

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-07>

EDN VWHSHX

Оригинальная статья / Original paper



Обзор нейтронно-физических результатов радиального профилирования на примере элементарной ячейки реактора типа ВВЭР-1200

М.А. Попов , Р.А. Внуков , В.В. Колесов 

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

✉ maksim.popovf@yandex.ru

Аннотация. Для увеличения длительности эксплуатации твэлов в ядерном реакторе необходимо создать запас предельного срока службы топливных и конструкционных материалов. В данной работе на примере элементарной ячейки реактора ВВЭР-1200 в бесконечной размножающей среде рассмотрены различные способы снижения радиальной неравномерности выгорания твэлов путем перераспределения делящихся ядер (профилирования): для проведения профилирования топливная таблетка разбивалась на различное количество концентрических слоев, обогащения которых варьировались при сохранении суммарного числа делящихся ядер в топливной таблетке на начало топливной кампании. В ПК Serpent 2 выполнены нейтронно-физические расчеты соответствующих моделей, после чего было проведено сравнение полученных для них характеристик: коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде, среднего темпа потери реактивности, доли запаздывающих нейтронов на начало кампании, радиальных распределений выгораний и энерговыделений (в различные моменты времени), изменения эффектов реактивности после профилирования. Результатом данной работы является подобранный оптимальный метод снижения выгорания на периферии топливной таблетки за счет повышения обогащения в центральной части топливной таблетки и, как следствие, более равномерный профиль выгорания в целом по таблетке. Показано, что в результате проведенных преобразований не происходит изменения нейтронно-физических характеристик. Возможная проблема при использовании указанного метода профилирования может состоять в возрастании температуры периферийного слоя в результате значительного возрастания энерговыделения в нем с течением топливной кампании.

Ключевые слова: радиальное профилирование, оптимизация, ВВЭР-1200, твэл, топливная таблетка, выгорание, неравномерность, продление кампании, обогащение.

Для цитирования: Попов М.А., Внуков Р.А., Колесов В.В. Обзор нейтронно-физических результатов радиального профилирования на примере элементарной ячейки реактора типа ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):77–92. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-07>

For citation: Popov M.A., Vnukov R.A., Kolesov V.V. Review of the neutron physics results of radial profiling using the example of a VVER-1200 reactor unit cell. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):77–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-07>

Review of the neutron physics results of radial profiling using the example of a VVER-1200 reactor unit cell

Maksim A. Popov , Ruslan A. Vnukov , Valeriy V. Kolesov 

Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

✉ maksim.popovf@yandex.ru

Abstract. It is necessary to create a reserve of the maximum service life of fuel and structural materials to increase the service life of fuel rods in a nuclear reactor. This paper considers various methods of reducing the radial unevenness of fuel element burnup by redistributing fissionable nuclei (profiling) using the example of the unit cell of the VVER-1200 reactor in the infinite breeding medium. The fuel pellet is divided into a different number of concentric layers to be profiled, the enrichment of the layers varies while maintaining the total number of fissile nuclei in the fuel pellet at the

beginning of the fuel campaign. In the Serpent 2 PC, neutron physics calculations of the corresponding models are performed, after that the characteristics obtained for them are compared: the infinite multiplication factor, the average rate of reactivity loss, the proportion of delayed neutrons at the beginning of the campaign, radial burnup profile and energy release distributions (at different time points), and changes in reactivity effects after profiling. The result of this work is a selected optimal method to reduce burnup on the fuel pellet periphery by increasing enrichment in the central part of the fuel pellet and, as a result, a more uniform burnup profile in the whole of the tablet. The research shows that there is no change in the neutron-physical characteristics as a result of the transformations carried out. A possible problem when using this profiling method may be an increase in the peripheral layer temperature as a result of a significant increase in energy release in it during the fuel campaign.

Keywords: radial profiling, optimization, VVER-1200, fuel element, fuel pellet, burnout, unevenness, prolongation of the campaign, enrichment.

