

С.В. Беденко ¹, В.В. Приходько ², В.М. Шмаков ³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 30

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН,
630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 11

³ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина»,
456770, Снежинск, Васильева, 13

ПАРАМЕТРЫ МУЛЬТИПЛИЦИРУЮЩЕГО БЛАНКЕТА С ПЛАЗМЕННО-ФИЗИЧЕСКИМ ДРАЙВЕРОМ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется возможность создания технических средств для управления процессами накопления и преобразования энергии тепловых и эпитепловых нейтронов в энергию моноэнергетических фотонов за счет нейтронной накачки активной среды, образованной ядрами с долгоживущими изомерными состояниями.

Исследуемая система состоит из внешнего импульсного источника D–T нейтронов на основе протяженной газодинамической магнитной ловушки (в [1] обозначена как Plasma Source Neutrons, PSN) и подкритического blankets [1, 2], включающего переменную конфигурацию нейтронно-оптического канала (Variable neutron-optical Assembly of Beam-Shaping, vBSA) и активную среду. vBSA состоит из сборки модулирующих пластин, предназначенных для «захвата» потока нейтронов, поступающих от PSN с последующей конвертацией миллисекундной сигнатуры в монохроматическое фотонное излучение. В качестве активной среды используется обогащенный по 155-му изотопу оксид гадолиния Gd₂O₃; в качестве основной схемы накачки рассматривается канал формирования ядер изотопов ¹⁵⁶Gd в инверсном состоянии, девозбуждение которого сопровождается испусканием интенсивной гамма-линии с длиной волны излучения ~10⁻⁴ нм [3]. Возможность накопления избыточной энергии в активной среде, образованной парой стабильных изотопов гадолиния ^{155,156}Gd, показана в [4]. Достижение условий инверсной заселенности уровней ядер ¹⁵⁶Gd изотопно-модифицированного Gd₂O₃ и последующая генерация фотонного излучения продемонстрирована в [3, 4].

В данной работе изучается возможность применения сопряженной системы «blanket – PSN – vBSA» для преобразования аккумулированной в инверсном состоянии ядер ¹⁵⁶Gd энергии в фотонное излучение. Для этого на первом этапе исследований проводится серия дополнительных нейтронных, теплофизических и гидравлических расчетов параметров blankets, целью которых является демонстрация возможности применения созданных моделей и программ для разработки комплексной модели мультиплицирующего blankets с плазмен-

ным источником D–T нейтронов линейной конфигурации.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Концепция установки с плазменно-физическим драйвером линейной конфигурации

Исследуемая система представляет собой установку, состоящую из трех блоков (рис. 1). Основу первого блока составляет подкритический blanket (активная зона ВГТРУ [2] с модифицированной под PSN параксиальной областью, рис. 1, а), второго – PSN (плазменно-физический драйвер, рис. 1, б), третьего – vBSA (рис. 1, в) с активной средой из Gd₂O₃.

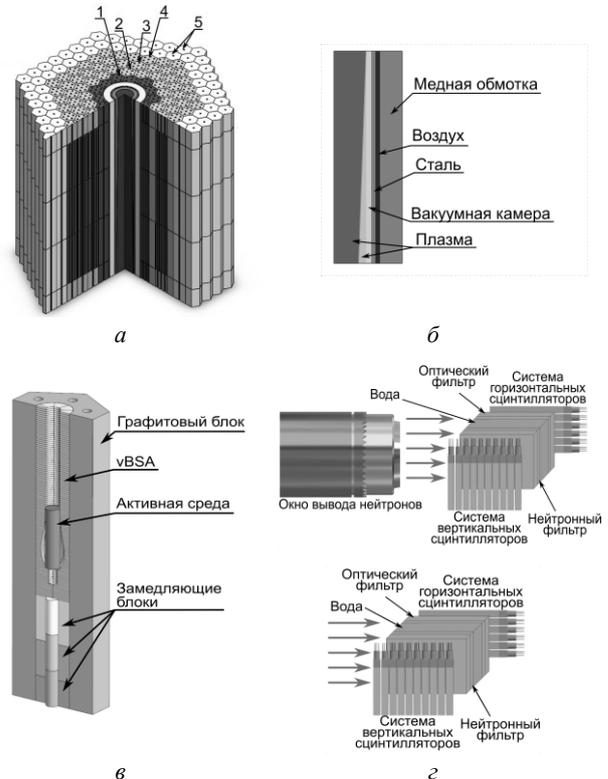


Рис. 1. Концептуальная схема сопряженной системы «blanket – PSN – vBSA»: а) blanket с модифицированной параксиальной областью: 2-4 – три ряда колонн с топливными блоками; 1,5 – два ряда без топливных блоков; б) сечение 3D модели PSN; в) vBSA с активной средой; г) окно вывода пучка нейтронов и система TENIS.

