 2 и 3) можно также увидеть, что в условиях, когда длительность импульсов порядка 1 мс влияние нестационарности эмиссии нейтронов проявляется слабо во всех топливных блоках. Этот результат позволяет рассматривать импульсный источник как квазистационарный и использовать для целей теплофизической оптимизации реакторный код Serpent 2.1.31. При моделировании использовались оценённые ядерные данные в формате ACE, конвертированные из ENDF-B/VII.1 с дополнительной библиотекой ядерных данных в области термализации нейтронов для графита.

Газодинамическое моделирование выполнено методом конечных элементов в сопряженной постановке: учтен как теплообмен за счет теплопроводности, так и конвективный теплообмен. Конфигурация бланкета приведена в работе [14] на рис. 2. При по-

строении сеточной модели применялся стандартный генератор сетки FloEFD из программного кода Siemens Simcenter FloEFD 2020.2. Для моделирования турбулентности потока гелия использовались реализованные в FloEFD двустеночные пристеночные функции. Такой подход позволяет в зависимости от параметров течения потока и размера сетки в пристенной области рассчитывать пограничный слой двумя вариантами (модели «тонкого» и «толстого» пограничного слоя) с удовлетворительной точностью. Для эффективного охлаждения бланкета и ПИН проведена серия оптимизационных параметрических расчетов, в которых варьируемыми параметрами являлись параметры по теплоносителю (температура, давление и скорость), а целевыми – температурные экстремумы материалов ПИН и бланкета. При выборе параметров гелия, теплофизических свойств гелия, конструкционных материалов и топлива учтены опыт проектирования и эксплуатации реактора HTTR [24] и результаты исследований [25].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теплофизическая оптимизация бланкета выполнена профилированием энерговыделения по радиусу мультиплицирующей части путем изменения содержания доли Pu. Топливные блоки второго – четвертого рядов (см. спецификаторы 1 – 4 на рис. 2а в [14]) загружены топливом с объемной долей дисперсной фазы  $w_{pf} = 7, 13, 17$  и 21% (базовое значение – 17%). При этой загрузке (см. правую 1/12-ю часть сегмента расчетной модели на рис. 4а) радиальный профиль энерговыделения становится более равномерным, а пиковые значения мощности энерговыделения снижены на 19% по сравнению с непрофилированным бланкетом.

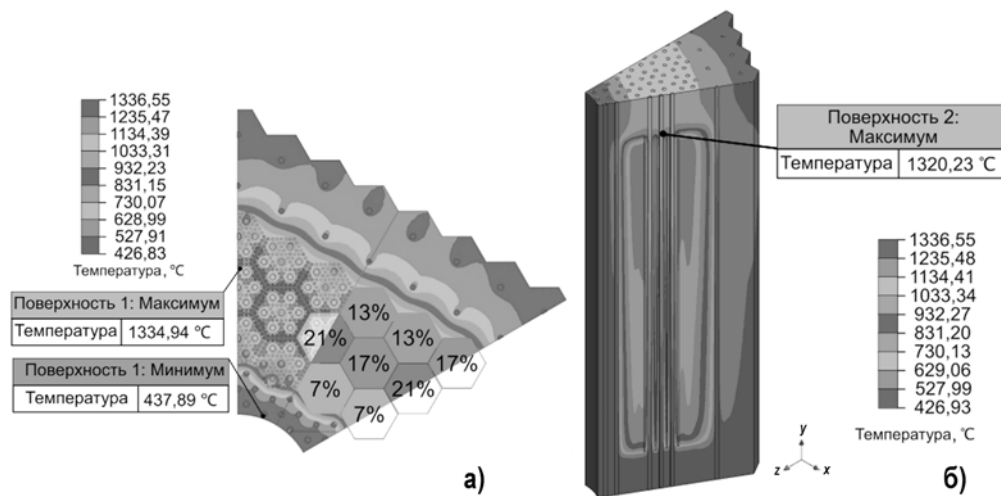


Рис. 4. Картограмма загрузки (а) и профиль температуры бланкета на участке с максимальной температурой (б)

Результаты численного газодинамического моделирования, представленные на рис. 4, показали что температура первого бестопливного и второго ряда топливных блоков снижена до требуемых для нормальной эксплуатации ПИН значений.

