

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

EDN LQRKEU

Оригинальная статья / Original paper



**Многоточечная модель кинетики с мощностным эффектом реактивности
для контроля аксиального офсета реактора ВВЭР-1200 в режиме
следования за нагрузкой**

С.С. Правосуд^{1,2}  , Я.О. Якубов² , В.А. Сусакин² 

¹АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

²Северский Технологический Институт – филиал Национального Исследовательского Ядерного
Университета МИФИ, г. Северск, Томская обл., Российская Федерация

 SSPravosud@mephi.ru

Аннотация. В данной работе предложена и смоделирована в среде MATLAB многоточечная модель кинетики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящая из различной совокупности моделей точечной кинетики в аксиальном направлении – две точки, четыре, шесть, восемь и десять, которые связаны между собой коэффициентами, определенными в рамках диффузионного приближения. Для более точного описания динамических режимов работы реактора модель была охвачена мощностной обратной связью, определенной по температурным эффектам реактивности и подхода Манна для описания теплогидравлических процессов, в рамках которого предполагается, что к одному топливному узлу примыкает два узла теплоносителя. На модели, состоящей из четырех аксиальных точек, дополнительно было исследовано влияние различного числа групп запаздывающих нейтронов на точность и скорость моделирования переходных процессов в режиме следования за нагрузкой. В работе также предложена новая математическая модель органов регулирования, которая воздействует последовательно на разные точки при введении и выведении путем комбинаций функций знака sign. Результаты численного моделирования показывают, что статистическая точность предложенных моделей является удовлетворительной, общий вид переходных процессов согласуется с физическими представлениями. Данная работа способствует дальнейшему развитию связанных в нейтронно-физическом смысле точечных моделей ядерного реактора для улучшения синтеза автоматического регулятора мощности.

Ключевые слова: точечная кинетика, многоточечная кинетика, режим следования за нагрузкой, мощностной эффект реактивности, модель Манна, аксиальный офсет, ВВЭР-1200, верификация.

Благодарность. Авторы выражают благодарность отделу тренажерного обучения АНО ДПО «Техническая академия Росатома» за помощь в проведении работ.

Для цитирования: Правосуд С.С., Якубов Я.О., Сусакин В.А. Многоточечная модель кинетики с мощностным эффектом реактивности для контроля аксиального офсета реактора ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):73–90. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

For citation: Pravosud S.S., Yakubov Ya.O., Susakin V.A. Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):73–90 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

**Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset
control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode
of operation**

Sergei S. Pravosud^{1,2}  , Yaroslav O. Yakubov² , Vladislav A. Susakin² 

¹Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

²Seversk Technological Institute – a branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Seversk, Tomsk region, National Research University «MEPhI», Russian Federation

 SSPravosud@mephi.ru

Abstract. This article proposes the multipoint kinetics model consisting with different number of point kinetics model (two points, four points, six points, eight points, ten points) in the axial direction for the VVER-1200 nuclear reactor. Each node is coupled with others through the coupling coefficients determined from the diffusion approach. For more precise description of the dynamical modes of the reactor operation, the proposed model integrates the power reactivity feedback derived from temperature reactivity coefficients and Mann's thermal hydraulic model which assumes one fuel node adjacent to two coolant nodes. On the model with four axial points, additionally was tested the influence of the different number of delayed neutrons groups on the accuracy results and model running time during the load-following mode of operation. Moreover, the novel model of the control rods is introduced, utilizing a combination of sign functions to sequentially influence all nodes during insertion or withdrawal. The computational results show that the accuracy of the proposed model is satisfactory, and general assumptions about transients align with their physical definitions. This research contributes to the advancement of the point-like nuclear reactor modeling for improvement of the automatic power controller synthesis.

Keywords: point kinetics, multipoint kinetics, load-following mode, Mann's model, power reactivity coefficient, axial offset, VVER-1200, verification.

Acknowledgment. Authors express their gratitude to the Simulator Training Department of the Rosatom Technical Academy for their help.

Введение

Для изучения динамических режимов работы ядерного реактора, синтеза систем автоматического регулирования мощности, широко используются модели со сосредоточенными параметрами, основанные на модели точечной кинетики (Point Kinetics Approximation, PKA) [1], дополненной местными обратными связями по технологическим параметрам. Однако, такие модели не могут описывать пространственные эффекты, связанные, например, с накоплением продуктов деления, приводящих к шлакованию и отравлению. В то же время, нарушение баланса в верхней и нижней частях активной зоны реакторов типа PWR или ВВЭР в режиме следования за нагрузкой может привести к возникновению аксиальных ксеноновых колебаний. В работе «Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200» [2] коллективом авторов были исследованы различные варианты подавления ксеноновых колебаний, в том числе и только с работой АРМ – автоматического регулятора мощности реакторной установки; результат численного экспери-

мента показал, что подавления колебаний с помощью исключительно АРМ без привлечения дополнительных управляющих воздействия не позволяет удерживать значение аксиального офсета в границах офсетно-мощностной диаграммы. Это может быть объяснено тем, что синтез АРМ происходит на модели точечной кинетики. Следовательно, контроль аксиального офсета – технологической характеристики равномерности энерговыделения в активной зоне, а также разработка и верификация математических моделей, которые могут отображать его изменение, и при этом подходящие для синтеза автоматического регулятора мощности, является актуальной задачей.

Многоточечная модель кинетики (Multipoint kinetics, МРК или теория связанных реакторов) была впервые предложена Эйвери [3] в 1958 г. Основываясь на физическом предположении о диффузии нейтронов, подход Эйвери предлагает разбиение всего объема реактора на зоны – узлы малых объемов, внутри которых нейтронное поле будет достаточно равномерным, что позволяет описывать поведение нейтронов моделью то-

чечной кинетики. При этом каждый узел связан с другими узлами коэффициентами, учитывающими взаимную диффузию в данные узлы и из них. В оригинальной работе Эйвери рассмотрел случай разбиения на две зоны управления, в то время как в работе Беллени-Моранте [4], используя подход Эйвери, рассмотрел общий случай разбиения на G узлов для реактора UTR-10.

Кобаяши [5] использовал более строгий математический подход для составления многоточечной модели, базируясь на зависимых от времени многогрупповых диффузионных уравнениях для разных областей активной зоны, а также представил аналитические выражения и их изменения для коэффициентов связи, времени жизни нейтронов и других параметров из-за отклонений других параметров многоточечной модели кинетики в простых геометриях. Детальное сравнение двух подходов МРК с РКА было проведено Валоччи и др. [6]. Они включили рассмотрение своих подходов в код APPOLO3, и исследовали переходные процессы в ядерном реакторе на тепловых нейтронах.

Используя многоточечный подход, Донг и др. [7] разработали математическую модель модульного реактора ВТГР; полученные результаты численного моделирования показывают, что статистически точность предложенной модели является удовлетворительной, а переходные процессы соответствуют экспериментальным. Ванг и др. [8] разработали многоточечную математическую модель реактора AP-1000. Полученные результаты моделирования показывают, что переходные процессы и пространственные ксеноновые колебания хорошо согласуются с общими физическими представлениями. Важным результатом, полученным исследователями группами Донга и Ванга [7,8], является то, что полученные модели способны отражать информацию о распределении мощности в активной зоне реактора. Также было заключено, что предложенные модели могут служить основой при проектировании системы управления мощностью реактора AP1000 и ВТГР.

Пучальски и др. [9] исследовали многоточечную модель, описывающие теплогидравлические процессы в активной зоне реактора

PWR. В другой работе ими же [10] предложен метод для поиска коэффициентов энерговыделения при вводе органов регулирования СУЗ. Авторами также обосновано, что введение коэффициентов распределения мощности в расширенную многозонную модель позволяет использовать более совершенные и сложные алгоритмы управления активной зоной реактора PWR, например, в области управления распределением температур топливных элементов и теплоносителя. Однако для описания нейтронно-физических процессов в указанных работах [9,10] используется классическая модель точечной кинетики, то есть не учитываются пространственные нейтронно-физические процессы.

