

УДК 621.039.5

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/nuc/1060.html>

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЗОНЫ С БЫСТРЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ САПФИР_РФ И ДЕСНА-9

В.В. Семишин

semishin@bmstu.ru

SPIN-код: 8913-1645

Я.Д. Столотнюк

stolot24@mail.ru

SPIN-код: 7881-3529

П.В. Ахметова

polina.akhmetova.03@mail.ru

А.С. Изотов

ias20ea175@student.bmstu.ru

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

В работе приведены результаты разработки нейтронно-физической модели активной зоны реактора на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением. Дано описание используемых программных средств: САПФИР_РФ для расчета восьмигрупповой библиотеки нейтронно-физических сечений, ДЕСНА-9 для трехмерного связанного нейтронно-теплогидравлического расчета активной зоны. Разработанная модель состоит из активной зоны, боковой и торцевых зон воспроизводства и бокового и торцевых отражателей нейтронов. Представлены результаты моделирования одной микрокампании и показана непротиворечивость полученных результатов на основании сравнения с длительностью топливной кампании существующих реакторов на быстрых нейтронах.

Ключевые слова: ядерная энергетика, нейтронно-физический расчет, реактор на быстрых нейтронах, САПФИР_95, САПФИР_РФ, ДЕСНА-9, активная зона реактора

Введение. Реакторы на быстрых нейтронах (РБН) представляют собой одну из наиболее перспективных технологий в области ядерной энергетике, способных значительно повысить эффективность использования ядерного топлива и снизить объемы радиоактивных отходов [1]. Согласно стратегии развития Госкорпорации «Росатом» [2], РБН обеспечивают свою экономическую эффективность, используя природный уран для подпитки топливного цикла реактора и вовлекая в топливный цикл плутоний, накопленный в отработавшем ядерном топливе водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР). Согласно прогнозам развития ядерной энергетике (рис. 1), доминирующая роль отводится установкам с реакторами на тепловых нейтронах (например, реакторов серии РБМК (реактор большой мощности канальный)) с постепенно увеличивающейся долей реакторов на быстрых нейтронах (БН) в замкнутом ядерном топливном цикле.

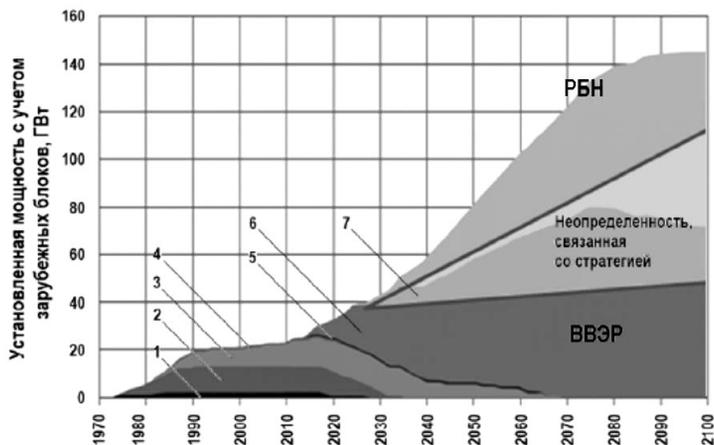


Рис. 1. Схема построения двухкомпонентной ядерной энергетической системы на базе РБН и ВВЭР [2]:

1 — ВВЭР 440; 2 — РБМК; 3 — ВВЭР 1000; 4 — БН 600; 5 — БН 800;
6 — ВВЭР ТОИ; 7 — БН 1200

В СССР и России разработана и эксплуатировалась линейка РБН с натриевым охлаждением, и сейчас это наиболее отработанная технология РБН [3]. В табл. 1 представлена частичная информация обо всех РБН на территории СНГ.

Таблица 1. Реакторы на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением СССР и России

Тип реактора	Год пуска	Год остановки	Тепловая мощность, МВт	Электрическая мощность, МВт	Примечания
БР-5	1959	1971	5	–	Первый быстрый реактор с натриевым теплоносителем [4]
БОР-60	1969	–	60	12	Многоцелевой научно-исследовательский ядерный реактор
БН-350	1973	1999	1000	350	Часть тепловой энергии использовалась для опреснения воды
БН-600	1980	–	1470	600	Максимальный коэффициент использования установленной мощности 83,5 % [5]
БН-800	2015	–	2100	880	Использование смешанного оксидного топлива

Эти разработки положили начало использованию натрия в качестве теплоносителя для более мощных энергетических реакторов, таких как БН-350 и БН-600, которые продемонстрировали высокую эффективность и безопасность. Длительный опыт эксплуатации этих установок использован при проектировании реакторов большей мощности БН-800 и БН-1200.

