

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-05>

УДК 621.039.57

EDN MVTСMB

Оригинальная статья / Original paper



**Модель боковых ионизационных камер для ВВЭР-1000 в составе
программного комплекса ПРОСТОР**

В.Н. Кудратов , **И.Д. Воронин** , **Д.А. Соловьев** , **А.А. Семенов** ,
С.М. Гололобов , **Н.В. Щукин** , **С.В. Ивахин** , **Д.А. Плотников** , **Г.Г. Новиков**
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация
 vulture@inbox.ru

Резюме. Оценка мощности реактора по параметрам аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) является наиболее быстродействующим способом определения мощности среди используемых на реакторной установке с ВВЭР-1000. По этой причине мощность, рассчитанная АКНП, используется в системе управления и защиты реактора. В этой связи корректное моделирование переноса нейтронного излучения в места расположения ионизационных камер (ИК) является важной и актуальной задачей для расчетных кодов, комплексно описывающих динамические режимы реакторной установки. В данной работе приведено описание моделей боковых ионизационных камер АКНП, которые применялись ранее и используются в настоящее время в программном комплексе (ПК) ПРОСТОР. Первоначальная упрощенная модель ИК АКНП качественно описывала зависимость нейтронного потока в местах расположения ИК от углового расположения камер, однако эта упрощенная модель не позволяла корректно воспроизводить аксиальную зависимость потока нейтронов в каналах ИК, поскольку в этой модели не учитывалось ослабление потока нейтронов при прохождении через опорную бетонную консоль. Для того, чтобы исправить этот недостаток была разработана новая улучшенная модель ИК АКНП. Для реализации улучшенной модели ИК АКНП в программе на основе метода Монте-Карло *OpenMC* была разработана трехмерная модель реактора и его биологической защиты. После этого были проведены оценки вкладов двух периферийных рядов ТВС в нейтронный поток на радиусе размещения ИК в зависимости от угла и высоты расположения ИК. На основе полученных вкладов была построена улучшенная модель ИК АКНП, которая в настоящее время используется в составе п/к ПРОСТОР. Для сравнения качества моделей ИК АКНП с помощью ПК ПРОСТОР выполнено моделирование измерения по сбросу аварийной защиты, проведенное на Калининской АЭС.

Ключевые слова: ВВЭР, АКНП, аппаратура контроля нейтронного потока, ионизационные камеры, перенос нейтронов

Для цитирования: Кудратов В.Н., Воронин И.Д., Соловьев Д.А., Семенов А.А., Гололобов С.М., Щукин Н.В., Ивахин С.В., Плотников Д.А., Новиков Г.Г. Модель боковых ионизационных камер для ВВЭР-1000 в составе программного комплекса ПРОСТОР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(3):50-59. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-05>

For citation: Kudratov V.N., Voronin I.D., Solovyeve D.A., Semenov A.A., Gololobov S.M., Shchukin N.V., Ivakhin S.V., Plotnikov D.A., Novikov G.G. A model of side ionization chambers for the VVER-1000 as part of the PROSTOR software complex. *Nuclear Safety*. 2026;16(3):50-59. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-05>

**A model of side ionization chambers for the VVER-1000 as part of the PROSTOR
software complex**

Voxid N. Kudratov , **Igor D. Voronin** , **Denis A. Solovyev**  , **Andrey A. Semenov** ,
Sergey M. Gololobov , **Nikolay V. Shchukin** , **Sergey V. Ivakhin** , **Denis A. Plotnikov** ,
Grigory G. Novikov 

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation
 vulture@inbox.ru

Abstract. Estimating reactor power based on neutron flux monitoring system parameters is the fastest method for power determination among those employed at the VVER-1000 reactor. Therefore, the power value calculated by neutron flux monitoring system is utilized in the reactor control and protection system. Consequently, accurately modeling neutron radiation transport to the locations of the ionization chambers is a crucial and relevant task for computational codes that provide a comprehensive description of the reactor facility's dynamic operating modes. This paper describes the models of side ionization chambers of the neutron flux monitoring system used in the PROSTOR software. The initial simplified model of the neutron flux monitoring system qualitatively described the dependence of the neutron flux at the ionization chamber locations on the angular positioning of the chambers. However, this simplified model failed to accurately reproduce the axial dependence of the neutron flux within the ionization chambers channels, as it did not account for neutron flux attenuation caused by the supporting concrete cantilever. To address this shortcoming, a new improved neutron flux monitoring system model is developed. To implement this improved model within the OpenMC Monte Carlo code, a three-dimensional model of the reactor and its biological shielding is created. Subsequently, assessments are made of the contributions from two peripheral rows of fuel assemblies to the neutron flux at the detector placement radius, as a function of the detector's angular and vertical position. Based on the resulting data, an improved model of the neutron flux monitoring system is developed and is currently utilized within the PROSTOR software. PROSTOR software is used to simulate a scram measurement previously conducted at the Kalinin NPP to evaluate the quality of the neutron flux monitoring system models.