Жеровником и др. сделан подробный обзор предыдущих работ в области многоточечной кинетики и управлению реактором в режимах следования за нагрузкой [11]. Анализ, в основном, сосредоточен на разработанных для таких целей моделей реакторов с водой под давлением (PWR). Подробно описаны и сопоставлены различные приближения нестационарной задачи переноса нейтронов, а также сравнены различные современные алгоритмы управления, такие как управление с прогнозирующими моделями (MPC), управление на основе нечеткой логики (FLC), оптимальное управление на основе линейно-квадратичного Гауссового регулятора (LQG) и др.

Среди работ, использующих при синтезе систем автоматического регулирования многоточечный подход следует отметить Маусказами [12] (Control of a pressurized light-water nuclear reactor two-point kinetics model with the performance index-oriented PSO): разработанный ПИД-регулятор для управления мощностью адаптировался к различным нагрузкам с использованием оптимизации методом роя частиц (PSO). Помимо прочего, был исследован режим следования за нагрузкой и изменение аксиального офсета. Зайдабади и др. [13] (Adaptive robust control for axial offset in the P.W.R nuclear reactors based on the multipoint reactor model during load-following operation) представил адаптивное робастное управления реактором PWR в режиме следования за нагрузкой, ис-

пользуя четырехточечную модель кинетики. Афтаб и Луан, базирываясь на двухточечной модели, разработали линейную переменную идентификацию на основе метода Такаги – Сугено нечеткой логики [14]. Расширяя подход, Зайдабади и др. [13], Абдулрахим и др. [15] использовали адаптивное управление в скользящем режиме второго порядка, способное эффективно подавлять ксеноновые колебания в режиме следования за нагрузкой.

В данной работе в программном пакете MATLAB как S-function lv.2 для исследования режима следования за нагрузкой были предложены многоточечные модели реактора ВВЭР-1200, состоящие из 2, 4, 6, 8 и 10 узлов в аксиальном направлении, и охваченные мощностной обратной связью, определенной на основе температурных эффектов реактивности для упрощения рассматриваемого подхода, так как известно, что такая модель хорошо подходит для описания медленных квазистационарных процессов. Также исследовано влияние различного числа групп (1 группа, 3 группы, 6 групп, 8 групп) запаздывающих нейтронов на точность переходных процессов и время моделирования. Более того, предложен новый, значительно расширяющий подход ряда исследований [12-15] к математической модели ОР СУЗ с использованием комбинаций функций знака sign, которые позволяют учесть последовательное воздействие на все узлы при вводе органов регулирования.

Модель точечной кинетики

Модель точечной кинетики была представлена в работе Генри [1] для анализа нестационарных процессов. Данное уравнение базируется на односкоростном нестационарном уравнении диффузии нейтронов, не учитывает пространственное распределение нейтронного потока. Уравнение точечной кинетики записывается в виде (1):

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

где $n(t)$ – плотность тепловых нейтронов (см^{-3}),

$C_i(t)$ – концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов (см^{-3}),

Λ – время жизни нейтронов (сек), ρ – реактивность, вносимая ОР СУЗ,

β – суммарная доля запаздывающих нейтронов $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$,

λ_i – постоянная распада i -ой группы ядер – предшественников запаздывающих нейтронов (сек^{-1}).

В общепринятой форме для большинства расчетов переходных процессов используется шесть групп ($k = 6$) запаздывающих нейтронов, которые распределены в зависимости от их времени жизни [1]. Велоччи и др. [6] проводили сравнения различных моделей МРК используя также 6 групп запаздывающих нейтронов, так же как Донг [7], Ванг [8] и Пучальски [9]. Однако, чтобы уменьшить расхождения между измеренными и расчетными значениями реактивности, основанной на обращенном решении уравнения кинетики реактора, рекомендуется новое представление, основанное на восьмигрупповом подходе ($k = 8$), предложенное Сприггсом и др. [16]. Сокращенное до трех групп ($k = 3$) приближение, предложенное Скиннером и Коэном [17], также хорошо проявило себя в анализе асимптотического поведения передаточной функции ядерного реактора, а также при останове реактора, и, например, было использовано в работах Маусаказеми [12], Зайдабади [13], Абдулрахима [15] при моделировании систем автоматического регулирования мощности. Афтаб и Луан [14] ограничились одной группой запаздывающих нейтронов.

Параметры запаздывающих нейтронов при одногрупповом, трехгрупповом, шестигрупповом и восьмигрупповом приближениях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры групп запаздывающих нейтронов
Table 1. Delayed neutrons group parameters

β_i	Значения выхода i-ой группы ядер предшественников запаздывающих нейтронов				λ_i	Значения постоянной распада i-ой группы ядер предшественников запаздывающих нейтронов, сек ⁻¹			
	1 группа	3 группы	6 групп	8 групп		1 группа	3 группы	6 групп	8 групп
β_1	.0065000	.0002145	.0002145	.0002145	λ_1	0.1000	0.0124	0.1280	0.0125
β_2	-	.0022490	.0014235	.0010010	λ_2	-	0.0369	0.0300	0.0283
β_3	-	.0040365	.0012740	.0005915	λ_3	-	0.6320	0.1240	0.0425
β_4	-	-	.0025675	.0012805	λ_4	-	-	0.3250	0.1593
β_5	-	-	.0007475	.0021515	λ_5	-	-	1.1180	0.3628
β_6	-	-	.0002730	.0005850	λ_6	-	-	2.6660	1.2648
β_7	-	-	-	.0005265	λ_7	-	-	-	1.8330
β_8	-	-	-	.0001495	λ_8	-	-	-	3.4140
$\beta = \sum \beta_i$	.0065000	.0065000	.0065000	.0065000					

Многоточечная модель кинетики

В данной работе, так же как в исследованиях Донга и Ванга [7,8], односкоростная

многоточечная модель кинетики представлена в виде (2):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dn_j(t)}{dt} &= \frac{\rho_j - \beta}{\Lambda} n_j(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_i C_{ji}(t) + \omega_{j+1 \rightarrow j} n_{j+1}(t) + \omega_{j-1 \rightarrow j} n_{j-1}(t) - \omega_{j \rightarrow j+1} n_j(t) - \omega_{j \rightarrow j-1} n_j(t) \\ \frac{dC_{ji}(t)}{dt} &= \frac{\beta_i}{\Lambda} n_j(t) - \lambda_i C_{ji}(t) \\ \omega_{j \rightarrow j+1} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_j(0)}{n_{j+1}(0)} P_{обм} \\ \omega_{j \rightarrow j-1} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_j(0)}{n_{j-1}(0)} P_{обм} \\ \omega_{j+1 \rightarrow j} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_{j+1}(0)}{n_j(0)} P_{обм} \\ \omega_{j-1 \rightarrow j} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_{j-1}(0)}{n_j(0)} P_{обм} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии между узлами (~ 0.16 см);

v – скорость тепловых нейтронов ($\sim 2.2 \times 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$);

ΔH – высота узла (см);

d – расстояние между центрами двух соседних узлов (см);

$P_{обм}$ – вероятность обмена нейтронами (~ 0.01).