В условиях необходимости повышения мощности реакторов, внедрения новых типов топлива, разработки инновационных конструкций активных зон, а также исследования динамики изменения нуклидного состава топлива для замыкания ядерного топливного цикла важным является этап нейтронно-физического расчета активной зоны. Современный подход к расчетному обоснованию активных зон базируется на использовании программных кодов, нацеленных на получение таких характеристик, как распределение энерговыделения, пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов, изменение изотопного состава топлива, определение коэффициентов реактивности по различным теплотехническим параметрам и др.

При выполнении проектных и эксплуатационных расчетов физики реакторов типа БН в настоящее время используются различные программные средства (ПС), например, программу ГЕФЕСТ 800 [6], разработанную во Всероссийском научно-исследовательском институте по эксплуатации атомных электростанций, JAR (Российский научный центр «Курчатовский институт») [7] и TRIGEX (государственный научный центр Российской Федерации «Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского») [8]. Создание альтернативных программ и их верификация являются актуальной задачей. Без выполнения поверочных расчетов с использованием альтернативных программ сложно выполнить требования по обеспечению качества проектирования реакторов. Различия результатов расчетов, полученных с применением различных программных средств, могут быть использованы при оценке погрешностей расчетов, которая служит составляющей процедуры аттестации программных кодов.

В данной статье представлены результаты разработки нейтронно-физической модели активной зоны РБН с жидкометаллическим натриевым теплоносителем и описана методика нейтронно-физического расчета активной зоны с быстрым спектром нейтронов с использованием программных средств САПФИР_РФ [9, 10] и ДЕСНА-9 [11, 12].

Описание используемых программных средств. Используемая в данной работе программа расчета ячейки САПФИР_РФ создана на основе модулей пакета прикладных программ САПФИР. Основное назначение программы заключается в вычислении пространственно-энергетического распределения нейтронов в реакторной ячейке в двумерной или трехмерной геометрии

с учетом выгорания, используя оцененные микроскопические данные. В качестве библиотеки многогрупповых констант используются рекомендованные Росфондом ядерные данные [13]. САПФИР_РФ имеет следующие отличия от предыдущей версии САПФИР_95.1:

- новая схема выгорания топлива, учитывающая порядка 400 продуктов деления, в отличие от модели эффективного продукта деления, реализованной в ПС САПФИР_95.1;

- использование в расчетах реальных спектров нейтронов деления для конкретных делящихся материалов, а не модельного спектра;

- учет энергетической зависимости для выхода осколков от энергии нейтронов, вызывающих деление;

- увеличение длины матрицы переходов неупругих процессов;

- присутствует алгоритм расчета макроскопических сечений для резонансной области ниже 11-й энергетической группы;

- учет корреляции резонансов различных нуклидов в разрешенной области;

- учет для нуклида Pu-239 в тепловой области зависимости числа вторичных нейтронов деления от энергии нейтрона, вызывающего деление.

Программа САПФИР_РФ подготавливает нейтронно-физические сечения как для бесконечных решеток ТВЭЛов и тепловыделяющих сборок, так и для ячеек тепловыделяющих сборок с учетом окружающих фрагментов активной зоны или отражателя. Библиотека для ПС ДЕСНА-9 формируется из следующих характеристик (подготавливаемых для каждого типа тепловыделяющих сборок (ТВС), для каждой температуры и для каждой энергетической группы):

- коэффициент диффузии нейтронов D ;

- макросечение поглощения нейтронов Σ_a ;

- источник нейтронов деления $\nu_f \Sigma_f$;

- скорость нейтронов V ;

- микросечение поглощения нейтронов ксенона σ_{Xe} ;

- микросечение поглощения нейтронов самария σ_{Sm} ;

- одномерная матрица увода нейтронов.