Keywords: VVER, neutron flux monitoring system, ionization chambers, neutron transport

Введение

Боковые ионизационные камеры (далее – ИК) используются в составе аппаратуры контроля нейтронного потока (далее – АКНП) для измерения интенсивности нейтронного потока в месте их расположения. Сами ИК находятся за корпусом реактора в каналах, расположенных в биологической защите. Вычисленная АКНП на основе токов ИК мощность реактора используется в системе управления и защиты реактора. Оценка мощности реактора по параметрам АКНП является наиболее быстродействующим способом определения мощности среди используемых на энергоблоке.

Основной вклад в поток нейтронов в местах расположения ИК вносят периферийные ТВС активной зоны. Из-за изменения профиля нейтронного поля внутри активной зоны в переходных процессах, мощность реактора, оцененная АКНП, может отличаться от тепловой мощности реактора. В этой связи корректное моделирование переноса нейтронного излучения в места расположения ИК является важной и актуальной задачей для расчетных кодов, комплексно описывающих динамические режимы реакторной установки. К таким кодам относится

программный комплекс (далее – ПК) ПРОСТОР, решающий задачу переноса нейтронов в двухгрупповом диффузионном нодальном приближении с учетом теплогидравлических характеристик и взаимного влияния оборудования 1-го и 2-го контуров действующих АЭС с реакторами ВВЭР-1000¹ [1]. Нейтронно-физические сечения для ПК ПРОСТОР подготовлены по программе UNK².

Ранее используемая модель ИК АКНП

Первоначально в ПК была использована упрощенная модель ИК АКНП.

Между граничными расчетными ячейками ТВС и ИК АКНП учитывался перенос излучения по высоте. Опишем алгоритм высот-

¹ Будникова О.А., Выговский С.Б., Зимин В.Г., Кориковский К.П., Краюшкин Ю.А., Мищерин С.А., Осадчий М.А., Семенов А.А., Страшных В.П., Чернов Е.В., Чернаков В.А. Программный комплекс «ПРОСТОР» (версия 1). Приложение к аттестационному паспорту № 182 от 28.10.2004. Москва: ВНИИАЭС, 2004. 8 с.

² Анохин А.Ю., Цибульский В.Ф., Давиденко В.Д. Программный комплекс UNK для детального расчета спектра нейтронов в ядерных реакторах. Отчет ИЯР/РНИЦ «КИ». Инв. № 35-410-4/81 от 18.05.2001. Москва: ИЯР/РНИЦ «Курчатовский институт», 2001.

ного переноса. Далее обозначения соответствуют приведенным на рисунке 1. Голубым на рисунке 1 отмечена область граничных ТВС ($ABDF$), видимая со стороны камеры, расположенной в точке P . Отрезок HG представляет собой ТВС, перпендикулярную прямой, соединяющей центр активной зоны и камеру. Для точки B угол BPM будет высотным углом видимости камеры. В качестве расстояния между нодом B и камерой P используется отрезок BP .

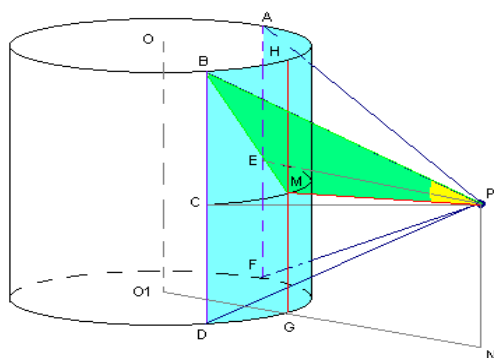


Рисунок 1. Высотный угол
Figure 1. Ascending vertical angle

В пространстве нейтроны поверхностного источника рассеиваются анизотропно. При переносе от поверхности активной зоны до ионизационной камеры ослабление потока принято обратно пропорциональным квадрату расстояния (оптическая модель без поглощения):

$$\Phi_{\text{кам}} = \Phi_{\text{гр}} \exp(-R\lambda) \cdot \cos^{\mu}(\alpha) / (R^2),$$

где $\Phi_{\text{кам}}$ – нейтронный поток, в месте расположения камеры; $\Phi_{\text{гр}}$ – нейтронный поток в граничной расчетной ячейке; R – расстояние между центром расчетной ячейки и камерой; λ – коэффициент ослабления нейтронного потока вне активной зоны; $\cos(\alpha)$ – косинус угла между прямой, проходящей через центр активной зоны в горизонтальной плоскости и центр расчетной ячейки и прямой, соединяющей центр расчетной ячейки и камеру; μ – степень косинуса при расчете.

Данная модель не позволяла корректно рассчитывать ослабление потока нейтронов за бетонной консолью шахты реактора (рис. 2), поэтому потребовалась разработка усовершенствованной модели.