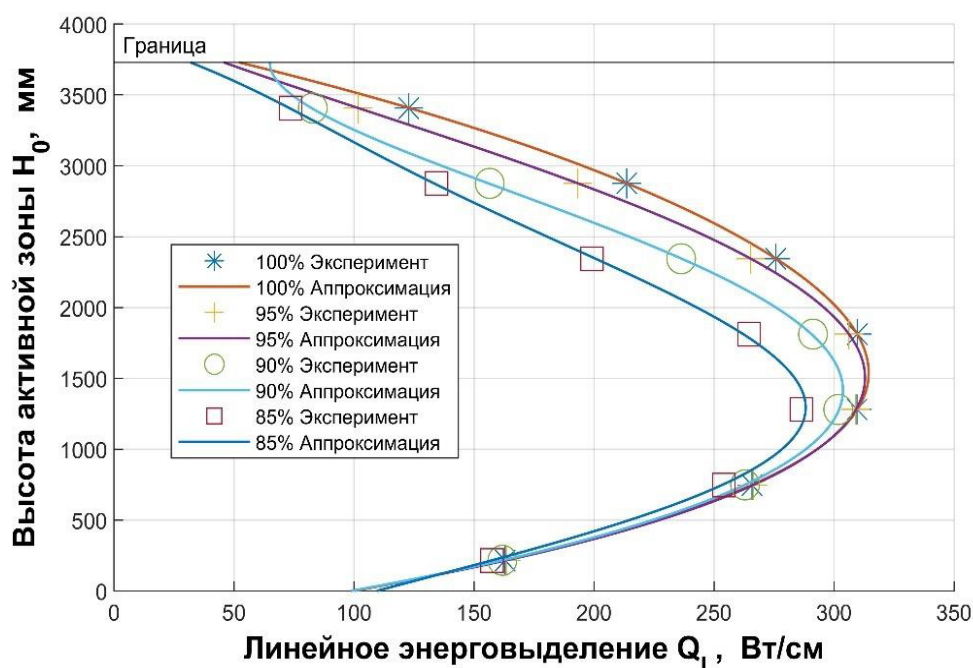
Поправка на вероятность обмена нейтронами между разными зонами введена в соответствии с диссертационным исследованием М.А. Вольман «Имитационное моделирование нейтронно-физических и теплогидрав-

лических процессов в реакторах ВВЭР-1000» [18].

Для получения коэффициентов доли энерговыделения в активной зоне реактора ВВЭР-1200, были использованы данные детекторов прямого заряда по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29), при перемещении 12 группы ОР СУЗ и мощностях 100%, 95%, 90%, 85% от номинальной (данные получены с многофункционального тренажера ВВЭР-1200). Затем полученные значения были аппроксимированы полиномами пятого порядка методом наименьших квадратов (коэффициент детерминации $R^2 > 0.99$). Полученные данные представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Линейное энерговыделение на различных уровнях мощности**Table 2.** Linear power density distribution at different power levels

№ ДПЗ	Линейное энерговыделение наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) $Q_L, \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$			
	100%	95%	90%	85%
7	122.8	101.6	82.8	73.5
6	213.6	193.2	156.5	134.4
5	275.7	265.2	236.3	199.1
4	309.7	306.2	291.2	264.6
3	309.6	309.0	301.7	286.4
2	265.8	266.4	262.8	254.1
1	162.9	163.4	161.8	157.4

**Рисунок 1.** Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) при варьировании мощности реактора в пределах 100%–85%**Figure 1.** Linear power density distributions for the most energy-loaded fuel assembly (10–29) when varying the reactor power over the range of 100%–85%

Аксиальный офсет составляет -9.28% для 100% уровня мощности, -12.53% для 95%, -17.9% для 90% и -22.2% для уровня мощности 85%.

Ванг с соавторами. в работе [8] исследовали деление реактора AP1000 в аксиальном направлении на 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20, 42 точек, и при этом отметили, что между делением на 20 и 42 практически отсутствует разница в точности моделирования, однако время вычислений увеличивается более чем в 2 раза. Важно отметить, что в качестве эталона была взята сама схема деления на 42 узла, а не экспериментальная модель. Более того, оптимальной схемой делений была признана 14 точечная, а отличие 14 точечной

с 4 точечной схемой было незначительным. В своей работе Донг и соавторы. [7] ограничились 10 точками для активной зоны реактора ВТГР. При этом в указанных исследованиях [7,8] проводилось моделирование только скачкообразного введения реактивности в определенные точки без использования явной модели органов регулирования, и как следствие, не был исследован режим следования за нагрузкой, поэтому предложенное в текущей работе исследование сохраняет свою актуальность.

При синтезе системы автоматического регулирования мощности авторские команды Маусаказеми и Афтаба [12,14] ограничились всего двумя точками. Разбиение же на 4 точ-

ки в аксиальном направлении показало себя удовлетворительно в исследованиях Зайдабади и Абдурахим [13,15], однако, как отмечалось выше, в проанализированных работах [12-15] были использованы независимые друг от друга в верхней и нижней частях активной зоны математические модели ОР СУЗ, что накладывает ограничение на дальнейшее применение результатов. Более того, в некоторых из работ отсутствовала разница в мощности между верхом и низом активной зоны, то есть аксиальный офсет на начало моделирования был равен 0%.

Так как основная цель авторов работы – использование в дальнейшем разработанной

модели для синтеза системы автоматического регулирования мощности, то авторы ставят задачу нахождения наиболее удовлетворительной модели с точки зрения статистической точности результатов вычислений и скорости этих вычислений.

На основе аппроксимирующего полинома для уровня мощности 100% были найдены значения линейного энерговыделения, соответствующие серединам высот узлов, внутри которых используется модель точечной кинетики (2 точки, 4 точки, 6 точек, 8 точек и 10 точек в аксиальном направлении). Данное распределение представлено на рисунке 2.

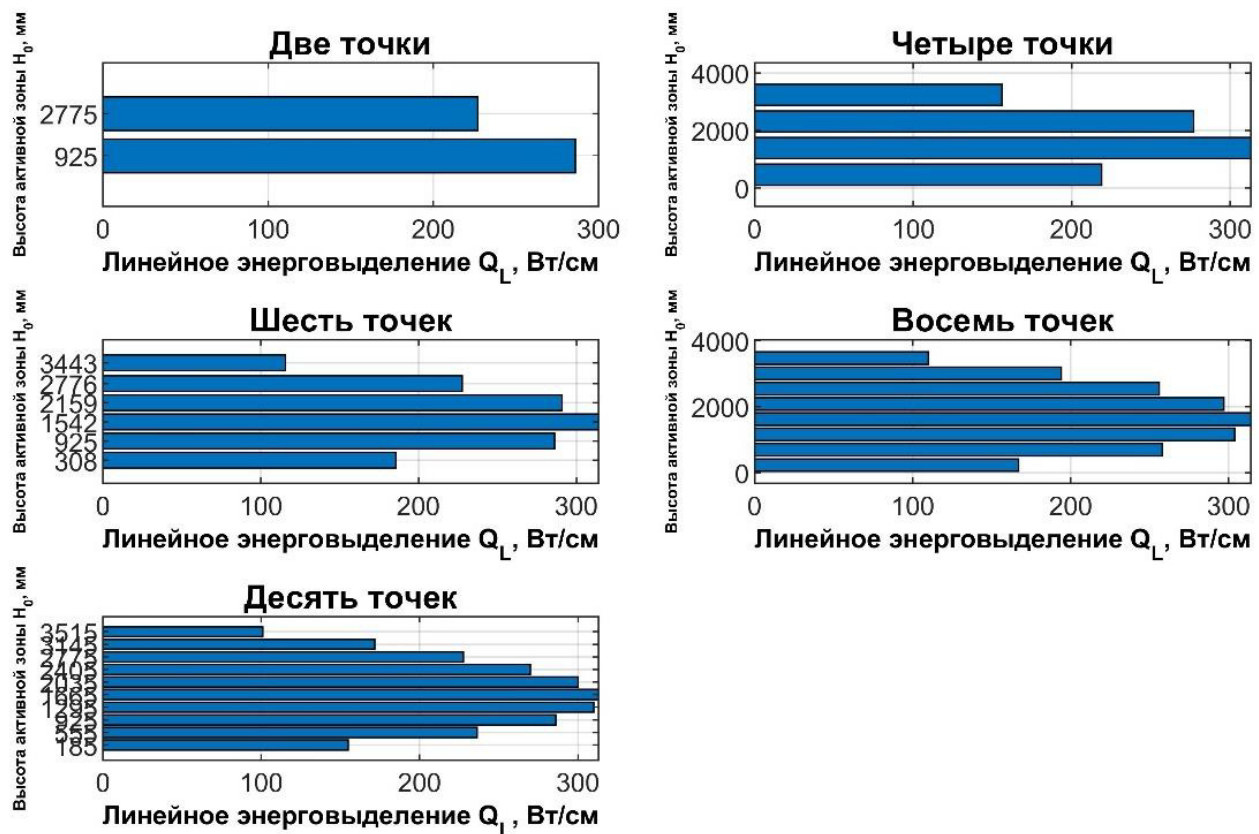


Рисунок 2. Данные по энерговыделению при использовании различного числа аксиальных точек
Figure 2. Data about the released energy when the different number of axial points is used