Многогрупповые сечения для использования в ПС ДЕСНА-9 получают сверткой по пространству и энергии, реализованной в дополнительной сервисной программе. Схема подготовки библиотеки нейтронно-физических сечений приведена на рис. 2.

Программное средство ДЕСНА-9 представляет собой следующую ступень развития нейтронно-физического модуля программного комплекса Rainbow-TRP. Программное средство ДЕСНА-9 является многогрупповой

покассетной нейтронно-теплогидравлической моделью активной зоны реактора, реализующей решение нестационарного уравнения кинетики в диффузионном приближении методом конечных разностей:

$$\frac{1}{V_p} \frac{\delta \Phi_p}{\delta t} = \nabla(D_p \nabla \Phi_p) - \Sigma_{yb}^p \Phi_p + \chi_p \left(\Psi_p (1 - \beta) + \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i \right) + \sum_{i=1}^{p-1} \Sigma^{l \rightarrow p} (\Delta E_{nl}) \Phi_l,$$

где p — номер энергетической группы нейтронов; V_p — скорость нейтронов в группе p ; Φ_p — плотность потока нейтронов в группе p ; D_p — коэффициент диффузии нейтронов в группе p ; χ_p — доля нейтронов деления, попадающих в группу p ; Ψ_p — источник мгновенных нейтронов в группе p ; β — доля запаздывающих нейтронов; λ_i — постоянная распада ядер предшественников в группе i ; C_i — концентрация ядер предшественников в группе i ; $\Sigma^{l \rightarrow p}$ — сечение рассеяния нейтронов из группы l в группу p ; Σ_{yb}^p — сечение увода нейтронов в группе p .

Активная зона реакторной установки моделируется системой шести-гранных параллельных каналов, расположенных в соответствие с картограммой загрузки зоны (рис. 3).

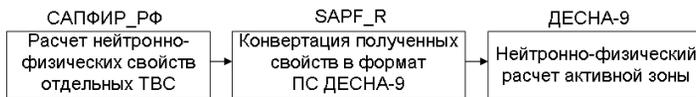


Рис. 2. Схема подготовки библиотеки нейтронно-физических сечений для нейтронно-физического расчета в ПС ДЕСНА-9

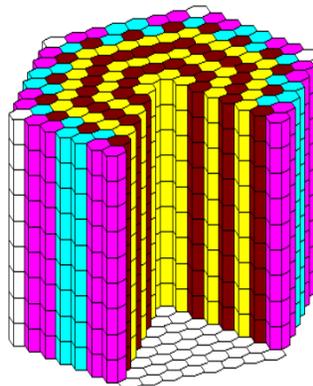


Рис. 3. Схематичное изображение модели активной зоны, реализованной в ПС ДЕСНА-9

Модель активной зоны в расчетной области достраивается до правильного шестигранника кассетами, имитирующими отражатель.

Описание разработанной модели активной зоны реактора на быстрых нейтронах. Разработанная модель активной зоны РБН с натриевым охлаждением в ПС ДЕСНА-9 (рис. 4) включает в себя активную зону с расположенными над и под ней верхней и нижней торцевыми зонами воспроизводства (ВТЗВ и НТЗВ соответственно), боковую зону воспроизводства (БЗВ), торцевые и боковой отражатели нейтронов.

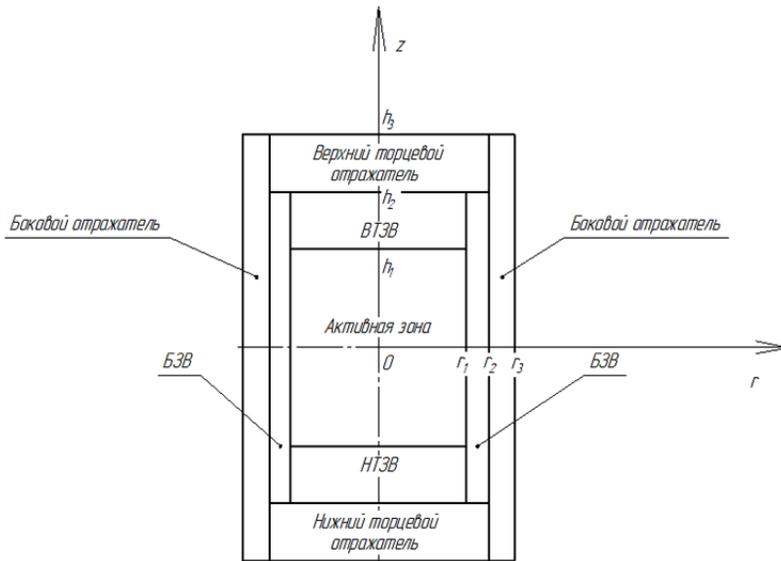


Рис. 4. Схема модели активной зоны реактора на быстрых нейтронах:

r_1 — радиус активной зоны; r_2 — радиус БЗВ; r_3 — радиус сборки стальной защиты;
 h_1 — высота активной зоны; h_2 — высота торцевого отражателя; h_3 — высота реактора

Активная зона формируется из ТВС гексагональной формы поперечного сечения, расположенных по правильной треугольной решетке. Тепловыделяющие сборки набраны из цилиндрических тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) со смешанным уран-плутониевым топливом в стальной оболочке. Размеры и шаг размещения ТВЭЛов и ТВС, материалы оболочки, зоны воспроизводства и отражателя взяты по аналогии с существующими РБН [1].

Боковая зона воспроизводства состоит из двух слоев ТВС, конструктивно идентичных ТВС активной зоны, с таблетками из обедненного диоксида урана. В результате реакции захвата U-238 нейтрона и двух бета-распадов происходит наработка Pu-239 [11] (рис. 5).

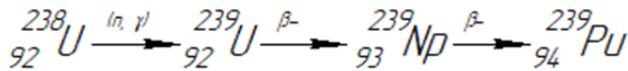


Рис. 5. Цепочка реакций U-238 – Pu-239

В соответствии с конструкцией РБН высота торцевых зон воспроизводства (ВТЗВ, НТЗВ) была принята равной 0,5 м. ВТЗВ, НТЗВ и БЗВ окружены отражателем нейтронов. Отражатель нейтронов представляет собой железно-натриевую структуру, моделирующую окружающие активную зону внутрикорпусные устройства и объем теплоносителя. Модель отражателя набрана из стальных стержней, окруженных натрием. Высота отражателя — 0,5 м с каждого торца. Полная высота активной зоны составляет 3,714 м. Таким образом, расчетная модель содержит 13 слоев кассет.

Аналогично загрузке реактора БН-600 [12] с целью обеспечения выравнивания покассетного энерговыделения в активной зоне используются три подзоны: зона малого обогащения ЗМО (10 % диоксида плутония), зона среднего обогащения ЗСО (13 % диоксида плутония) и зона большого обогащения ЗБО (16 % диоксида плутония). Регулирование реактивности осуществляется с помощью органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), расположенных симметрично в активной зоне. Компенсация реактивности осуществляется введением поглощающих элементов (пэлов) из карбида бора природного изотопного состава, расположенного в центральной области ТВС вместо твэлов [13]. Модель ТВС, реализованная в ПС САПФИР_РФ, показана на рис. 6.