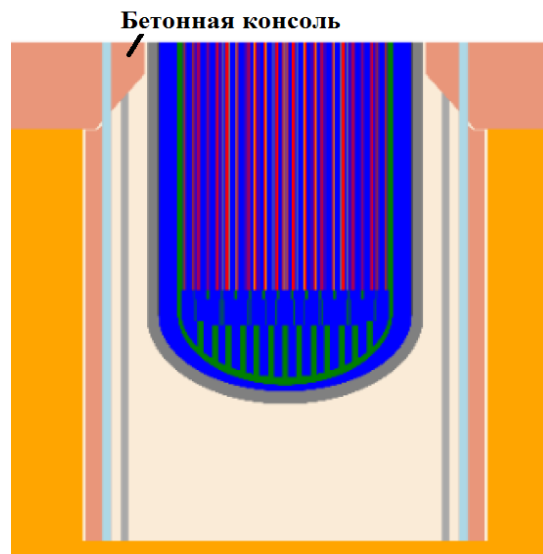


Рисунок 2. Аксиальный вид расчетной модели реактора ВВЭР-1000 в *OpenMC*

Figure 2. Axial view of the VVER-1000 reactor computational model in *OpenMC*

Построение новой модели ИК АКНП

При моделировании переноса нейтронов из активной зоны в места расположения ИК на качество расчета, кроме внутрикорпусных конструкций и расположения кассет в активной зоне, влияют температура и плотность теплоносителя в опускном участке реактора, а также наличие бетонной опорной консоли биологической защиты. Все это следует учесть при построении модели переноса излучения из активной зоны в места расположения ИК.

Для выполнения расчетных оценок вкладов двух периферийных рядов кассет активной зоны в плотность потока тепловых нейтронов в каналах ИК были выполнены расчеты с помощью программы *OpenMC* [2]. Эта программа позволяет провести расчет пространственного распределения плотности потока нейтронов на основе метода Монте-Карло. При этом было выполнено численное решение уравнения переноса с распределенным источником нейтронов спектра деления в активной зоне реактора. Расчеты проводились с использованием файлов оцененных ядерных данных *ENDF-B/VIII.0*.

Аналоговое моделирование переноса нейтронов от активной зоны к каналам ИК по методу Монте-Карло крайне неэффективно из-за большого коэффициента ослабления нейтронного потока. Вода замедляет нейтроны, снижая их энергию, а корпус реактора

и элементы биологической защиты поглощают значительную их часть. Для расчета такого класса задач методом Монте-Карло применяются методы уменьшения дисперсии, позволяющие искусственно увеличить число частиц в областях с сильным поглощением и таким образом обеспечить достаточную статистику для достоверного вычисления потока нейтронов.

Одним из наиболее эффективных подходов является метод весовых окон, основанный на дискретизации фазового пространства на ячейки с индивидуально заданными весовыми границами. Для каждой такой пространственно-энергетической ячейки пользователь определяет нижний порог веса W_L , в то время как верхняя граница W_U вычисляется путем умножения нижней весовой границы на фиксированную константу. Сформированный диапазон $[W_L, W_U]$ служит фильтром для контроля популяции расчетных частиц: если вес нейтрона оказывается ниже установленной нижней границы, иницируется процедура «русской рулетки», в результате которой частица либо исключается из расчета, либо продолжает движение с весом W_S внутри окна. В противоположном случае, когда вес частицы превышает верхний предел, происходит ее расщепление на несколько дочерних частиц, веса которых приводятся к значениям внутри заданного интервала.

В *OpenMC* реализован метод *MAGIC* (*Method of Automatic Generation of Importances by Calculation*) для автоматической генерации весовых окон. *MAGIC* представляет собой итерационный подход автоматического генерирования весовых окон для метода Монте-Карло. Сначала проводится стандартный расчет потока нейтронов, после чего на основе полученного распределения строится карта весов для каждой ячейки фазового пространства. Нулевые или малые значения потоков в отдельных ячейках заменяются средними значениями соседних ячеек, что обеспечивает гладкое и непрерывное распределение весов, пригодное для последую-

щих итераций. В следующем шаге расчет выполняется с использованием полученных весовых окон, а результаты используются для генерации нового набора весов. После нескольких итераций весовые окна стабилизируются, что позволяет получать достоверные оценки распределения нейтронного потока даже в областях с крайне низкой вероятностью попадания частиц.

Из-за ограниченных вычислительных ресурсов расчет для генерации весовых окон был разделен на два этапа. На первом этапе выполнялся перенос нейтронов от всех 72 периферийных ТВС на цилиндрическую поверхность сразу за выгородкой. Затем накопленный нейтронный поток использовался для задания нового поверхностного источника. На втором этапе проводился расчет с этим поверхностным источником, в ходе которого выполнялись итерации весовых окон на заданной сетке.

Для решения поставленной задачи в *OpenMC* была подготовлена расчетная трехмерная геометрическая модель реактора и внутрикорпусных устройств, а также бетонной шахты реактора. Пример радиально-азимутального вида расчетной модели реактора ВВЭР-1000 представлен на рисунке 3.