Наиболее энергонапряженная область бланкета расположена в третьем ряду на высоте 2,56 м (рис. 4б). Максимальная температура топлива и прилегающего графита здесь достигает 1335°C и меняется по радиусу незначительно, обеспечивая тем самым практически равномерный профиль температуры третьего и четвертого рядов блоков. Отметим, что рабочие температуры дисперсного  $(Th,Pu)O_2$ -топлива и графита не должны превышать 1250 и 1300°C соответственно [23 – 25]. Для заданных по теплоносителю граничных условий (скорость гелия на входе 30 м·с<sup>-1</sup>, температура 427°C, давление гелия 7 МПа) мы видим некоторое превышение предельных значений по температуре.

Выбранные граничные условия при наблюдаемом локальном перегреве топлива и графита позволяют получить температуру гелия (~ 800°C на выходе из топливных блоков третьего ряда), требуемую для производства водорода методом паровой конверсии метана.

Энергонапряженность третьего ряда можно снизить, например, за счет изменения конфигурации проходного сечения каналов под теплоноситель, при этом сохранив прежним проходное сечение первого, второго и четвертого рядов блоков. Другой вариант, не требующий дополнительных нейтронных и теплофизических расчетов, заключается в использовании местного сопротивления, например, за счет применения так называемых шайб расходомерных или интенсификаторов теплообмена.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе продемонстрированы результаты оптимизационных плазменно-физических, теплофизических и газодинамических исследований.

Результаты выполненных в ИЯФ им. акад. Г.И. Будкера СО РАН исследований позволили улучшить удержание плазмы (см. рис. 2) за счет подавления продольных потерь многопробочными секциями и повысить «яркость» источника с уровня  $2,56 \cdot 10^{17} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$  до рекордных  $2,77 \cdot 10^{18} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Моделирование работы плазменного источника нейтронов в связке с бланкетной мультиплицирующей частью выполнено коллегами из ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина». В ходе этого моделирования исследованы динамика процесса деления ядер топлива и формирование пространственного энерговыделения при импульсном и стационарном режимах работы установки. Полученный результат (см. рис. 3) позволил рассматривать импульсный источник как квазистационарный и выполнить теплофизическую оптимизацию (см. рис. 4а) в нейтронных исследованиях по коду SERPENT.

Томским политехническим университетом в кооперации с ОКБ «Гидропресс» проведены газодинамические исследования условий охлаждения бланкета установки. Результаты параметрических оптимизационных расчетов (см. рис. 4) показали удовлетворительное согласие основных эксплуатационных параметров бланкета с аналогичными экспериментальными параметрами референтных установок типа ВТГР.

Результаты трехлетней работы по обоснованию возможной интеграции установки в действующий парк малой генерации позволяют приступить к эскизному проектированию безопасной конструкции подкритического гибридного реактора.

### **Благодарность**

Работа инициирована проф. И.В. Шаманиным в 2019 г. и поддержана РФФИ, грант № 19-29-02005.

### **Литература**

1. Атомная энергия 2.0. Росатом планирует расширить исследования в области термоядерных и плазменных технологий. Электронный ресурс: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/03/04/122518> (дата доступа 27.04.2022).
2. AtomInfo. MYRRHA – последние новости. Электронный ресурс: <http://atominfo.ru/news03/a0200.htm> (дата доступа 27.04.2022).
3. Abderrahim H.A., Kupschus P., Malambu E. et al. MYRRHA: A Multipurpose Accelerator Driven System for Research & Development. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2001. – Vol. 463 (3). – PP. 487-494. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00164-4).
4. Wu Y. Design and R&D Progress of China Lead-Based Reactor for ADS Research Facility. // Engineering. – 2016. – Vol. 2 (1). – PP. 124-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.023>.