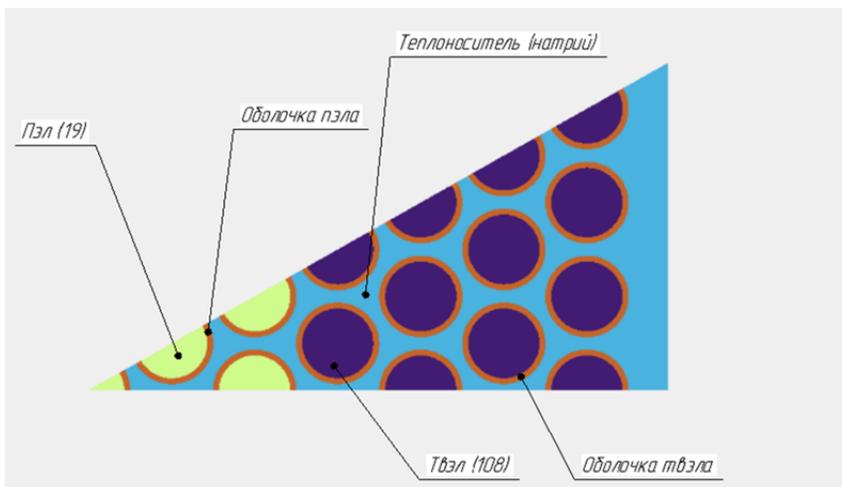


Рис. 6. Модель ТВС активной зоны в ПС САПФИР_РФ

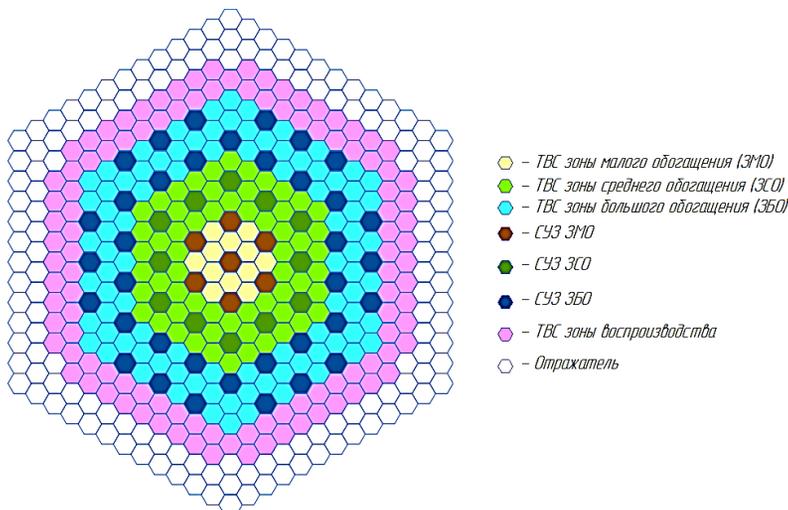


Рис. 7. Картограмма загрузки активной зоны

Картограмма загрузки активной зоны и расположение ОР СУЗ представлена на рис. 7.

Расчет топливной кампании. Выполнено моделирование топливной кампании с представленной на рис. 7 картограммой загрузки активной зоны. В результате получена длительность топливной кампании, сопоставимая с аналогичными характеристиками имеющихся РБН (продолжительность непрерывной работы между перегрузками БН-600 — 170 сут, БН-800 — 155 сут, БН-1200 — 330 сут) [17]. График изменения реактивности в течение топливной кампании представлен на рис. 8.

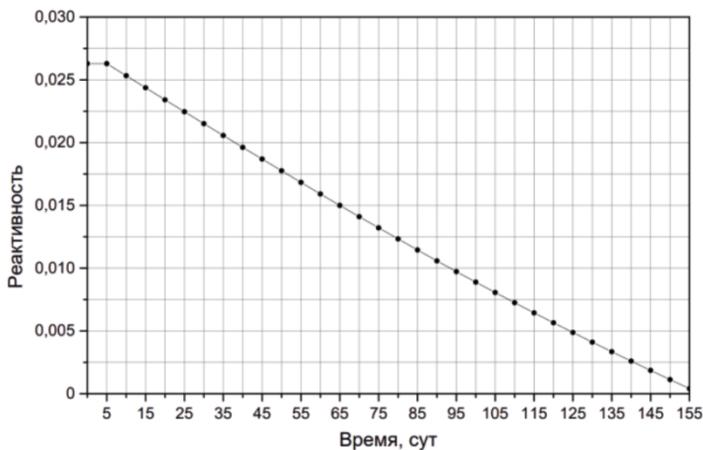


Рис. 8. Изменение реактивности в течение топливной кампании

Поскольку компенсация реактивности осуществляется ОР СУЗ, в течение кампании кластеры поглощающих элементов постепенно выводятся из активной зоны для компенсации эффектов, связанных с выгоранием топлива и накоплением осколков деления. График изменения глубины погружения ОР СУЗ в течение кампании представлен на рис. 9.

В конце кампании ОР СУЗ выходят из активной зоны и остаются частично погруженными в верхнюю торцевую зону воспроизводства. Вследствие движения поглощающих элементов происходит перераспределение энерговыделения по высоте активной зоны. График изменения распределения усредненного энерговыделения по высоте активной зоны на начало и конец топливной кампании представлен на рис. 10.