Расчет зависимости вклада $K_i(\theta)$ кассеты i в интегральную по высоте плотность потока тепловых нейтронов на радиусе размещения ИК в бетонной защите проводится по формуле (1):

$$K_i(\theta) = 1 - \Phi_{i-i}(\theta)/\Phi_i(\theta), \quad (1)$$

где $\Phi_i(\theta)$ – распределение плотности потока тепловых нейтронов на радиусе размещения ИК при задании во всех кассетах активной зоны равномерного распределения источника нейтронов деления;

$\Phi_{i-i}(\theta)$ – азимутальное распределение плотности потока тепловых нейтронов на том же радиусе при задании такого же источника во всех кассетах, кроме кассеты i , источник в которой задается равным нулю.

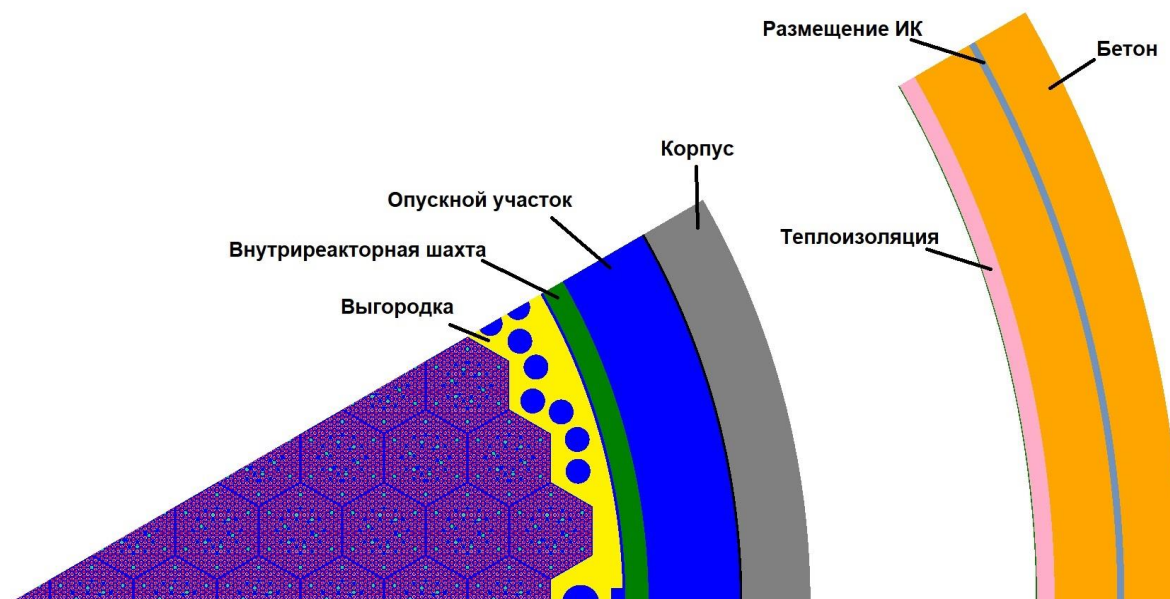


Рисунок 3. Радиально-азимутальный вид расчетной модели реактора ВВЭР-1000 в *OpenMC*
Figure 3. Radial and azimuthal view of the VVER-1000 reactor computational model in *OpenMC*

На рисунке 4 приведены азимутальные зависимости в диапазоне от -60° до $+90^\circ$ вкладов кассет 102, 115 и 127 внешнего 1-го

ряда (рис. 5), расположенных в секторе от 0° до 30° , в плотность потока тепловых нейтронов на радиусе расположения ИК.