Например, для двухточечной модели можно установить, что в верхней части активной зоны выделяется примерно 44% от всей энергии, и примерно 56% - в нижней части.

Аксиальный офсет [11] определяется по формуле (3):

$$AO = \frac{P_{\text{верх}} - P_{\text{низ}}}{P_{\text{верх}} + P_{\text{низ}}} \quad (3)$$

Поэтому аксиальный офсет на начало моделирования (100% мощность) для всех моделей составляет: - 11.5% – для двухточечной модели, -10.26% – для четырехточечной, -10.69% – для шеститочечной, -9.79% – для

восьмиточечной, и -9.70% – для десятиточечной. Можно отметить, что при увеличении числа точек аксиальный офсет все более приближается к экспериментальному для уровня мощности 100%.

Мощностной эффект реактивности

Известно, что мощностной эффект реактивности проявляет себя опосредованно и может быть определен на основании других эффектов реактивности. Например, в работе [19] Казанский и Слекеничс определили для реактора типа ВВЭР мощностной эффект реактивности по температурным эффектам реактивности топлива и теплоносителя как представлено в выражении (4):

$$\frac{d\rho}{dP} = a_P = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \frac{dT_i}{dP} = a_T^T \frac{dT_T}{dP} + a_{TH}^T \frac{dT_{TH}}{dP} \quad (4)$$

В представленной работе [18] температура теплоносителя принималось равной сумме входной и выходной температур теплоносителя. В текущей работе в качестве опорной модели выступает верифицированная модель динамики [20], использующая подход Р. Манна для описания теплогидравлических процессов, которая может быть представлена в виде (5):

$$\begin{cases} m_T \gamma_T \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ m_{TH} \gamma_{TH} \frac{d\bar{\theta}_1(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) - G_{TH} \gamma_{TH} (\bar{\theta}_1(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ m_{TH} \gamma_{TH} \frac{d\bar{\theta}_2(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) - G_{TH} \gamma_{TH} (\bar{\theta}_2(t) - \bar{\theta}_1(t)) \end{cases} \quad (5)$$

где P – тепловая мощность ядерного реактора (МВт);

$\bar{T}$ – среднее значение температуры топливных элементов ($^{\circ}\text{C}$);

ε – доля энергии, выделяющаяся непосредственно в топливе (~97%);

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности теплообмена (м^2);

$K_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$);

m_T – масса топливных элементов (кг);

γ_T – удельная теплоемкость топливных элементов ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$);

G_{TH} – массовый расход теплоносителя через реактор ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$);

m_{TH} – масса теплоносителя в активной зоне (кг);

γ_{TH} – удельная теплоемкость теплоносителя ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$);

$\bar{\theta}_1(t), \bar{\theta}_2(t)$ – усреднённые поперек канала теплоносителя температуры в первом и втором узлах (низ и верх активной зоны) соответственно ($^{\circ}\text{C}$).

Все численные параметры взяты из [17]. Принимая равной 0 левую часть уравнения (установившийся режим), находим установившееся значения температур топлива $\bar{T}$, а также температур теплоносителя в первом и втором узлах $\bar{\theta}_1$ и $\bar{\theta}_2$ соответственно (6.1):

$$\begin{cases} \bar{T} = \frac{\varepsilon}{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}} P + \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_1 = \frac{1-\varepsilon}{2(K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + G_{TH} \gamma_{TH})} P + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2(K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + G_{TH} \gamma_{TH})} \bar{T} + \frac{G_{TH} \gamma_{TH}}{(K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + G_{TH} \gamma_{TH})} \theta_{\text{вх}} \\ \bar{\theta}_2 = \frac{1-\varepsilon}{2G_{TH} \gamma_{TH}} P + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2G_{TH} \gamma_{TH}} \bar{T} + \frac{G_{TH} \gamma_{TH} - K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{G_{TH} \gamma_{TH}} \bar{\theta}_1 \end{cases} \quad (6.1)$$

Затем находим производные по мощности, предполагая, что $\theta_{\text{вх}}$ остается неизменной (6.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{T}}{dP} = \frac{\varepsilon}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}} + \frac{d\bar{\theta}_1}{dP} \\ \frac{d\bar{\theta}_1}{dP} = \frac{1-\varepsilon}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}+2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}+2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \frac{d\bar{T}}{dP} \\ \frac{d\bar{\theta}_2}{dP} = \frac{1-\varepsilon}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \frac{d\bar{T}}{dP} + \frac{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}-K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \frac{d\bar{\theta}_1}{dP} \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Откуда можно установить, что (6.3):

$$\alpha_P = \alpha_T^T \frac{d\bar{T}}{dP} + \frac{\alpha_{\text{ТН}}^T}{2} \left(\frac{d\bar{\theta}_1}{dP} + \frac{d\bar{\theta}_2}{dP} \right) = \alpha_T^T \left(\frac{\varepsilon}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}} + \frac{1}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \right) + \alpha_{\text{ТН}}^T \frac{1}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \quad (6.3)$$

Результат (6.3) полностью совпал с полученным в [16]. При этом необходимо учесть, что α_T^T и $\alpha_{\text{ТН}}^T$ не являются константами, а зависят от мощности. Они могут быть представлены выражениями (6.4) и (6.5) соответственно [13,15]:

$$\alpha_{\text{Tj}}^T = \left(\frac{P_j}{P_{\text{общ}}} - \frac{4.24}{j} \right) \times 10^{-5} \quad (6.4)$$

$$\alpha_{\text{ТНj}}^T = \left(-\frac{4P_j}{P_{\text{общ}}} - \frac{17.3}{j} \right) \times 10^{-5} \quad (6.5)$$

В формулах (6.4) и (6.5) учтена поправка на число j использованных точечных моделей. Следовательно, финальная версия модели динамики, состоящей из нескольких связанных точек в аксиальном направлении с учетом мощностного коэффициента реактивности, может быть записана в виде (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_j(t)}{dt} = \frac{\rho_j - |\alpha_{Pj}|(P_j - P_{j0}) - \beta}{\Lambda} P_j(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_i C_{ij}^*(t) + \omega_{j+1 \rightarrow j}^* P_{j+1}(t) + \omega_{j-1 \rightarrow j}^* P_{j-1}(t) - \omega_{j \rightarrow j+1}^* P_j(t) - \omega_{j \rightarrow j-1}^* P_j(t) \\ \frac{dC_{ij}^*(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P_j(t) - \lambda_i C_{ij}^*(t) \\ P_j(t) = E_f \Sigma_f V_j v n_j(t) \\ C_{ij}^*(t) = E_f \Sigma_f V_j v C_{ij}(t) \\ \omega_{j+1 \rightarrow j}^* = \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{P_{j+1}(0)}{P_j(0)} P_{\text{обм}} \\ \omega_{j-1 \rightarrow j}^* = \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{P_{j-1}(0)}{P_j(0)} P_{\text{обм}} \\ \omega_{j \rightarrow j+1}^* = \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{P_j(0)}{P_{j+1}(0)} P_{\text{обм}} \\ \omega_{j \rightarrow j-1}^* = \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{P_j(0)}{P_{j-1}(0)} P_{\text{обм}} \\ j = 1..10 \end{array} \right. \quad (7)$$

где E_f – энергия, выделяющаяся при делении (Дж);

E_f – макроскопическое сечение деления урана-235 (см⁻¹);

V_j – объем j -го узла (см³).