Введение

Один из путей улучшения технико-экономических показателей реакторных установок – увеличение степени выгорания топлива. На текущий момент данная задача в основном решается за счет повышения обогащения топлива по делящимся изотопам и его более длительной выдержки в активной зоне, либо за счет использования выгорающих поглотителей [1].

Поскольку доступные запасы урана потенциально являются ограниченными, имеет смысл искать пути увеличения длительности топливной кампании при тех же теплотехнических запасах [2]. Например, каким-либо образом перераспределять делящиеся ядра по объему топливного сердечника из каких-либо соображений с целью их более эффективного использования в ядерном реакторе (далее в данной работе такое перераспределение будем называть профилированием).

Подходы к профилированию топлива могут быть различны. К примеру, оно может производиться «по потоку» или «по выгоранию», то есть исходя из неравномерностей распределения по топливному стержню потока нейтронов или выгорания [3]. Определять требуемый подход следует исходя из тех целей, которые требуется достичь.

Предел выгорания топлива в ядерном реакторе достигается, когда безопасная работа реактора больше не может быть гарантирована, а также когда эффективное производство тепла больше не может поддерживаться. Так, с увеличением длительности выдержки топлива в ядерном реакторе вследствие различных факторов происходит его набухание, в результате чего увеличивается пористость топливных таблеток, газо-

образные продукты деления выходят в газовый зазор, в результате чего снижается теплопроводность непосредственно топлива и газового зазора [1,4–5].

Особенно заметно происходит набухание топлива в периферийном слое топливного сердечника. В результате высокого потока быстрых нейтронов на периферии значительно чаще протекает реакция резонансного захвата $^{238}_{92}\text{U}(n, \gamma)^{239}_{92}\text{U}$, и, как следствие, образуется значительно больше ^{239}Pu (по сравнению с центральным слоем), который, как и ^{235}U , является делящимся изотопом. В результате, например, в топливных таблетках из диоксида урана в тепловых реакторах при среднем выгорании по таблетке порядка 40 МВт·сут/кг при движении к периферии происходит экспоненциальный рост выгорания, причем на периферии оно отличается от среднего значения примерно в 2,5 раза [1,6].

Кроме набухания топливных таблеток и снижения теплофизических характеристик, высокое выгорание на периферии топливного сердечника приводит к усиленному коррозионному воздействию на оболочку ТВЭЛ [7], в результате чего в том числе ускоряется ее гидрирование. Описанные воздействия приводят к ухудшению механических свойств оболочки (в частности, к ее охрупчиванию).

Для борьбы с избыточным выгоранием на периферии в основном предлагают использовать радиальное профилирование ТВЭЛов по выгоранию: предполагается создание топливной таблетки, разбитой на несколько концентрических слоев, обогащение в которых снижается по мере удаления от центра, совместно с добавлением в периферийный слой выгорающего поглотителя [8] или без

него [1,4]. Хотя в данных работах говорится о снижении выгорания на периферии, при этом не исследовано влияние профилирования на температуру топлива, а также на изменение коэффициента размножения нейтронов (за счет чего также может быть достигнуто изменение длины топливной кампании).

Практически процедура радиального профилирования представляет собой один из вариантов нанесения пленочных покрытий. Тонкопленочные оксидные покрытия нашли свое применение в области микроэлектроники и оптики [9]. В ядерной технике имеется ряд патентов, посвященных созданию покрытий, прежде всего, поглотителей, на слое топлива [10–12]. Описываемые процедуры связаны с нанесением на цилиндрическую форму покрытия из поглотителя, и их распространение в перспективе может привести к частичному изменению конструкции существующих твэгов [10]. Кроме того, известно применение ПИУ-покрытия с двумя пироуглеродными слоями и разработки более сложных четырехслойных ПИУК-покрытий для уменьшения диффузии и миграции топлива при высоких температурах в реакторах с микротвэлами [13].