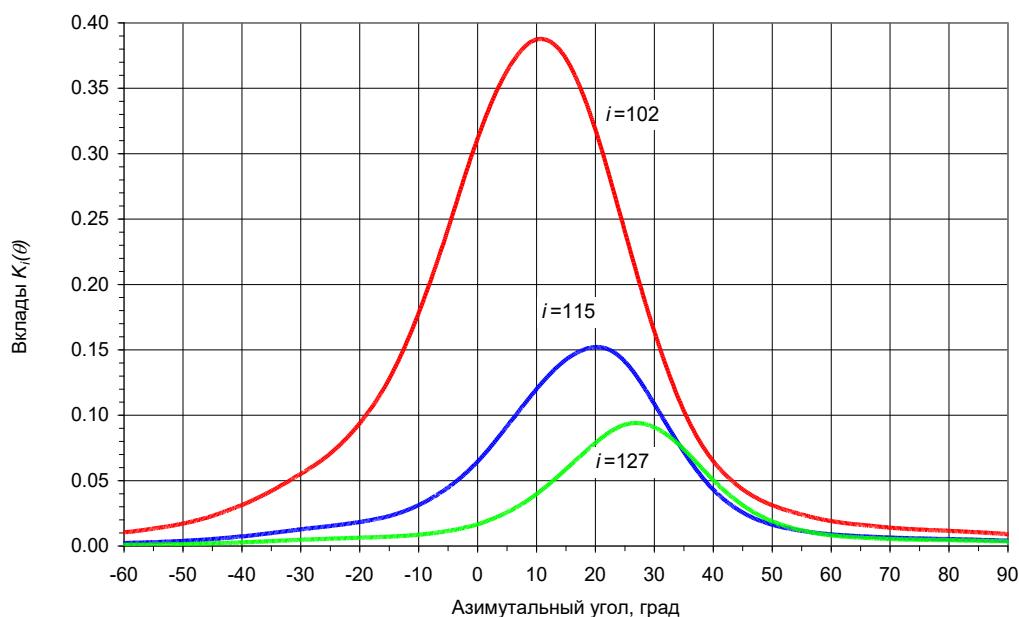


Рисунок 4. Азимутальная зависимость вкладов кассет первого периферийного ряда в интегральную по высоте плотность потока тепловых нейтронов на радиусе размещения ИК i – номер кассеты

Figure 4. Azimuthal dependence of the contributions from the cassettes in the first peripheral row to the integral thermal neutron flux density with respect to height at the placement radius; i denotes the cassette number

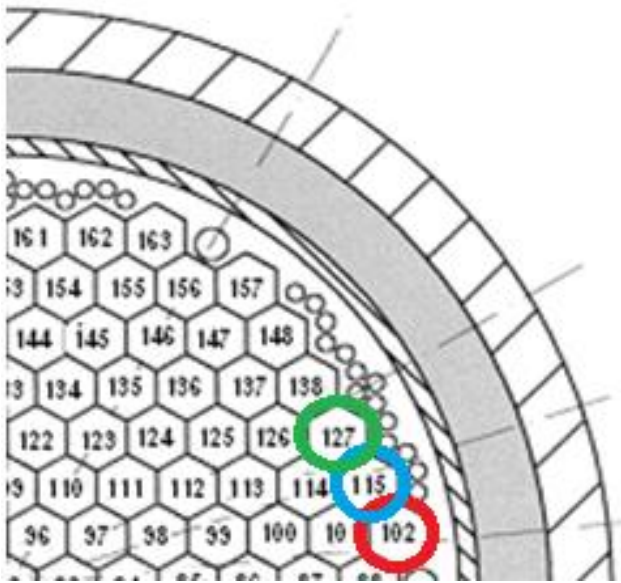


Рисунок 5. Нумерация кассет (i) в активной зоне
Figure 5. Fuel assembly numbering (i) in the core

Аналогично были оценены и аксиальные вклады. По определению $K_i(\theta)$ есть полный вклад кассеты i в плотность потока нейтронов, интегральную в пределах высоты активной зоны. Вклады отдельных аксиальных слоев кассет в плотность потока тепловых нейтронов на различных аксиальных уровнях в каналах ИК определяются выражением (2):

$$K_{ih}(\theta, z) = K_i(\theta) K_h(z), \quad (2)$$

Коэффициенты $K_h(z)$ рассчитываются в цилиндрической RZ геометрии (см. рис. 2). В этой модели два периферийных ряда кассет аппроксимируются кольцевой областью, разбитой на десять аксиальных слоев ($1 \leq h \leq 10$). В этом случае $K_h(z)$ определяется выражением (3):

$$K_h(z) = 1 - \Phi_{t-h}(z) / \Phi_t(z), \quad (3)$$

где $\Phi_t(z)$ — аксиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов на радиусе размещения ИК при задании по всей высоте активной зоны равномерного распределения источника нейтронов деления;

$\Phi_{t-h}(z)$ — аксиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов на радиусе размещения ИК при задании такого же источника в активной зоне, кроме

аксиального слоя h в пределах двух периферийных рядов кассет, источник, в котором задается равным нулю.

В выполненных расчетах не учитывалась конструкция канала и блока ИК. Похожие подходы для оценки вкладов кассет в показания ИК использовались в работах [3-6].

Полученные таким образом для каждой расчетной ячейки в активной зоне (среди двух периферийных рядов кассет, разбитых по высотным слоям) вклады ($K_i(\theta)$ и $K_h(z)$) в поток тепловых нейтронов на радиусе размещения каналов АKNП аппроксимируются сплайнами 3-го порядка для перехода от дискретных зависимостей к непрерывным ($S_i(\theta)$ и $S_h(z)$).

В результате вклад отдельной периферийной ячейки активной зоны с координатой (i, h) в непрерывную поверхность на радиусе размещения каналов АKNП примет следующий вид (4):

$$S_{ih}(\theta, z) = S_i(\theta) S_h(z), \quad (4)$$

Для корректного моделирования переноса нейтронов из активной зоны в места расположения ИК требуется еще учесть влияние плотности и температуры теплоносителя в опускном участке. В результате выражение для переноса нейтронов из активной зоны в поверхность на радиусе расположения каналов АKNП примет следующий вид (5):

$$F_{ih}(\theta, z, \rho, T) = S_i(\theta) S_h(z) \exp(-K(\rho, T)), \quad (5)$$

где $K(\rho, T)$ — коэффициент ослабления потока нейтронов в опускном участке в зависимости от плотности (ρ) и температуры (T) воды в опускном участке.