Математическая модель ОР СУЗ для многоточечной модели

Математическая модель и передаточная функция 12 группы ОР СУЗ получены авторами в статье «Применение нечетких регуля-

торов для управления мощностью ядерного реактора ВВЭР-1200» [21] на основе экспериментальных данных интегральной эффективности. Однако, при использовании многоточечного подхода необходимо учитывать различное воздействие при перемещении органов регулирования – 12 группы ОР СУЗ на соответствующие точечные модели, при этом сохранив возможность описания вносимой реактивности системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого

порядка. Так как характеристика стержней является нелинейной по высоте, то для дальнейшего упрощения максимальная реактивность, внесенная ОР СУЗ совокупно в систему при определенном положении, принята равной $\rho_1^{tot} \dots \rho_j^{tot}, j \in (1; 10)$.

Как отмечалось выше, в работах [13,15] используется четырехточечная модель, однако воздействие ОР СУЗ на различные узлы

описывается отдельными уравнениями, не входящими в единую систему. Схожий подход, но только для двух узлов, можно найти в [12,14]. Для устранения данных недостатков была использована комбинация функций знака $sign$, и при использовании четырех узлов математическая модель 12 группы ОР СУЗ может быть записана в виде (8):

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = G_r h_0 (1 + sign(h)) \\ \frac{d\rho_1^{av}}{dt} = G_r \rho_1^{tot} \left(1 + sign\left(h - \frac{3h_0}{4}\right)\right) \\ \frac{d\rho_2^{av}}{dt} = G_r (\rho_2^{tot} - \rho_1^{tot}) \left(1 - sign\left(h - \frac{3h_0}{4}\right)\right) \left(1 + sign\left(h - \frac{h_0}{2}\right)\right) \\ \frac{d\rho_3^{av}}{dt} = G_r (\rho_3^{tot} - \rho_2^{tot}) \left(1 - sign\left(h - \frac{h_0}{2}\right)\right) \left(1 + sign\left(h - \frac{h_0}{4}\right)\right) \\ \frac{d\rho_4^{av}}{dt} = G_r (\rho_4^{tot} - \rho_3^{tot}) \left(1 - sign\left(h - \frac{h_0}{4}\right)\right) (1 + sign(h)) \end{cases} \quad (8)$$

где h – текущее положение 12 группы ОР СУЗ (мм);

h_0 – высота активной зоны реактора ВВЭР-1200;

G_r – скорость перемещения ОР СУЗ (в долях высоты активной зоны в сек);

$\rho_1^{av}, \rho_2^{av}, \rho_3^{av}, \rho_4^{av}$ – средняя вносимая реактивность 12 группой ОР СУЗ в 1, 2, 3 и 4 узлы, соответственно.

На рисунке 3 приведен пример аппроксимации модели 12 группы ОР СУЗ на 100% и 90% уровне мощности с использованием метода наименьших квадратов полиномами пятой степени, а также с помощью кусочно-линейных функций для четырехточечной модели.

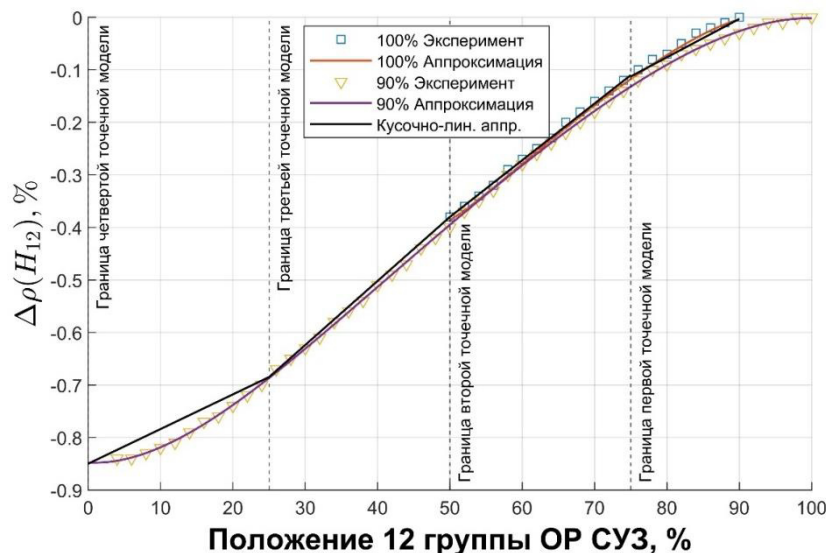


Рисунок 3. Аппроксимация значений интегральной эффективности 12 группы ОР СУЗ

Figure 3. Approximation of the group 12 of CPS CR integral worth

На рисунке 4 представлены результаты моделирования при полном вводе модели

(8) группы ОР СУЗ с 90% положения в течение 5000 секунд.

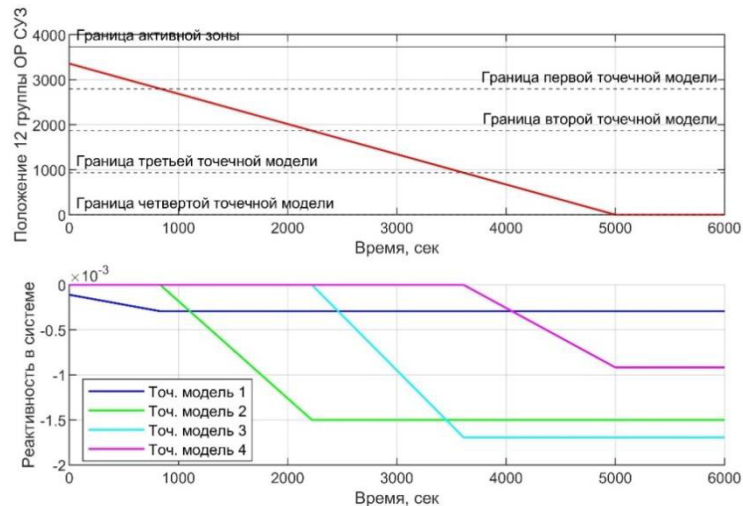


Рисунок 4. Поведение модели (8) 12 группы ОР СУЗ при полном введении в активную зону, состоящую из 4 аксиальных точек

Figure 4. The behavior of the model (8) of the group 12 of CPS CR while the full insertion to the reactor core consisting of 4 axial points

Значения реактивностей, внесенных в систему путем перемещения ОР СУЗ ρ_j^{tot} , полученные на основе экспериментальных данных, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Максимальное значение реактивности в системе при перемещении ОР СУЗ