5. *Salvatores M., Orsitto F., Carta M. et al.* An Approach to the Experimental Validation of the Fission Multiplying Blanket of Hybrid Fusion Fission Systems. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2021. – Vol. 157. – No 108055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108055>.
6. *Ananyev S.S., Ivanov B.V. and Kuteev B.V.* Analysis of Promising Technologies of DEMO-FNS Fuel Cycle. // *Fusion Engineering and Design*. – 2020. – Vol. 161. – No 111940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111940>.
7. *Arzhannikov A.V., Shmakov V.M., Modestov D.G. et al.* Facility to Study Neutronic Properties of a Hybrid Thorium Reactor with a Source of Thermonuclear Neutrons Based on a Magnetic Trap. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 52 (11). – PP. 2460-2470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.003>.
8. *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. – Vol. 30 (12). – PP. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0707-y>.
9. *Bedenko S.V., Arzhannikov A.V., Lutsik I.O. et al.* Maintaining the Close-to-Critical State of Thorium Fuel Core of Hybrid Reactor Operated Under Control by DT Fusion Neutron Flux. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 53 (6). – PP. 1736-1746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.11.026>.
10. *Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н. и др.* Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. // *Физика плазмы*. – 2021. – Т. 47 (11). – С. 970-985. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>.
11. *Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kurnaev V.A. et al.* Hybrid Fusion-Fission Reactor with a Thorium Blanket: Its Potential in the Fuel Cycle of Nuclear Reactors. // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2015. – Vol. 78 (10). – PP. 1100-1111. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778815100117>.
12. *Moir R.W., Martovetsky N.N., Molvik A.W., Ryutov D. and Simonen T.C.* Mirror-Based Hybrids of Recent Design. / In *AIP Conference Proceedings*. – American Institute of Physics, 2012. – Vol. 1442 (1). – PP. 43-54. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4706853>.
13. *Arzhannikov A.V., Anikeev A.V., Beklemishev A.D. et al.* Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-Physical Characteristics of Thorium Fuel. / In *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2016. – Vol. 1771 (1). – No 090004. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964246>.
14. *Беденко С.В., Луцки И.О., Матюшин А.А. и др.* Гибридная реакторная установка «синтез-деление»: нейтронные исследования. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2021. – № 4. – С. 31-41. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.03>.
15. *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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(00\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00099-8).
16. *Knaster J., Arbeiter F., Cara 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. – Vol. 9. – PP. 46-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.NME.2016.04.012>.
17. *Prihodko V.V. and Arzhannikov A.V.* Simulations of Fusion Neutron Source Based on the Axially Symmetric Mirror Trap for the Thorium Hybrid Reactor. // In *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1647(1). – No 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1647/1/012004>.
18. *Шаманин И.В., Беденко С.В., Чертков Ю.Б., Губайдулин И.М.* Газоохлаждаемый ядерный реактор с ториевым топливом на основе топливного блока унифицированной конструкции. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2015. – № 3. – С. 124-134. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.13>.
19. *Bedenko S.V., Ghal-Eh N., Lutsik I.O. and 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.03.005>.

20. *Yurov D.V., Prikhodko V.V. and Tsidulko Y.A.* Nonstationary Model of an Axisymmetric Mirror Trap with Nonequilibrium Plasma. // Plasma Physics Reports. – 2016. – Vol. 42 (3). – PP. 210-225. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X16030090> .

21. *Anikeev A.V., Prikhodko V.V. and Yurov D.V.* Parameters of a Fusion Neutron Source Based on the Recent GDT Experimental Data and Possible Applications. // Fusion Science and Technology. – 2015. – Vol. 68 (1). – PP. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.13182/FST14-863> .

22. *Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntsev K.E. et al.* PRIZMA Status. // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. – PP. 116-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.006> .

23. *Shaimerdenov A., Gizatulin S., Dyussambayev D. et al.* Study on the Effect of Long-Term High Temperature Irradiation on TRISO Fuel. // Nuclear Engineering and Technology. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.02.026> .

24. *Bess J. & Fujimoto N.* Benchmark Evaluation of Start-Up and Zero-Power Measurements at the High-Temperature Engineering Test Reactor. // Nuclear Science and Engineering. – 2014. – Vol. 178. – PP. 414-427. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE14-14> .

25. *Bedenko S.V., Karengin A.G., Ghal-Eh N., Alekseev N. I., Knyshev V.V. and Shamanin I.V.* Thermo-physical Properties of Dispersion Nuclear Fuel for a New-Generation Reactors: A Computational Approach. / In AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Vol. 2101 (1). – No 020002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5099594> .

Поступила в редакцию 03.05.2022 г.