Коэффициент $K(\rho, T)$ подбирается методом наименьших квадратов при сравнении измеренных на АЭС и рассчитанных по модели ПК ПРОСТОР токов ИК на разных уровнях мощности.

Сравнение моделей ИК АKNП

Проведем сравнение ранее использованной модели ИК АKNП ПК ПРОСТОР и разработанной. Для этого

сопоставим нормированные показания блоков детектирования (БД) АКНП между собой.

На рисунке 6 представлены зависимости показаний БД АКНП от углового расположения камеры вокруг активной зоны при одинаковом источнике нейтронов в активной зоне. Угловая зависимость для старой и новой моделей ИК АКНП имеет шестигранную симметрию. Новая модель дополнительно описывает микроструктуру,

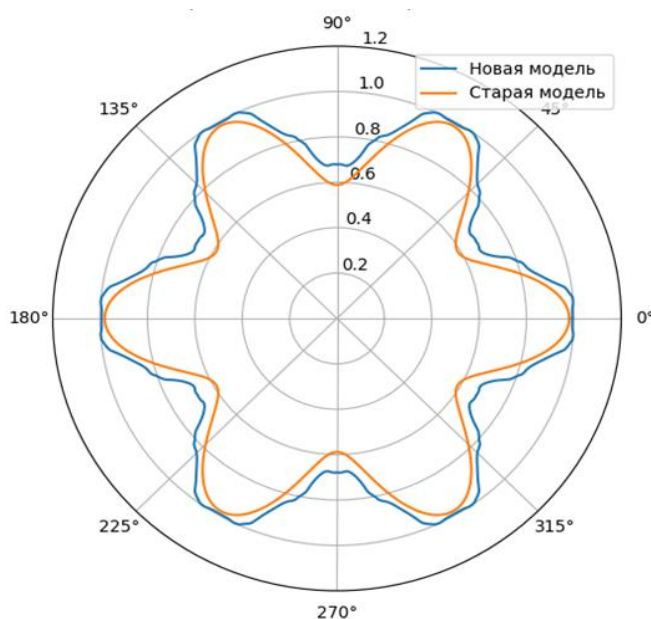


Рисунок 6. Зависимость показаний ИК АКНП от углового расположения камеры

Figure 6. Dependence of the readings of ionization chambers of neutron flux monitoring system on the camera's angular orientation

Таким образом, можно сделать вывод о корректности разработанной модели ИК АКНП.

Также произведем сравнение моделей АКНП на примере моделирования измерений по сбросу аварийной защиты на минимально контролируемом уровне мощности для 2 блока Калининской АЭС в начале 28 топливной кампании. В номерах каналов ИК и их положении по высоте – ИК № 1, 8 и 15 – использовались токи камер пускового диапазона, расположенные в середине верхней половины активной зоны (тип оборудования АКНП: АКНП-33Р).

Это измерение интересно тем, что реактиметры были подключены к верхней ИК

что связано с ослаблением нейтронного потока при его прохождении через неоднородную выгородку.

На рисунке 7 представлены высотные зависимости показаний БД АКНП при одинаковом источнике нейтронов в активной зоне. Из представленных данных видно, что новая модель АКНП корректно описывает ослабление нейтронного потока в области бетонной консоли.

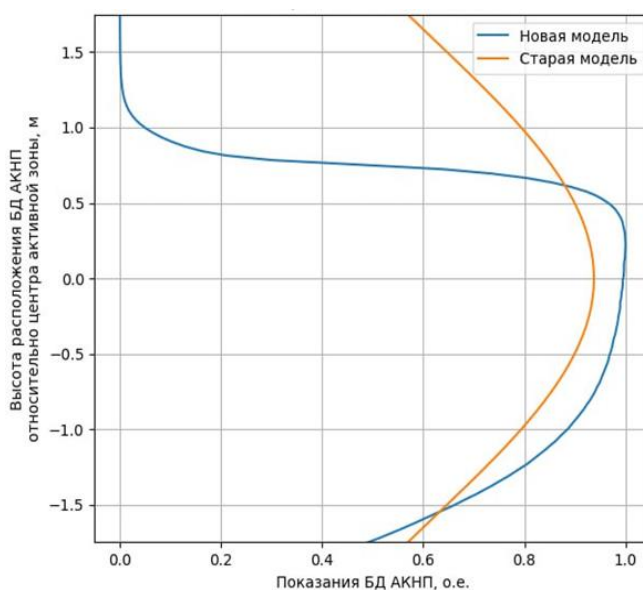


Рисунок 7. Зависимость показаний ИК АКНП от высотного расположения камеры

Figure 7. Dependence of the readings of ionization chambers of neutron flux monitoring system on the camera's altitude

(напротив центра верхней половины активной зоны) в гирляндах АКНП, хотя обычно подключение осуществляется к средней камере (напротив центра активной зоны). Данное измерение было смоделировано в ПК ПРОСТОР, при этом были использованы две разные модели АКНП. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Дадим комментарии к данным, приведенным в таблице 1:

– Измерение (РД ЭО 0151-2004) – данные измерений получены непосредственно с реактиметров.