Table 3. Maximum value of the reactivity in the system while moving the CPS CR

Число узлов	Значение реактивности, 10^{-2} / расположение точки, %										
	ρ_1^{tot}	ρ_2^{tot}	ρ_3^{tot}	ρ_4^{tot}	ρ_5^{tot}	ρ_6^{tot}	ρ_7^{tot}	ρ_8^{tot}	ρ_9^{tot}	ρ_{10}^{tot}	$\rho_{0.1h}$
2	-0.38 (50%)	-0.85 (0%)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.036
4	-0.11 (75%)	-0.38 (50%)	-0.685 (25%)	-0.85 (0%)	-	-	-	-	-	-	0.036
6	-0.052 (83.3%)	-0.2 (66.6%)	-0.38 (50%)	-0.58 (33.2%)	-0.77 (16.5%)	-0.85 (0%)	-	-	-	-	0.036
8	-0.02 (87.5%)	-0.11 (75%)	-0.24 (62.5%)	-0.38 (50%)	-0.53 (37.5%)	-0.68 (25%)	-0.8 (12.5%)	-0.85 (0%)	-	-	0.036
10	-0.003 (90%)	-0.07 (80%)	-0.16 (70%)	-0.27 (60%)	-0.38 (50%)	-0.51 (40%)	-0.62 (30%)	-0.74 (20%)	-0.82 (10%)	-0.85 (0%)	0.036

Результаты моделирования и выводы

Моделирование проводилось в среде MATLAB Simulink. Так как комбинация систем (7) и (8) представляет собой «жесткую» систему, то необходимо использовать численные алгоритмы, адаптированные под такой тип задач. В данной работе используется решатель ode15s – многшаговый метод переменного порядка (Variable Step, Variable Order, VSVO). Моделирование проводилось в два этапа:

1) первой производилась оценка влияния числа групп (1, 3, 6, 8) запаздывающих нейтронов на четырехточечной модели кинетики и выбиралось их оптимальное количество, результаты приведены в таблице 4.1 и на рисунке 5.1;

2) затем производилось моделирование с оптимальным количеством групп запаздывающих нейтронов на двух, четырех, шести, восьми и десятиточечной модели, результаты представлены в таблице 4.2 и на рисунке 5.2.

Тест состоял в моделировании перемещения модели 12 группы ОР СУЗ и разгрузки реактора с уровня мощности 100% до уровня мощности 85%.

Адекватность предложенных моделей оценивалась по метрикам MAE (Mean Absolute Error) и RMSE (Root Mean Squared Error) для значений мощности и аксиального оффета, которые определяются по формулам (9.1) и (9.2) соответственно:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{\text{мод}} - y_{\text{эсп}}| \quad (9.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{мод}} - y_{\text{эксп}})^2} \quad (9.2)$$

где $n = 8$ – число точек измерений;

$y_{\text{мод}}$ – результаты модели;

$y_{\text{эксп}}$ – результаты эксперимента с многофункционального тренажера.

Также важным является сравнение положения ОР СУЗ на тренажере в установившемся режиме при снижении мощности с данными, полученными в результате моделирования. Оценка производилась по отно-

сительной погрешности RE (Relative Error), определяемой формулой (9.3) соответственно:

$$RE = \frac{|y_{\text{эксп}} - y_{\text{мод}}|}{y_{\text{эксп}}} \quad (9.3)$$

где $y_{\text{эксп}}$ – результаты эксперимента с многофункционального тренажера (положение ОР СУЗ 60% на уровне мощности 85%);

$y_{\text{мод}}$ – положение ОР СУЗ по результатам моделирования.

Таблица 4.1. Результаты моделирования для четырехточечной модели кинетики с разным числом групп запаздывающих нейтронов (тест №1)

Table 4.1. The results of modelling for four-point kinetics approximation with different number of delayed neutron groups (test №1)

Модель	TRT, сек				MAE		RMSE		RE
	CPU1	CPU2	CPU3	CPU4	Axial offset	Power	Axial offset	Power	CPS CR
4 узла 1 группа запаздывающих нейтронов	0.3200	3.0723	0.6048	0.7038	3.0125	0	3.2895	0	0.213
4 узла 3 группы запаздывающих нейтронов	0.4328	3.5691	0.7266	0.9696	2.9838	0	3.2561	0	0.213
4 узла 6 групп запаздывающих нейтронов	0.6293	4.8407	1.2668	1.4826	2.9225	0	3.1959	0	0.213
4 узла 8 групп запаздывающих нейтронов	0.7524	5.2671	1.3642	1.7530	2.9200	0	3.1927	0	0.213

Таблица 4.2. Результаты моделирования для многоточечных моделей с различным числом аксиальных узлов (тест №2)

Table 4.2. The results of modelling for multipoint models with different number of axial nodes (test №2)

Модель	TRT, сек				MAE		RMSE		RE
	CPU1	CPU2	CPU3	CPU4	Axial offset	Power	Axial offset	Power	CPS CR
2 узла 3 группы запаздывающих нейтронов	0.1469	1.2881	0.5126	0.3386	4.8225	0	6.0251	0	0.856
4 узла 3 группы запаздывающих нейтронов	0.4328	3.5691	0.7266	0.9696	2.9838	0	3.2561	0	0.213
6 узлов 3 группы запаздывающих нейтронов	0.5813	4.9977	1.1942	1.5229	4.6363	0	5.2095	0	0.024
8 узлов 3 группы запаздывающих нейтронов	0.8270	6.0983	1.5366	1.9397	3.8384	0	4.5270	0	0.063
10 узлов 3 группы запаздывающих нейтронов	1.3762	7.3353	1.9844	2.6637	3.5946	0	4.2861	0	0.138

Дополнительно проводился замер времени моделирования в MATLAB с использованием функции tic-toc на различных ПК (Total Running Time, TRT). На основе результатов 5 запусков определялось среднее время и полученный результат заносился в таблицы 4.1

и 4.2. В таблицах 4.1 и 4.2 под CPU№1 следует понимать Intel Core i5-13500H (2.6 GHz), под CPU№2 понимать Intel Core i3 6006u (2.0 GHz), под CPU№3 понимать AMD Ryzen 5 5600H (3.3 GHz), и под CPU №4 понимать AMD Ryzen 5 1600 (3.2 GHz).