На текущий момент в промышленности, в том числе и в ядерной энергетике, для получения покрытий из тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов и т. д.) в основном используется процесс газофазного

осаждения: при осаждении тугоплавких соединений нашли применение парогазовые смеси галогенидов металлов и соединений, являющихся поставщиком второго компонента, а также газа-транспортера. Данный способ, в том числе, принимается во внимание при разработке новых перспективных видов ядерного топлива, поскольку активно исследуются возможности использования более теплопроводных материалов, чем диоксид урана [14]. С учетом накопленного опыта изготовления топлива (сферической, цилиндрической и иной [11] формы) профилирование путем нанесения на поверхности топливных таблеток оксидных порошков урана представляется практически осуществимым.

В данной работе на примере элементарной ячейки реактора ВВЭР-1200 рассматривается возможный способ снижения выгорания топлива на периферии твэла с целью увеличения длительности топливной кампании.

Расчетная модель

Для решения поставленной задачи в программном комплексе Serpent 2 [15] была смоделирована элементарная ячейка реактора ВВЭР-1200 [16] в бесконечной размножающей среде (с заданием граничных условий на отражение вылетающих нейтронов) в нескольких вариациях (см. рисунок 1):

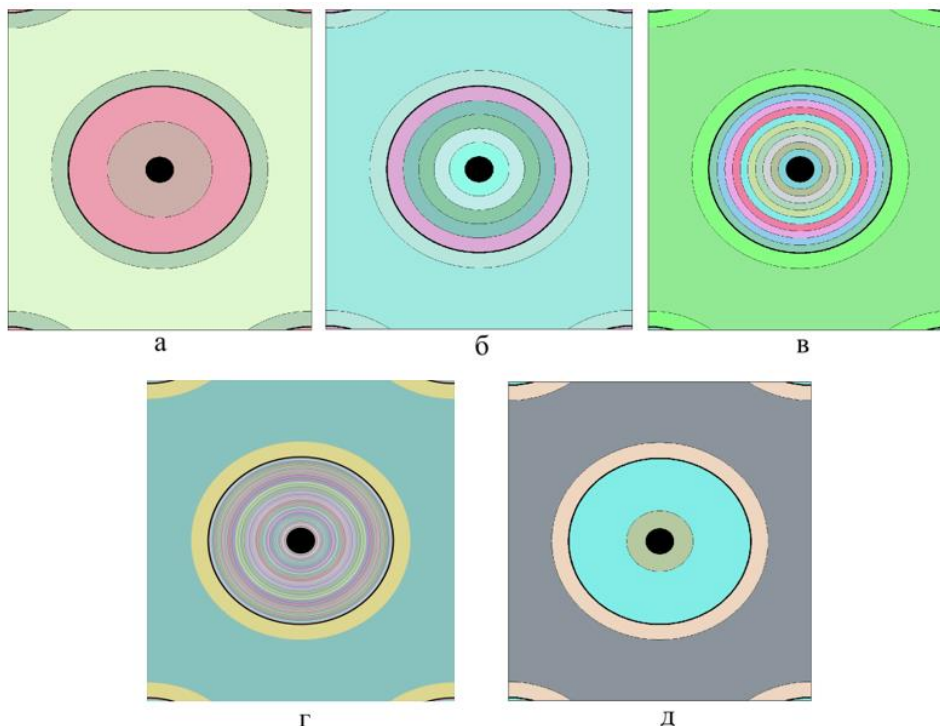


Рисунок 1. Поперечные срезы твэлов из различных моделей: а – модель 2 (2 слоя); б – модель 2 (5 слоев); в – модель 2 (10 слоев); г – модель 2 (200 слоев); д – модель 3 (2 слоя)

Figure 1. Cross sections of fuel rods from various models: а – model 2 (2 layers); б – model 2 (5 layers); в – model 2 (10 layers); г – model 2 (200 layers); д – model 3 (2 layers)

Ниже приведено описание моделей, использующихся для расчетов в данной работе:

1. Нет разбиения топливной таблетки на слои, равномерное обогащение топлива, составляющее 4.95% (далее – базовая модель).