– Измерение (NOSTRA) – данные измерений, обработанные по программе NOSTRA-EXP. Данное программное обес-

печение предназначено для моделирования и обработки результатов измерений, выполняемых при проведении испытаний по определению эффективности аварийной защиты, для повышения достоверности расчетно-экспериментального определения эффективности аварийной защиты РУ с ВВЭР³.

БИПР-7А – данные получены путем расчетного моделирования измерения по программе БИПР-7А. Данное программное обеспечение для расчетов параметров реак-

тора, предназначено для проектных и эксплуатационных расчетов ВВЭР⁴.

– ПРОСТОР (новая модель АКНП) – данные получены путем расчетного моделирования измерения по ПК ПРОСТОР с использованием улучшенной модели АКНП.

– ПРОСТОР (старая модель АКНП) – данные получены путем расчетного моделирования измерения по ПК ПРОСТОР с использованием упрощенной модели АКНП.

Таблица 1. Полная эффективность аварийной защиты в начала 28 топливной кампании 2 блока Калининской АЭС. Отравление Xe отсутствует. Дата: 2017.10.04.

Table 1. Emergency protection system performance at the start of the 28th refuelling campaign of the Kalinin NPP Unit 2. No Xe contamination. Date: October 4, 2017

Параметры	Измерение (РД ЭО 0151-2004)	Измерение (NOSTRA)	БИПР-7А	ПРОСТОР (новая модель АКНП)	ПРОСТОР (старая модель АКНП)
Тэфф, эфф.сут.	0	0	0	0	0
N, % от Nном	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
H1-H9	ВКВ	ВКВ	ВКВ	ВКВ	ВКВ
H10, %	90	90	90	90	90
№ «застрявшего» ОР СУЗ	11-20	11-20	11-20	11-20	11-20
Сбк, г/кг	11,88	11,88	12,32	11,71	11,71
Твх, °С	278,5	278,5	278,5	278,5	278,5
Р1К, кгс/см ²	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
Ngцн, шт	4	4	4	4	4
Δt, сек.	30	30	–	30	30
βэфф, %	0,67	0,66	0,67	0,67	0,67
Полная эффективность АЗ, %	6,92 ± 0,48	7,62 ± 0,76	7,87 ± 0,79	7,72±1,54	8,02±1,60

Как видно из данных, представленных в таблице 1, результаты измерения эффективности аварийной защиты (АЗ) по новой модели ИК АКНП в составе ПК ПРОСТОР находятся ближе к результатам измерений на АЭС, по сравнению со старой моделью.

Выводы

В работе представлено описание упрощенной (старой) и улучшенной (новой) моделей ИК АКНП в составе ПК ПРОСТОР. Представлено сравнение их показаний между собой и указано на отличия. Новая

модель ИК АКНП лучше описывает изменение нейтронного потока по углу, что связано с детальным моделированием выгородки реактора, а также учитывает наличие бетонной консоли и ослабление нейтронного потока за ней.

Сравнение результатов расчетных исследований сброса аварийной защиты так же показывает, что данные, получаемые с помощью улучшенной модели ИК АКНП, находятся ближе к результатам измерений, проведенных на АЭС.

³ NOSTRA-EXP. Программа для ЭВМ NOSTRA-EXP, совместимая с ОС Astra Linux. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/nostra-exp/> (дата обращения: 20.05.2026).