#### **Авторы**

Беденко Сергей Владимирович, доцент, канд. физ.-мат. наук  
E-mail: [bedenko@tpu.ru](mailto:bedenko@tpu.ru)

Луцки Игорь Олегович, аспирант  
E-mail: [iol4@tpu.ru](mailto:iol4@tpu.ru)

Матюшин Антон Андреевич, инженер-конструктор  
E-mail: [matyushinanton1994@gmail.com](mailto:matyushinanton1994@gmail.com)

Полозков Сергей Дмитриевич, аспирант  
E-mail: [sdp2@tpu.ru](mailto:sdp2@tpu.ru)

Шмаков Владимир Михайлович, зав. лаб., канд. физ.-мат. наук  
E-mail: [v.m.shmakov@vniitf.ru](mailto:v.m.shmakov@vniitf.ru)

Модестов Дмитрий Геннадьевич, старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук  
E-mail: [d.g.modestov@vniitf.ru](mailto:d.g.modestov@vniitf.ru)

Приходько Вадим Вадимович, старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук  
E-mail: [v.v.prikhodko@inp.nsk.su](mailto:v.v.prikhodko@inp.nsk.su)

Аржанников Андрей Васильевич, главный научный сотрудник, профессор, др. физ.-мат. наук  
E-mail: [A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su)



## **HYBRID FUSION-FISSION REACTOR FACILITY: POWER PROFILING**

Bedenko S.V.\* , Lutsik I.O.\*\* , Matyushin A.A.\*\*\* , Polozkov S.D.\* , Shmakov V.M.\*\*\*\* , Modestov D.G.\*\*\*\* , Prikhodko V.V.\*\*\*\*\* , Arzhannikov A.V.\*\*\*\*\*

\* National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia

\*\* Siberian Chemical Plant JSC

1 Kurchatov Str., 635039 Seversk, Russia

\*\*\* OKB Hidropress JSC

21 Ordzhonikidze Str., 142103 Podolsk, Russia

\*\*\*\* All-Russian Research Center VNIITF

13 Vasilyev Str., 456770 Snezhinsk, Russia

\*\*\*\*\* Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS

11 Acad. Lavrentyev Ave., 630090 Novosibirsk, Russia

### ABSTRACT

The current state of research aimed for utilizing the fission processes of heavy and fusion of light nuclei in creation of energy facilities for consumers makes possible to predict the development of modern energy industry in the direction of creating hybrid power plants. Such facility includes one subsystem containing heavy hydrogen isotopes for the fusion process and another subsystem represents blanket loaded with isotopic composition fuel characteristic of typical industrial fission reactors. As one of the examples such facilities is a detailed project for the tokamak with reactor technologies designed in Russia, in which thermonuclear plasma torus is covered by a blanket with nuclear fuel. Another scientific community well-known project of a hybrid reactor is a volume loaded with fuel for nuclear fission reactors which receives from the outside an additional neutron flux produced in heavy isotopes due to irradiation by a high energy proton beam from a high-power accelerator. The implementation of such hybrid power plant with usage of external neutron fluxes emerging from the tokamak plasma or from a target irradiated by the proton beam from a high-energy accelerator turns out to be acceptable for practice only with its tens of Gig watts power. This power level determines the possibility of creation such power station in a very distant future.

In contrast to the direction of research on the creation of gigantic energy hybrid plants, our research is aimed at the development of the facility for a power level about 100 MW<sub>th</sub> at using the positive features of hybrid plants. The creation of hybrid plants with mentioned moderate power level is quite possible in the next fifteen to twenty years. In this case, it opens up possibility for practice application of the energy hybrid plants in an acceptable, relatively short time.

This article describes the results of studies of the thermophysical and gas-dynamic characteristics of the operating state of the fusion-fission reactor facility proposed in our previous paper. This facility consists of an axial symmetric assembly of fuel blocks of a high-temperature gas-cooled reactor and a linear configuration plasma source of additional neutrons. The paper demonstrates the results of joint optimization thermophysical and gas-dynamic studies in order to decrease the radial energy release field offsets formed in the facility volume intended for the neutron multiplication. These offsets accrue as result of the pulsed mode of the D-T neutron source operation.

### **Acknowledgment**

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-29-02005.