2. Разбиение топливной таблетки на 2, 5, 10 и 200 концентрических слоев одинаковой толщины, изначально имеющих равномерное обогащение 4.95% (далее – модель 2).

После получения радиального профиля выгорания в модели 2 производилось профилирование: по полученным значениям выгорания в каждом i -м слое производился расчет поправочных коэффициентов к обогащению в данном слое на $(j + 1)$ -й итерации:

$$a_i^j = \frac{\langle b^j \rangle}{b_i^j}, \quad (1)$$

где b_i^j – выгорание в i -м слое на j -й итерации, $\langle b^j \rangle$ – среднее выгорание по радиусу топливной таблетки на j -й итерации.

Далее рассчитывалось обогащение в каждом i -м слое на $(j + 1)$ -й итерации:

$$x_i^{j+1} = a_i^j \cdot x_i^j, \quad (2)$$

В результате данной манипуляции суммарное число делящихся ядер (предполагалось, что на начальный момент времени из делящихся ядер имеется только ^{235}U) в топливной таблетке может измениться. Для того чтобы этого не происходило, также рассчитывались поправочные коэффициенты, на которые умножалось обогащение, рассчитанное по формуле (2):

$$k^j = \frac{N_0}{N_j}, \quad (3)$$

где N_0 – число делящихся ядер в топливной таблетке до профилирования,

N_j – получившееся после умножения обогащений на коэффициенты a_i^j число делящихся ядер.

Итерационный процесс профилирования производился до тех пор, пока не было выполнено условие остановки: изменение всех отслеживаемых параметров между j -й и $(j + 1)$ -й итерацией должно быть меньше 3σ по данному параметру.

3. Топливная таблетка разбивалась на 2 концентрических слоя, размеры которых и

обогащение топлива, в которых варьировались. Радиус границы между слоями варьировался от 0.087 см до 0.353 см с шагом 0.027 см, обогащение в ближнем к центру таблетки слое – от 1.00% до 6.40% с шагом 0.60% (далее – модель 3; в периферийном слое обогащение подбиралось таким образом, чтобы суммарное число ядер оставалось неизменным относительно базовой модели). Таким образом, если в модели 2 изменялось количество слоев, то в модели 3 при неизменности количества (2 слоя) параметрами являлись объемные доли слоев и их обогащение.

Во всех рассматриваемых моделях исходные геометрические размеры топливной таблетки оставались неизменными.

Задавался режим выгорания топлива при заданной плотности мощности 0.04 кВт/г. Время выгорания – 4 микрокампаний (каждая микрокампания составляет порядка 1 года), что эквивалентно 50 МВт·сут/кг. На каждом шаге снимались следующие величины: коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде ($K_{\text{беск}}$), доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{\text{эфф}}$), выгорание топлива, мощность делений, коэффициент воспроизводства, концентрации отдельных нуклидов в каждом радиальном слое.

Также для всех моделей отслеживались эффекты реактивности: плотностной, эффект реактивности по температуре топлива при наличии теплоносителя, эффект реактивности по температуре топлива в отсутствии теплоносителя.

Расчеты в ПК Serpent производились с использованием библиотеки ядерных данных JEFF-3.1.1 [17].

Результаты каждой модели сравниваются с характеристиками базовой версии.

Результаты и обсуждение

1. Базовая модель.

Поскольку базовую модель мы далее будем сравнивать с другими моделями в контексте профилирования по выгоранию, ниже приводятся основные характеристики, в соответствие с которыми это сравнение, собственно, производится.

а) Зависимость $K_{\text{беск}}$ от времени.

Зависимость $K_{\text{беск}}$ от времени с учетом погрешности 3σ приведена на рисунке 2. Из полученного графика видно, что выбранная для данного расчета статистика нейтронов более чем достаточна для рассмотрения данной задачи.