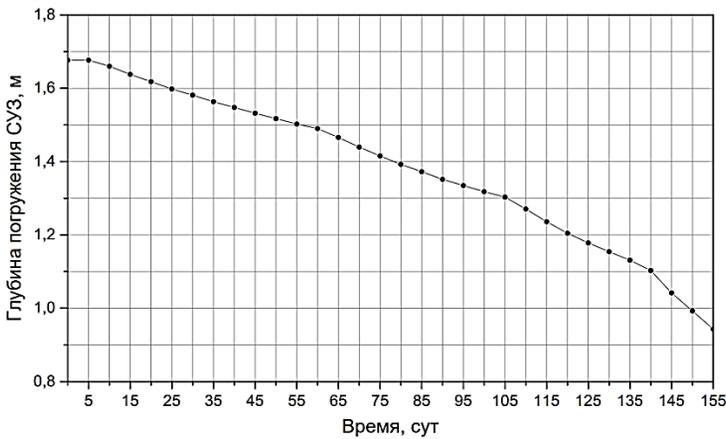


Рис. 9. Изменение глубины погружения ОР СУЗ в течение топливной кампании

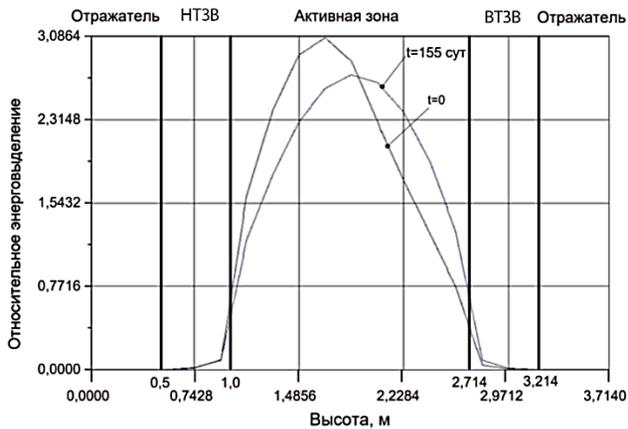


Рис. 10. Распределение энерговыделения по высоте активной зоны для разных моментов топливной кампании

Относительное энерговыделение достигает своего максимума в нижней половине активной зоны в начале топливной кампании и постепенно смещается ближе к центру по мере перемещения ОР СУЗ. В ВТЗВ и НТЗВ наблюдается постепенный рост энерговыделения, что объясняется образованием новых делящихся нуклидов.

Заключение. В ходе работы была опробована методика нейтронно-физического расчета активной зоны с быстрым спектром нейтронов и натриевым теплоносителем в ПС САПФИР_РФ и ДЕСНА-9. Разработана модель активной зоны, включающая в себя боковые и торцевые зоны воспроизводства. Выполнено сравнение с реакторами аналогичного типа. Показана непротиворечивость полученных результатов. Это дает основания полагать, что модель является физически корректной. В дальнейшем разработанная нейтронно-физическая модель активной зоны может быть использована для проведения расчетных исследований топливных циклов, наработки вторичного топлива, использования топлива на основе плутония реакторного качества и т. д.

Литература

- [1] Усынин Г.Б., Кусмарцев Е.В. *Реакторы на быстрых нейтронах*. Москва, Энергоатомиздат, 1985, 288 с.
- [2] Петров А.Ю., Шутиков А.В., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Перспективы создания двухкомпонентной ядерной энергетической системы. *Известия вузов Ядерная энергетика*, 2019, № 2, с. 5–15. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.01>
- [3] Колесников К.С., ред. *Машиностроение ядерной техники. Расчет и конструирование машин. В 2 кн.* Москва, Машиностроение, 2005, кн. 2, разд. 4, т. 4–25, 943 с.
- [4] Багдасаров Ю.Е., Козлов Ф.А., Круглов А.С. История создания и научно-технический вклад БР-5, -10 в разработку быстрых натриевых реакторов. *Атомная энергия*, 2009, т. 106, вып. 3, с. 134–140.
- [5] Ошканов Н.Н., Говоров П.П. Жидкометаллический реактор БН-600 – основные особенности и опыт эксплуатации. *Известия вузов. Ядерная энергетика*, 2009, № 2, с. 7–20.
- [6] Асатрян Д.С., Белов А.А., Белоусов В.И. и др. Комплекс программ ГЕФЕСТ800 для проведения эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик БН-800 в стационарном режиме. *Атомная энергия*, 2015, т. 118 (6), с. 303–309.
- [7] Ярославцева Л.Н. Комплекс программ JAR для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов*, 1983, вып. 8 (37), с. 41–43.