## REFERENCES

1. Atomnaya Energiya 2.0. Rosatom Plans to Expand Research in the Field of Thermonuclear and Plasma Technologies Available at: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/03/04/122518> (accessed Apr. 27, 2022) (in Russian).
2. AtomInfo. The Belgian Nuclear Center SCK-CEN Provided Information on a Course of Construction the New Isotope MYRRHA Reactor. Available at: <http://atominfo.ru/newsz03/a0200.htm> (accessed Apr. 27, 2022) (in Russian).
3. Abderrahim H.A., Kupschus P., Malambu E., Benoit P., Van Tichelen K., Arien B., Vermeersch F., D'hondt P., Jongen Y., Ternier S. and Vandeplassche D. MYRRHA: A Multipurpose Accelerator Driven System for Research & Development. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2001, v. 463 (3), pp. 487-494; DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00164-4).
4. Wu Y. Design and R&D progress of China lead-based reactor for ADS research facility. *Engineering*. 2016, v. 2 (1), pp. 124-131; DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.023>.
5. Salvatores M., Orsitto F., Carta M., Burgio N., Fabrizio V., Falconi L., Palomba M. and Panza F. An Approach to the Experimental Validation of the Fission Multiplying Blanket of Hybrid Fusion Fission Systems. *Annals of Nuclear Energy*. 2021, v. 157, no. 108055; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108055>.
6. Ananyev S.S., Ivanov B.V. and Kuteev B.V. Analysis of Promising Technologies of DEMO-FNS Fuel Cycle. *Fusion Engineering and Design*. 2020, v. 161, no. 111940; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111940>.
7. Arzhannikov A.V., Shmakov V.M., Modestov D.G., Bedenko S.V., Prikhodko V.V., Lutsik I.O. and Shamanin I.V. Facility to Study Neutronic Properties of a Hybrid Thorium Reactor with a Source of Thermonuclear Neutrons Based on a Magnetic Trap. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020, v. 52(11), pp. 2460-2470; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.003>.
8. Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V., Knyshev V., Lutsik I., Prikhodko V. and 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, v. 30 (12), pp. 1-11; DOI: <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0707-y>.
9. Bedenko S.V., Arzhannikov A.V., Lutsik I.O., Prikhodko V.V., Shmakov V.M., Modestov D.G., Karengin A.G. and Shamanin I.V. Maintaining the Close-to-Critical State of Thorium Fuel Core of Hybrid Reactor Operated Under Control by DT Fusion Neutron Flux. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021, v. 53 (6), pp. 1736-1746; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.11.026>.
10. Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N., Mazul I.V., Rodin I.Yu., Mineev A.B., Kuzmin E.G., Kavin A.A., Karpov D.A., Leonov V.M., Khairutdinov R.R., Kukushkin A.S., Portnov D.V., Ivanov A.A., Belchenko Yu.I., Denisov G.G. Tokamak with Reactor Technologies (TRT): Conception, Missions, Main Peculiarities and Expected Characteristics. *Fizika Plazmy*. 2021, v. 47 (11), pp. 970-985; DOI: <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196> (in Russian).
11. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kurnaev V.A., Salahutdinov G.H., Kulikov E.G. and Apse V.A. Hybrid Fusion-Fission Reactor with a Thorium Blanket: Its Potential in the Fuel Cycle of Nuclear Reactors. *Physics of Atomic Nuclei*. 2015, v. 78 (10), pp.1100-1111; DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778815100117>.
12. Moir R.W., Martovetsky N.N., Molvik A.W., Ryutov D. and Simonen T.C. Mirror-Based Hybrids of Recent Design. *In AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics. 2012, v. 1442, no. 1, pp. 43-54; DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4706853>.
13. Arzhannikov A.V., Anikeev A.V., Beklemishev A.D., Ivanov A.A., Shamanin I.V., Dyachenko A.N. and Dolmatov O.Y. Subcritical Assembly with Thermonuclear Neutron Source as Device for Studies of Neutron-Physical Characteristics of Thorium Fuel. *In AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2016, v. 1771, no. 1, p. 090004; DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964246>.
14. Bedenko S.V., Lutsik I.O., Matyushin A.A., Polozkov S.D., Shmakov V.M., Modestov D.G., Prikhodko V.V., Arzhannikov A.V. Hybrid «Fusion-Fission» Reactor Facility: Neutronic Research. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, v. 4, pp. 31-41; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.03> (in Russian).
15. Gudowski W., Arzhanov V., Broeders C., Broeders I., Cetnar J., Cummings R., Ericsson M., Fogelberg B., Gaudard C., Koning A. and Landeyro P. Review of the European Project – Impact of Accelerator-Based Technologies on Nuclear Fission Safety (IABAT). *Progress in Nuclear Energy*.