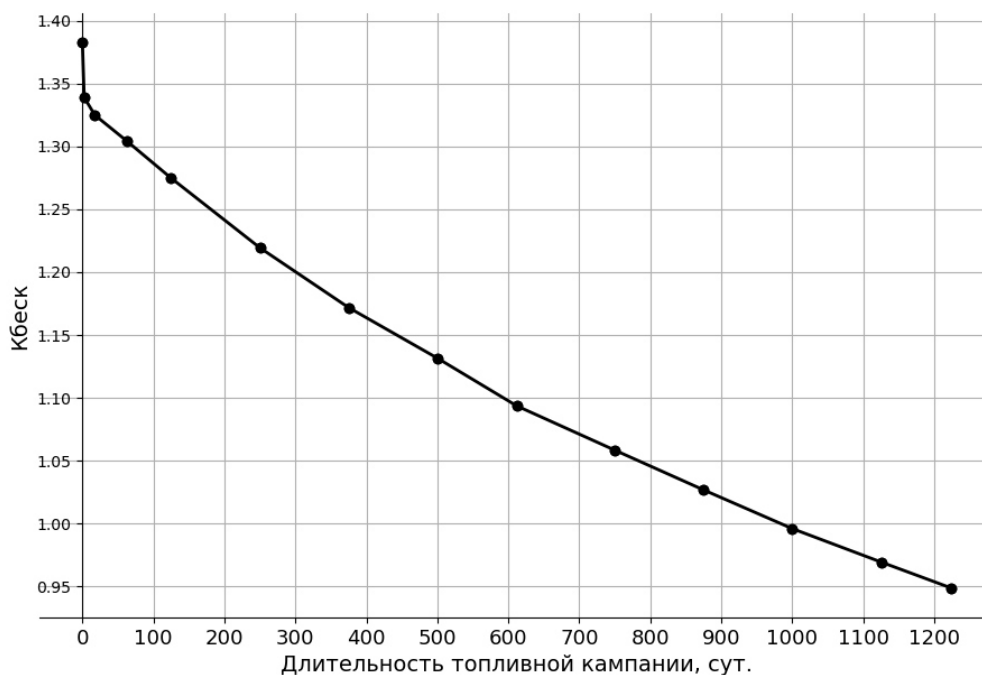


Рисунок 2. Зависимость $K_{\text{беск}}(t)$ для базовой модели
 Figure 2. Dependence on $K_{\text{inf}}(t)$ for the basic model

Первые шаги выгорания были выбраны относительно малыми для учета ксенонового отравления [18]. В дальнейшем происходило их увеличение до 5 МВт·сут/кг ближе к середине первой микрокампании, после этого шаг выгорания не изменялся.

Начальное быстрое снижение $K_{\text{беск}}$ объясняется накоплением ксенона и выходом его концентрации на стационарную.

Для сравнения моделей между собой далее будем использовать среднее значение $K_{\text{беск}}$ и средний тангенс угла наклона кривой $K_{\text{беск}}$ (т. н. средний темп потери реактивности).

Среднее значение будем вычислять по величинам $K_{\text{беск}}$ на конец каждой из 4-х микрокампаний:

$$\langle K_{\text{беск}} \rangle = \frac{K_{\text{беск}1}^{\text{кон}} + K_{\text{беск}2}^{\text{кон}} + K_{\text{беск}3}^{\text{кон}} + K_{\text{беск}4}^{\text{кон}}}{4} = 1.0434$$

Средний темп потери реактивности будем определять как разность между значениями $K_{\text{беск}}$ на начало и на конец кампании, отнесенную к длине топливной кампании:

$$T_{\text{пот}} = \frac{K_{\text{беск}}^{\text{нач}} - K_{\text{беск}}^{\text{кон}}}{t_{\text{max}}} = 3.55 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$$

б) Радиальный профиль энерговыделения.

Для получения распределения энерговыделений по топливной таблетке смоделированная в ПК Serpent элементарная ячейка разбивалась на 40000 точек, в каждой из которых при расчете соответствующего шага выгорания снималась величина энерговыделения.