- [8] *Комплекс программ TRIGEX.05. Инструкция пользователя*. Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ, 2008.
- [9] [9] Тебин В.В., Обухов В.В, Сергеев В.К., Иванов А.С. и др. Проект пакета программ САПФИР для решения задач расчета ячейки реактора. *ВАНТ. ФиТЯР*, 1985, вып. 4, с. 68–71.
- [10] Иванов А.С., Карпов А.С. Модернизация нейтронных библиотек и программы САПФИР_95, предназначенной для расчета ячеек реактора. *Вопросы атомной науки и техники. Ядерно-реакторные константы*, 2018, вып. 1, с. 27–34.
- [11] Кавун О.Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*, 1999, вып. 2, с. 17–39.
- [12] Семишин В.В., Алексеев Д.И., Кавун О.Ю. Разработка метода решения многогруппового уравнения диффузии для расчета реакторов на быстрых нейтронах *НЕЙТРОНИКА-2024. Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики: сб. тез.* Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2024, 60 с.
- [13] Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Кошечев В.Н. Ядерные данные для расчетов быстрых реакторов – библиотека файлов РОСФОНД и система констант БНАБ-РФ. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы*, 2021, № 2, с. 5–24.
- [14] Кравченко Г.А., Рассамагин С.В., Русанов С.В., Косарев И.Ю. Получение МОКС-топлива как один из этапов замыкания ядерного топливного цикла. *Исследования наукограда*, 2014, № 1 (7), с. 60–64.
- [15] Сидоренко В.А. Исследования и разработки по ядерным реакторам для энергетики России. *Атомная энергия*, 2001, т. 90, вып. 6, с. 415–425.
- [16] Селезнев Е.Ф. *Кинетика реакторов на быстрых нейтронах*. Москва, Наука, 2013, 237 с.
- [17] Васильев Б.А., Тимофеев А.В., Любимов М.А., Будыльский А.Д. Компонентные и конструктивные решения системы перегрузки перспективного быстрого реактора. *Атомная энергия*, 2010, т. 108, вып. 4, с. 246–250.

Поступила в редакцию 09.02.2025

Семишин Виктор Вадимович — старший преподаватель кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Столотнюк Ярослава Донатовна — доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ахметова Полина Вилевна — студентка кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Изотов Александр Сергеевич — студент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Семишин В.В., Столотнюк Я.Д., Ахметова П.В., Изотов А.С. Нейтронно-физический расчет активной зоны с быстрым спектром нейтронов с использованием программных средств САПФИР-РФ и ДЕСНА-9. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 04 (99). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/nuc/1060.html>

NEUTRON PHYSICAL CALCULATION OF REACTOR CORE WITH A FAST NEUTRON SPECTRUM USING SOFTWARE PACK GESSAPFIR_RF AND DESNA-9

V.V. Semishin

semishin@bmstu.ru
SPIN code: 8913-1645

Ya.D. Stolotniuk

stolot24@mail.ru
SPIN code: 7881-3529

P.V. Akhmetova

polina.akhmetova.03@mail.ru

A.S. Izotov

ias20ea175@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

This paper presents the results of the development of a neutron-physical model of the core of fast neutron reactor with sodium cooling. The description of the software tools used is given: SAPFIR-RF for calculating the 8-group library of neutron-physical cross sections, DESNA-9 for three-dimensional coupled neutron-thermohydraulic calculation of the core. The developed model consists of core region, radial and end breeding zone and radial and end neutron reflectors. The results of modeling of one fuel campaign are presented and the correctness of the results obtained is shown based on comparison with the duration of the fuel campaign of existing fast neutron reactors.

Keywords: neutron-physical calculation, fast neutron reactor, SAPFIR_95, SAPFIR_RF, DESNA-9, core

Received 09.02.2025

Semishin V.V. — Senior lecturer of Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Stolotnyuk Ya.D. — Associate professor of Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Akhmetova P.V. — Student of Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Izotov A.S. — Student of Department of Nuclear Reactors and Installations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Semishin V.V., Stolotniuk Ya.D., Akhmetova P.V., Izotov A.S. Neutron physical calculation of reactor core with a fast neutron spectrum using software pack GESSAPFIR-RF and DESNA-9. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 04 (99). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/nuc/1060.html>