Бланкет собран из унифицированных гексагональных топливных (мультиплицирующая часть) и безтопливных графитовых блоков (отражатель). PSN, представляет собой цилиндрическую аксиально-симметричную протяженную вакуумную камеру, в которой магнитное поле удерживает высокотемпературную плазму. Цилиндрическая камера, предназначенная для генерации D–T-нейтронов, соответствует по диаметру и длине размерам модифицированной области бланкета. vBSA с цилиндрической капсулой из Gd_2O_3 замещает верхний топливный блок мультиплицирующей части. Так как активная среда чувствительна к параметрам потока нейтронов [4], установка дополнительно оснащена окном вывода и системой картирования TENIS (Thermal Neutron Imaging System) [5] для визуализации и контроля параметров потока нейтронов внутри vBSA. TENIS продемонстрирована на рис. 1, 2 и размещается соосно с vBSA в верхнем отражателе.

2.2. Методы исследования

Нейтронные, теплофизические и гидравлические исследования параметров бланкета, целью которых являлись снижение градиентов тепловых нагрузок и нивелировка перекосов поля энерговыделения как в бланкете и PSN, так и в области размещения vBSA, выполнены по аттестованным программам Serpent, PRIZMA (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина») и SolidWorks. Параметры PSN, используемые в качестве входных наборов для нейтронного и теплофизического расчетов взяты из [1] (см. оптимальный вариант v8). Решения нейтронной и теплофизической задач (external/fixe source mode и critical source mode) получены для квазистационарного режима генерации PSN. Гидравлические исследования выполнены с учетом пространственного распределения энерговыделения в объеме бланкета.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Нейтронная и теплофизическая оптимизация бланкета выполнена профилированием энерговыделения по радиусу мультиплицирующей части путем изменения содержания доли ω_{pf} делящегося материала.

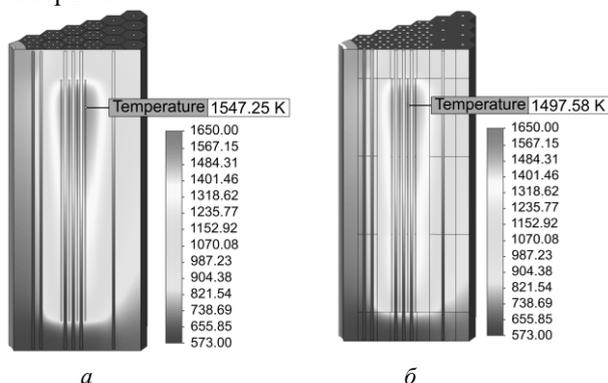


Рис. 2 Аксиальный профиль температуры: а) непрофилированный и б) профилированный бланкет.

Топливные блоки 2, 3 и 4 рядов (см. спецификаторы 1–5 на рис. 1, а) загружены топливом с $\omega_{pf} = 7, 9, 13, 17$ и 21% (базовое значение – 17%). С такой схемой загрузки радиальный профиль энерговыделения становится более равномерным, а пиковые значения энерговыделения на участке с максимальной температурой снижены на 19% по сравнению с непрофилированным вариантом. Здесь, плотность потока как тепловых, так и эпитепловых нейтронов максимальная, а радиальные градиенты тепловой нагрузки практически, отсутствуют.

Аксиальный офсет профиля температуры для двух вариантов проиллюстрирован на рис. 2. Результаты гидравлического расчета также демонстрируют снижение градиентов тепловых нагрузок как в мультиплицирующей части, так и в области размещения PSN и vBSA.

Полученные результаты демонстрируют удовлетворительное согласие с данными работы [1] и данными референтных установок подобного класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты подтвердили возможность применения программных кодов Serpent, PRIZMA и SolidWorks для разработки комплексной модели мультиплицирующего бланкета с плазменно-физическим драйвером и обоснования возможности создания модуля накопления и преобразования энергии по схеме с нейтронной накачкой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00131, <https://rscf.ru/project/23-29-00131/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fusion-fission** hybrid reactor with a plasma source of deuterium-tritium neutrons in a linear configuration / S.V. Bedenko, I.O. Lutsik, V.V. Prikhodko, et al. // Prog. Nucl. Energy. 2022. Vol. 154. P. 104477.
2. **Neutronic** properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel / I.V. Shamanin, V.M. Grachev, Yu.B. Chertkov, et al. // Ann. Nucl. Energy. 2018. Vol. 113. P. 286–293.
3. **Neutron** Spectrum Formation under Neutron Pumping of the Active Medium Formed by Two Stable Gadolinium Isotopes / I.V. Shamanin, M.A. Kazaryan., V.V. Knyshev, S.V. Bedenko // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2018. Vol. 45. P. 251–255.
4. **Neutron** pumping of active medium formed by gadolinium isotopes Gd-155 and Gd-156 pair / I.V. Shamanin, M.A. Kazaryan, S.V. Bedenko, et al. // Appl. Radiat. Isot. 2021. Vol. 171. P. 109649.
5. **Yazdandoust H., Ghal-Eh N., Firoozabadi M.M.** TENIS — Thermal Neutron Imaging System for use in BNCT // Appl. Radiat. Isot. 2021. M. 175. P. 109755.