На рисунке 3 приведены тепловые карты распределения энерговыделений относительно среднего по таблетке значения, соответствующие началу и концу кампании, причем «температура» каждой точки определяется величиной $\ln^3 \left(1 + \frac{E}{\langle E \rangle} \right)$, где E – энерговыделение в данной точке, $\langle E \rangle$ – среднее энерговыделение по топливной таблетке. Такой вид зависимости был подобран произвольно для наибольшей контрастности. Чем более красной является точка на тепловой карте, тем большее в ней энерговыделение относительно средней величины, чем более синяя – тем меньшее.

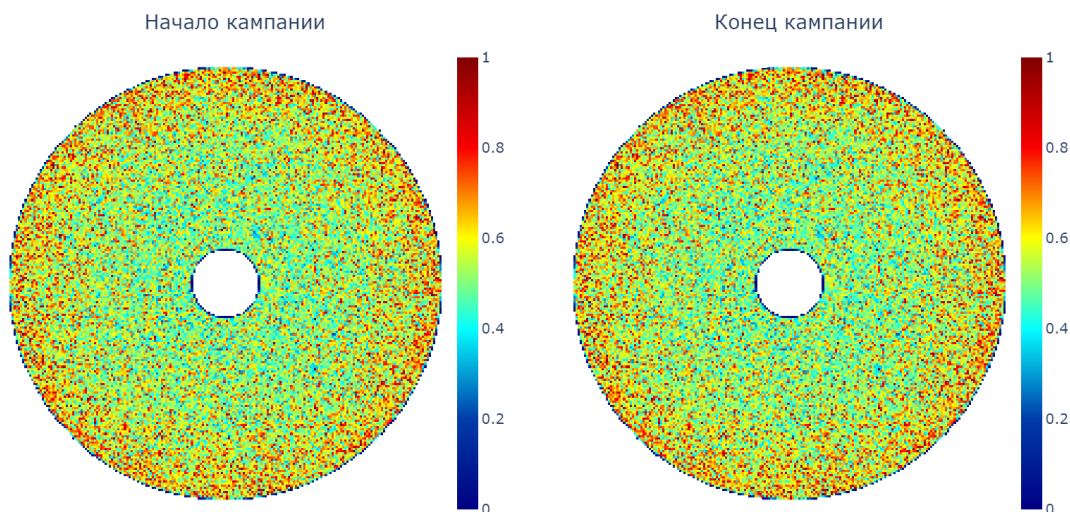


Рисунок 3. Радиальные зависимости энерговыделения (в отн. ед.) на начало и конец кампании для базовой модели

Figure 3. Radial dependences of energy release (in relative units) at the beginning and end of the campaign for the basic model

Как можно заметить, для базовой модели что в начале, что в конце кампании энерговыделение распределено по топливной таблетке практически равномерно, при этом на

периферии выделяется несколько больше энергии, что в основном объясняется более частым по сравнению с центральной частью делением ядер ^{239}Pu .

Из рисунка 3 можно увидеть, что на конец кампании энерговыделение на периферии топливной таблетки повышается (средняя по таблетке величина при этом остается неизменной).

2. Модель 2.

В результате нейтронно-физического расчета были получены радиальные зависимо-

сти выгорания топлива при разбиении таблетки на 2, 5, 10, 200 слоев.

Выравнивание выгорания для всех рассматриваемых вариантов модели 2 производилось согласно методике, описанной выше (см. пп. расчетная модель). В таблице 1 приведено сравнение нейтронно-физических характеристик рассматриваемых вариантов до и после профилирования.