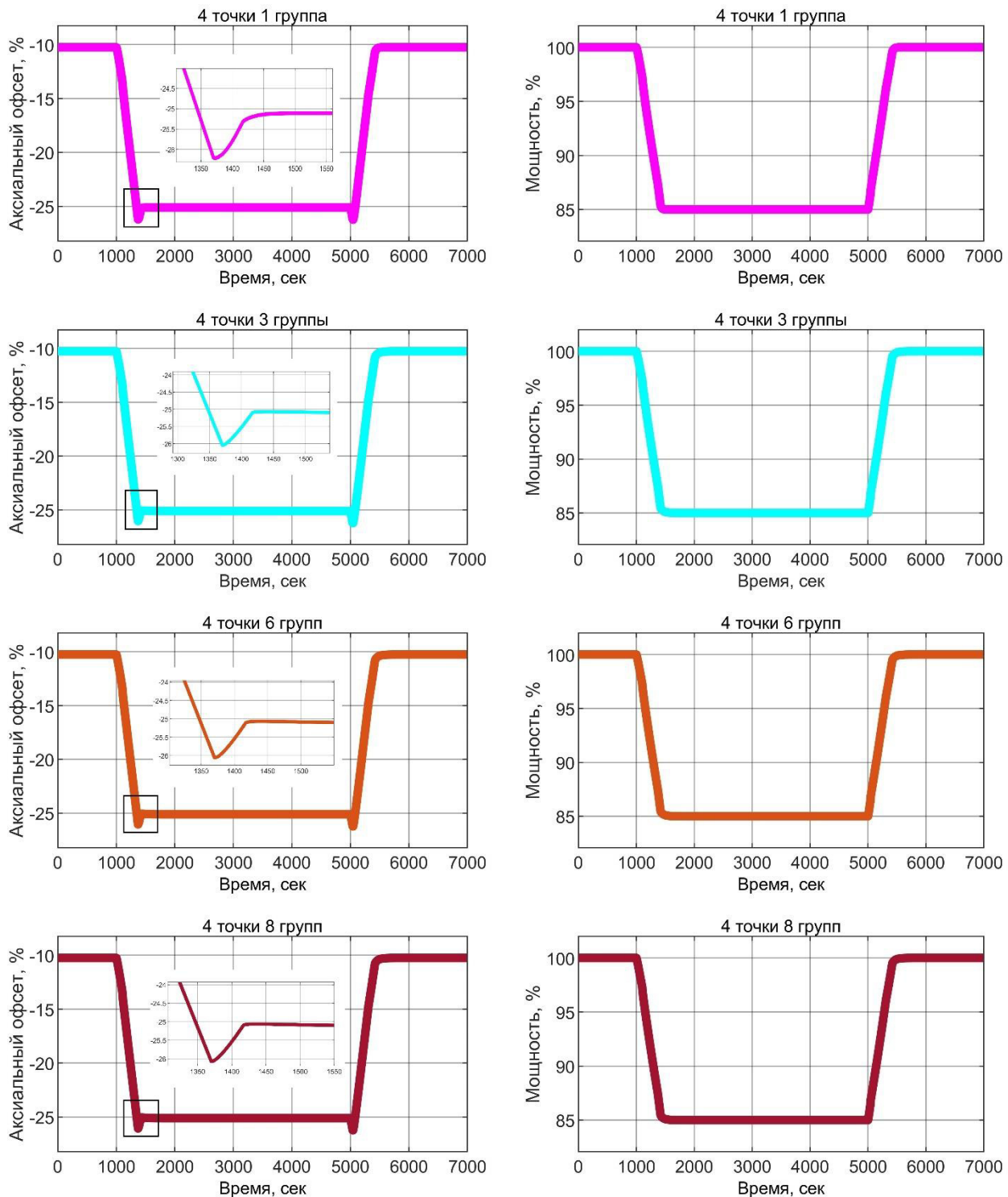


Рисунок 5.1. Значения мощности (справа) и аксиального офсета (слева) при различном числе групп запаздывающих нейтронов

Figure 5.1. Values of the power (right) and axial offset (left) for different number of delayed neutrons groups

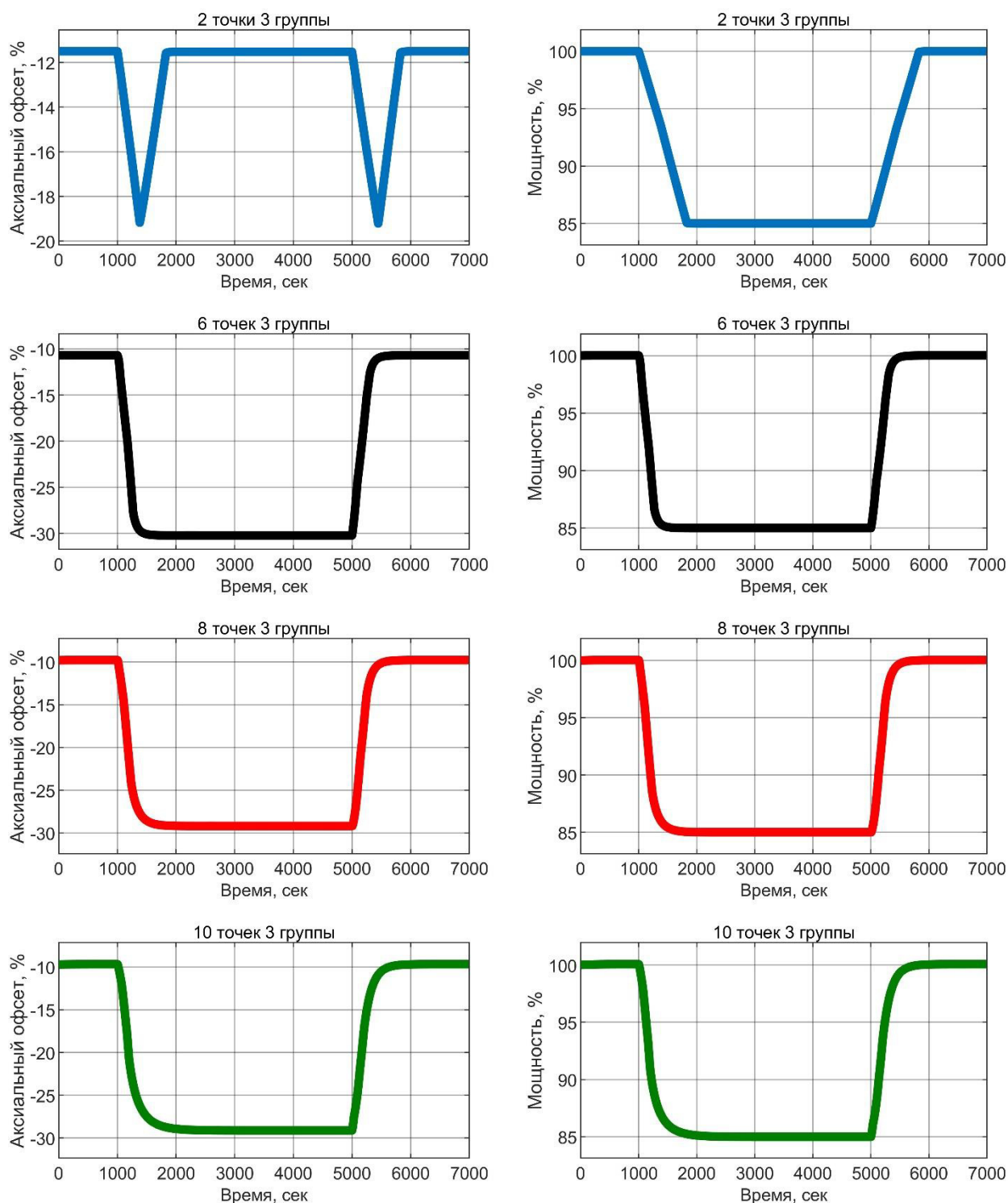


Рисунок 5.2. Значения мощности (справа) и аксиального офсета (слева) при различном числе аксиальных точек

Figure 5.2. Values of the power (right) and the axial offset (left) for different number of axial points

Исходя из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1) увеличение числа групп запаздывающих нейтронов приводит к более точным результатам в динамических режимах, однако значительно увеличивает время моделирования, поэтому 3 группы запаздывающих нейтронов можно считать оптимальным вариантом для моделирования переходных процессов;

2) увеличения числа точек в аксиальном направлении приводит к увеличению точности результатов моделирования, хотя оптимальным вариантом может быть выбрана модель, состоящая из 4 точек (наименьшие ошибки RMSE и MAE по аксиальному офсету). Дальнейшее увеличение нецелесообразно, так как значительно возрастает коэффициент взаимосвязи ω (для двух точек $\omega \sim 0.01$, для 8 $\omega \sim 0.16$, и для 10 $\omega \sim 0.25$), что вызывает перераспределение мощности между узлами еще до начала переходного процесса, а также не приводит к существенному увеличению точности моделирования аксиального офсета;

3) наиболее точное положение модели 12 группы ОР СУЗ было получено по результатам моделирования на шеститочечной модели ($RE=0.024$), однако отличие от восьмиточечной незначительно ($RE=0.063$). Использовать же двухточечную модель не рекомендуется в силу того, что присутствует значительное отклонение положения ОР СУЗ от экспериментального ($RE=0.856$).

Заключение

В данной работе предложена многоточечная модель реактора ВВЭР-1200, которая может быть использована при анализе переходных процессов и синтезе системы автоматического регулирования мощности, а также модель органов регулирования, полученная на основе кусочно-линейной аппроксимации экспериментальных данных интегральной эффективности 12 группы ОР СУЗ, которая может воздействовать на точечные модели последовательно при вводе. Исследовано влияние числа групп запаздывающих нейтронов на точность модели в динамических режимах и обосновано, что модель с 3 группами позволяет получать близкие к экспериментальным результаты, и при этом экономит время вычислений. Оптимальное число точек для моделирования режима следования за нагрузкой составляет 4.