⁴ Программа БИПР-7А (версия 1.5). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер ПС в ЦЭП при РНК КИ № 613 от 31.07.2006. Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 241 от 23.09.2008. Федеральная служба РФ по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва: 2008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Выговский С.Б., Королев С.А., Чернов Е.В., Семенов А.А., Чернаков В.А. Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» в расчетной поддержке эксплуатации АЭС с ВВЭР. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2014;5(1):15-28. <https://doi.org/10.1134/S2079562914010151>
2. Vygovski S.B., Korolev S.A., Chernov E.V., Semenov A.A., Chernakov V.A. Experience of the use of the PROSTOR simulator complex in the calculation support of the operation of the Kalinin Nuclear Power Plant and prospects of its further application at Nuclear Power Plants with VVER-1000. *Nuclear physics and engineering*. 2014;5(1):15-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079562914010151>
3. Плотников Д.А., Романенко В.И., Соловьев Д.А., Зимин В.Г., Молев И.А., Кудратов В.Н., Ивахин С.В., Джарум Б. Применение кода OpenMC для бенчмарка ВВЭР-1000 со смешанной загрузкой уранового и МОКС-топлива. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):26-35. EDN: [HJDXDQ](https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03) <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>
4. Plotnikov D.A., Romanenko V.L., Solovyev D.A., Zimin V.G., Molev I.A., Kudratov V.N., Ivaxin S.I., Djaroum B. Application of OpenMC code to VVER-1000 MOX Core computational benchmark. *Global safety*. 2025;15(3):26-35. (In Russ.). EDN: [HJDXDQ](https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03) <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-03>
5. Crump M.W., Lee J.C. Calculation of spatial weighting functions for ex-core neutron detectors. *Nuclear technology*. 1978;41:87-96. <https://doi.org/10.13182/NT78-A32135>
6. Tamas Berki. Calculation of spatial weighting functions for ex-core detectors of VVER-440 reactors by Monte Carlo method. International conference Nuclear energy for new Europe. September 8-11, 2003. Portoroz, Slovenia, 2003. P. 103.1-103.8. Available at: https://www.researchgate.net/publication/264893833_Calculation_of_Spatial_Weighting_Functions_for_Ex-Core_Detectors_of_VVER-440_Reactors_by_Monte_Carlo_Method (accessed: 20.05.2026).
7. Ahn J.G., Cho N.Z. Generation of spatial weighting functions for ex-core detectors by adjoint transport calculation. *Nuclear technology*. 1993;103:114-121. Available at: <https://www.sci-hub.box/10.13182/nt93-a34834> (accessed: 20.05.2026).
8. Roh G., Kim Kang-Seog, Koo Bon-Seung, Lee Chung-Chan, Kim Kyo-Youn. Ex-Core detector response evaluation of the SMART reactor by using the DORT code. *Nuclear science and technology*. 2008;5:78-81. <https://doi.org/10.1080/00223131.2008.10875790>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кудратов В.Н. – расчетные исследования и разработка модели ИК АКНП в OpenMC;
Воронин И.Д. – разработка модели ИК АКНП в OpenMC;
Соловьев Д.А. – разработка моделей ИК АКНП в ПК ПРОСТОР;
Семенов А.А. – разработка моделей ИК АКНП в ПК ПРОСТОР;
Гололобов С.М. – разработка моделей ИК АКНП в ПК ПРОСТОР;
Шукин Н.В. – научное консультирование;
Ивахин С.В. – методика расчета переноса излучения в сильно поглощающих средах для OpenMC;
Плотников Д.А. – расчетные исследования и разработка модели ИК АКНП в OpenMC;
Новиков Г.Г. – расчетные исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Вохид Насриддин угли Кудратов, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0009-0006-4760-5877>
 e-mail: vkudratov0727@gmail.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kudratov V.N. – computational studies and ex-core detectors model development in OpenMC;
Voronin I.D. – ex-core detectors model development in OpenMC;
Solovyev D.A. – ex-core detectors model development in the PROSTOR;
Semenov A.A. – ex-core detectors model development in the PROSTOR;
Gololobov S.M. – ex-core detectors model development in the PROSTOR;
Shchukin N.V. – scientific consulting;
Ivakhin S.V. – radiation transport methodology for highly heterogeneous media in OpenMC;
Plotnikov D.A. – computational studies and ex-core detectors model development in OpenMC;
Novikov G.G. – computational studies.

FUNDING:

There is no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Voxid N. Kudratov, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0009-0006-4760-5877>
 e-mail: vkudratov0727@gmail.com

Игорь Дмитриевич Воронин, НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация
<https://orcid.org/0009-0009-8985-6625>
e-mail: voronin-igor-2005@yandex.ru

Денис Алексеевич Соловьев, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-0507-0839>
e-mail: vulture@inbox.ru

Андрей Артемьевич Семенов, ведущий инженер НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-5495-3662>
e-mail: vulture@inbox.ru

Сергей Михайлович Гололобов, ведущий инженер НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0009-0003-2178-5142>
e-mail: s1611gololobov@yandex.ru

Николай Васильевич Щукин, профессор НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-4228-7228>
e-mail: nvshchukin@mephi.ru

Сергей Викторович Ивахин, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0003-0320-8950>
e-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

Денис Алексеевич Плотников, аспирант НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0001-9387-170X>
e-mail: pda1995@gmail.com

Григорий Григорьевич Новиков, доцент НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0003-1102-6516>
e-mail: GGNovikov@mephi.ru

Igor D. Voronin, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0009-0009-8985-6625>
e-mail: voronin-igor-2005@yandex.ru

Denis A. Solovyev, Assistant Professor, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-0507-0839>
e-mail: vulture@inbox.ru

Andrey A. Semenov, Lead Engineer, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-5495-3662>
e-mail: vulture@inbox.ru

Sergey M. Gololobov, Lead Engineer, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0009-0003-2178-5142>
e-mail: s1611gololobov@yandex.ru

Nikolay V. Shchukin, Professor, НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-4228-7228>
e-mail: nvshchukin@mephi.ru

Sergey V. Ivakhin, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0003-0320-8950>
e-mail: sergey.ivakhin@gmail.com

Denis A. Plotnikov, Postgraduate, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0001-9387-170X>
e-mail: pda1995@gmail.com

Grigory G. Novikov, Assistant Professor, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0003-1102-6516>
e-mail: GGNovikov@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 26.05.2025
После доработки / Revision 28.08.2026
Принята к публикации / Accepted 01.09.2026