Таблица 1. Результаты нейтронно-физических расчетов для моделей до и после профилирования
Table 1. Results of neutron physics calculations for models before and after profiling

Характеристика	Базовая модель	Кол-во слоев	1	2	3	4
Изменение $\langle K_{\text{беск}} \rangle$ относительно базовой модели, %	$0 (1.0434 \pm 0.0006)$	2 слоя	0.03	0.01	0.01	-0.01
		5 слоев	0.01	-0.02	0.02	-
		10 слоев	0.00	-0.03	-	-
		200 слоев	-0.01	-0.06	-	-
Изменение среднего темпа потери реактивности относительно базовой модели, %	$0 ((3.55 \pm 0.02) \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1})$	2 слоя	0.19	-0.07	0.14	-0.05
		5 слоев	0.17	-0.01	-0.28	-
		10 слоев	-0.14	0.15	-	-
		200 слоев	-0.13	0.18	-	-
Изменение $\beta_{\text{эфф}}$ на начало кампании относительно базовой модели, %	$0 ((7.116 \pm 0.127) \cdot 10^{-3})$	2 слоя	3.66	-0.98	-2.80	-2.46
		5 слоев	0.17	-2.01	-2.84	-
		10 слоев	-0.30	-1.78	-	-
		200 слоев	-0.02	1.32	-	-

Как видно из таблицы 1, в модели 2 с 2-мя слоями итерационный процесс останавливается на 4-ой итерации, с 5-ю слоями – на 3-ей итерации, с 10-ю и 200-ми слоями – на 2-ой итерации. С каждой итерацией нерав-

номерность выгорания ядерного топлива снижается, причем с увеличением номера итерации скорость ее снижения также уменьшается.