- 2021, v. 38 (1-2), pp. 135-151; DOI: [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(00\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00099-8).
16. Knaster J., Arbeiter F., Cara P., Chel S., Facco A., Heidinger R., Ibarra A., Kasugai A., Kondo H., Micciche, G. and Ochiai K. 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. 9, pp. 46-54; DOI: <https://doi.org/10.1016/J.NME.2016.04.012>.
17. Prikhodko V.V. and Arzhannikov A.V. Simulations of Fusion Neutron Source Based on the Axially Symmetric Mirror Trap for the Thorium Hybrid Reactor. *In Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020, v. 1647, no. 1, p. 012004; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1647/1/012004>.
18. Shamanin I.V., Bedenko S.V., Chertkov, Yu.B., Gubaydulin I.M. Gas-Cooled Thorium Reactor with Fuel Block of the Unified Design. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2015, v. 3, pp. 124-134; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.3.13> (in Russian).
19. Bedenko S.V., Ghal-Eh N., Lutsik I.O. and 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; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.03.005>.
20. Yurov D.V., Prikhodko V.V. and Tsidulko Y.A. Nonstationary Model of an Axisymmetric Mirror Trap with Nonequilibrium Plasma. *Plasma Physics Reports*. 2016, v. 42(3), pp. 210-225; DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063780X16030090>.
21. Anikeev A.V., Prikhodko V.V. and Yurov D.V. Parameters of a Fusion Neutron Source Based on the Recent GDT Experimental Data and Possible Applications. *Fusion Science and Technology*. 2015, v. 68(1), pp. 70-75; DOI: <https://doi.org/10.13182/FST14-863>.
22. Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntsev K.E., Kuropatenko E.S., Lobanova L.V., Lukin G.N., Malakhov A.A., Malyshkin G.N., Modestov D.G., Mukhamadiev R.F. and Orlov V.G. PRIZMA Status. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 82, pp. 116-120; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.006>.
23. Shaimerdenov A., Gizatulin S., Dyussambayev D., Askerbekov S., Ueta, S., Aihara J., Shibata T., Sakaba N. Study on the Effect of Long-Term High Temperature Irradiation on TRISO Fuel. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.02.026>.
24. Bess J. & Fujimoto N. Benchmark Evaluation of Start-Up and Zero-Power Measurements at the High-Temperature Engineering Test Reactor. *Nuclear Science and Engineering*. 2014, v. 178, pp. 414-427; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE14-14>.
25. Bedenko S.V., Karengin A.G., Ghal-Eh N., Alekseev N. I., Knyshev V.V. and Shamanin I.V. Thermophysical Properties of Dispersion Nuclear Fuel for a New-Generation Reactors: A Computational Approach. *In AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. 2019, v. 2101, no. 1, p. 020002; DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5099594>.

#### Authors

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

E-mail: [bedenko@tpu.ru](mailto:bedenko@tpu.ru)

Lutsik Igor Olegovich, PhD Student

E-mail: [iol4@tpu.ru](mailto:iol4@tpu.ru)

Matyushin Anton Andreevich, Engineer

E-mail: [matyushinanton1994@gmail.com](mailto:matyushinanton1994@gmail.com)

Polozkov Sergey Dmitrievich, PhD Student

E-mail: [sdp2@tpu.ru](mailto:sdp2@tpu.ru)

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

E-mail: [v.m.shmakov@vniitf.ru](mailto:v.m.shmakov@vniitf.ru)

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

E-mail: [d.g.modestov@vniitf.ru](mailto:d.g.modestov@vniitf.ru)

Prikhodko Vadim Vadimovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [v.v.prikhodko@inp.nsk.su](mailto:v.v.prikhodko@inp.nsk.su)

Arzhannikov Andrey Vasilievich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su](mailto:A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su)