Для дальнейшего улучшения точности расчетов возможно комбинировать предложенную модель с расширенной моделью теплогидравлических процессов Р. Манна, а также рассмотреть обратную связь по ксенону-135 для суточных маневренных режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Henry A. The application of reactor kinetics to the analysis of experiments. *Nuclear Science and Engineering*. 1958;3(1):52–70. <https://doi.org/10.13182/NSE58-1>
2. Соловьёв Д.А., Хачатрян А.Г., Чернов Е.В., Аль Малкави Р.Т. Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;2:37–48. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
- Soloviev D.A., Khachatryan A.G., Chernov E.V., Al Malkawi R.T. Investigation of Algorithms for Suppressing Xenon Oscillations in a VVER-1200 Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022;2:37–48. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
3. Avery R. Theory of coupled reactors. In: *Proc. 2nd UN Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy*, United Nations. 1958. Vol. 12. P. 182. <https://doi.org/10.2172/4315469>

4. Belleni-Morante A. The kinetic behaviour of a reactor composed of G loosely coupled cores: Integral formulation. *Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology*. 1964;18(10):547–559. [https://doi.org/10.1016/0368-3230\(64\)90139-9](https://doi.org/10.1016/0368-3230(64)90139-9)
5. Kobayashi K. Rigorous derivation of multi-point reactor kinetics equations with explicit dependence on perturbation. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1992;29(2):110–120. <https://doi.org/10.1080/18811248.1992.9731503>
6. Valocchi G., Tommasi J., Ravetto P. Reduced order models in reactor kinetics: A comparison between point kinetics and multipoint kinetics. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;147:107702. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107702>
7. Zhe Dong, Xiaojin Huang, Liangju Zhang A nodal dynamic model for control system design and simulation of an MHTGR core. *Nuclear Engineering and Design* 240 (240), 1251–261. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.032>
8. Wang P.F., Liu Y., Jiang B.T., Wan J.S., Zhao F.Y. Nodal dynamics modeling of AP1000 reactor for control system design and simulation. *Annals of Nuclear Energy*. 2013;62:208–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.05.036>
9. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Nodal models of Pressurized Water Reactor core for control purposes – A comparison study. *Nuclear Engineering and Design*. 2017;322:444–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.005>
10. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Multi-nodal PWR reactor model – Methodology proposition for power distribution coefficients calculation. *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. Poland: Miedzydroje, 2016. P. 385–390. <https://doi.org/10.1109/MMAR.2016.7575166>
11. Žerovnik G., Čalič D., Gerkišič S., Kromar M., Malec J., Mihelčič A., Trkov A., Snoj L. An overview of power reactor kinetics and control in load-following operation modes. *Frontiers in Energy Research*. 2023;11:1111357. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1111357>
12. Mousakazemi S.M.H. Control of a pressurized light-water nuclear reactor two-point kinetics model with the performance index-oriented PSO. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53(8):2556–2563 <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.018>
13. Zaidabadi nejad M., Ansarifard G.R. Adaptive robust control for axial offset in the P.W.R nuclear reactors based on the multipoint reactor model during load-following operation. *Annals of Nuclear Energy*. 2017;103:251–264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.01.025>
14. Aftab A., Luan X. A Takagi Sugeno based reactor power control of VVER-1000 using linear parameter varying identification of two-point kinetic model. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;140:103905. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103905>
15. Abdurraheem K.K., Tolokonsky A.O., Laidani Z. Adaptive second order sliding mode control for a pressurized water nuclear reactor in load following operation with Xenon oscillation suppression. *Nuclear Engineering and Design*. 2022;391:111742 <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111742>
16. Spriggs G.D., Campbell J.M., Piksaikin V.M. An 8-group delayed neutron model based on a consistent set of half-lives. *Progress in Nuclear Energy*. 2002;41(1-4):223–251. [https://doi.org/10.1016/s0149-1970\(02\)00013-6](https://doi.org/10.1016/s0149-1970(02)00013-6)
17. Skinner R.E., Cohen E.R. Reduced Delayed Neutron Group Representations. *Nuclear Science and Engineering*. 1959;5(5):291–298. <https://doi.org/10.13182/NSE59-A25601>
18. Вольман М.А. Имитационное моделирование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР-1000. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации*. Москва, 2017. 135 с. EDN NTLFZT. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008925788> (дата обращения: 10.04.2024).
- Volman M.A. Imitacionnoe modelirovanie nejtronno-fizicheskikh i teplogidravlicheskih processov v reaktorakh VVEHR-1000. *Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk po special'nosti 05.14.03 Yadernye ehnergeticheskie ustanovki, vklyuchaya proektirovanie, ehkspluatatsiyu i vyvod iz ehkspluatatsii*. Moscow, 2017. 135 p. EDN NTLFZT. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008925788> (accessed: 10.04.2024).
19. Казанский Ю.А., Слекенич Я.В. Мощностной коэффициент реактивности: определение, связь с коэффициентами реактивности, оценка результатов переходных процессов энергетических реакторов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2018;1:63–74. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.07>

Kazansky Yu.A., Slekenichs Ya.V. Power coefficient of reactivity used for assessing the results of transients in power reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018;1:63–74. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.07>

20. Правосуд С.С., Маслаков Д. С., Якубов Я. О., Овчеренко А.А. Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя. *Глобальная Ядерная Безопасность*. 2023;13(3):82–95. EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

Pravosud S.S., Maslakov D.S., Yakubov Ya.O., Ovcherenko A.A. Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit adjacent to two coolant units. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(3):82–95 (In Russ.). EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

21. Правосуд С.С., Маслаков Д.С., Якубов Я.О. Применение нечетких регуляторов для управления мощностью ядерного реактора ВВЭР-1200. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2024;13(2):97-109. EDN: QBFVFE. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2024.320>

Pravosud S., Maslakov D., Yakubov Ya. An application of fuzzy logic controllers for power control of the VVER-1200 nuclear reactor. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2024;13(2):97-109 (In Russ.). EDN: QBFVFE. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2024.320>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Правосуд С.С. – постановка задачи и руководство работой, разработка методологии исследования, анализ литературных источников, работа на тренажёре, обработка экспериментальных данных, моделирование, верификация и оформление результатов, написание работы;

Якубов Я. О. – анализ литературы, написание скриптов;

Сусакин В.А. – анализ литературы, написание скриптов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Pravosud S.S. – problem statement and supervision, development of the research methodology, literature review, working on the simulator, experimental data proceeding, scripts' writing, results verification, and their visualization, writing of the original paper.

Yakubov. Ya.O. – literature review, scripts' writing;

Susakin V.A. – literature review, scripts' writing.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Сергеевич Правосуд, инженер по подготовке персонала 1 категории учебно-методического центра «Ядерная и радиационная безопасность» АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл.; преподаватель кафедры «Электроника и автоматика физических установок» СТИ НИЯУ «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPravosud@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergei S. Pravosud, First category engineer for personnel training of the Educational and Methodological Centre of Nuclear and Radiation Safety at Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation; Instructor of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPra-vosud@mephi.ru

Ярослав Олегович Якубов, студент кафедры «Электроника и автоматика физических установок», Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3461-0476>

e-mail: yarik.tomsk@yandex.ru

Владислав Александрович Сусакин, студент кафедры «Машины и аппараты химических и атомных производств», Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2492-3186>

e-mail: bvp8ee6k@gmail.com

Yaroslav O. Yakubov, student of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3461-0476>

e-mail: yarik.tomsk@yandex.ru

Vladislav A. Susakin, student of the Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Atomic Enterprises, Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2492-3186>

e-mail: bvp8ee6k@gmail.com

Поступила в редакцию 28.04.2024

После доработки 31.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Received 28.04.2024

Revision 31.05.2024

Accepted 04.06.2024