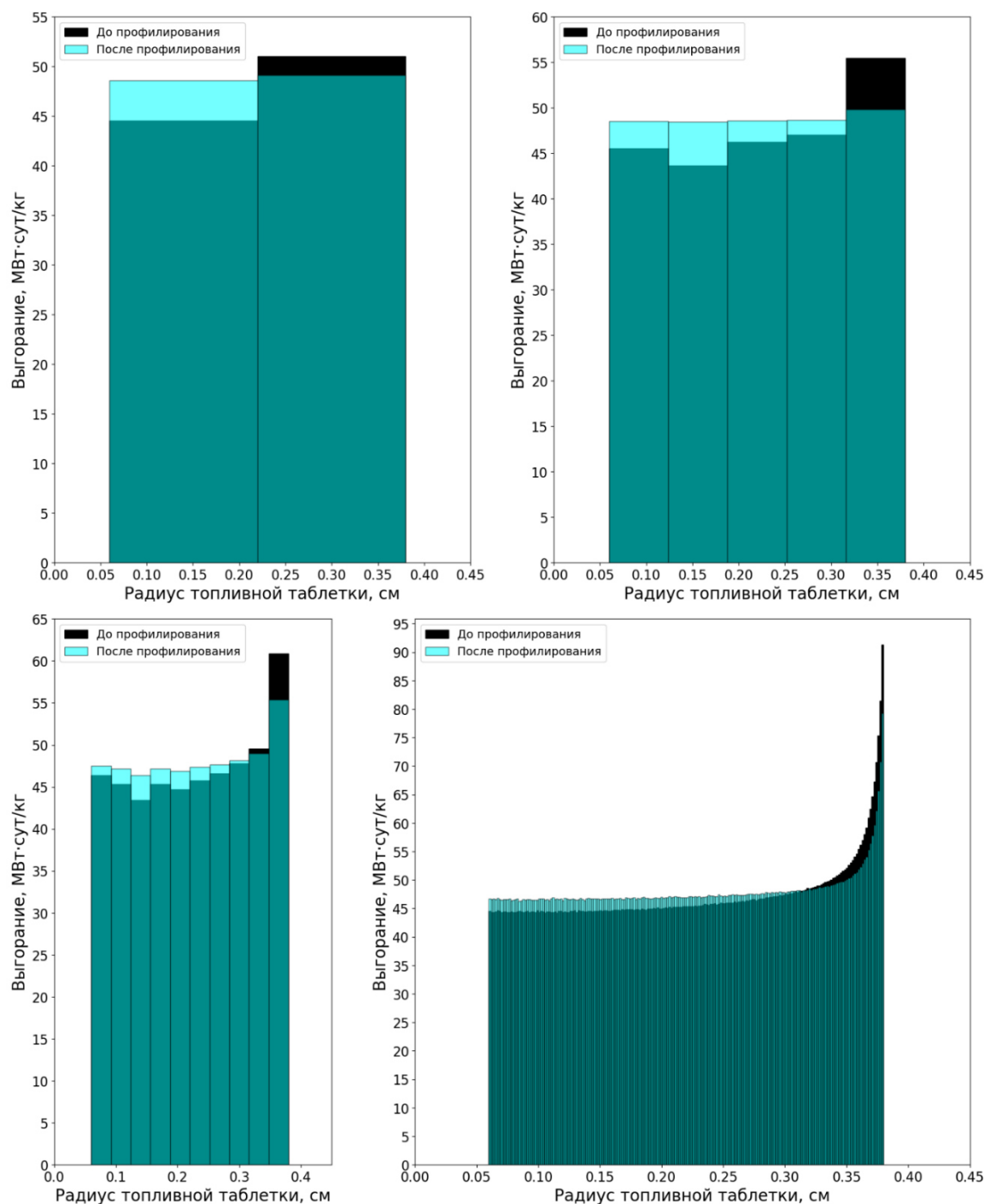


Рисунок 4. Сравнение радиальных профилей выгорания для топливной таблетки (модели 2а, 2б, 2в, 2г) до и после профилирования

Figure 4. Comparison of radial burnup profiles for fuel pellets (models 2a, 2b, 2c, 2d) before and after profiling

Среди рассчитанных профилированных моделей определялись наиболее оптимальные: так как в данном исследовании ставится цель найти пути увеличения срока службы твэлов в ядерном реакторе, то в результате процедуры профилирования не должны ухудшаться размножающие свойства среды.

Доля запаздывающих нейтронов на начало кампании при выборе оптимальных моделей не учитывалась ввиду незначительности ее изменения (при статистической погрешности 1.78%) она далее не принимается во внимание. Объясняется это тем, что изменение изотопного состава при выгорании (прежде всего, образование плутония) вносит более существенный вклад в изменение

доли запаздывающих нейтронов (с выгоранием она снижается до диапазона 0.4–0.5, то есть уменьшается в 1.3–1.6 раза).

Из рисунка 4 видно, что распределение выгорания по радиусу топливной таблетки имеет экспоненциальный характер, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными [6].

Уменьшение коэффициента неравномерности выгорания (отношение максимального выгорания в некотором i -м слое к среднему выгоранию по топливной таблетке) по ТВЭЛУ для разных вариантов составило: для 2-х слоев – 3.93%, для 5-и слоев – 11.50%, для 10-и слоев – 11.22%, для 200-а слоев – 24.48%. Безусловно, если детализировать модель и на большее количество слоев, фактор снижения неравномерности выгорания может быть более заметен, в данном аспекте важна качественная демонстрация результата.

Изменений в величинах КВ, а также в числе нарабатываемых ядер рассматриваемых нуклидов (в сумме по всей топливной таблетке) не обнаружено.

Поскольку практическое применение топливной таблетки, разбитой, к примеру, на

200 слоев, затруднительно из-за значительного увеличения длительности изготовления отдельной топливной таблетки и ее удорожания ввиду сложности возможных технологий изготовления [14,19], отдельно рассматривался следующий вариант: все слои в профилированной модели 2г, где выгорание ниже или равно среднему, были объединены в единый слой с обогащением, равным среднему для данных слоев. Для рассматриваемой модели это первые 173 слоя (если считать от центра топливной таблетки). Остальные (более близкие к периферии слои) задавались, как и ранее, как отдельные слои (далее – упрощенная модель).

Для того чтобы в результате сделанного упрощения число делящихся ядер в топливной таблетке не изменилось, также были рассчитаны поправочные коэффициенты подобно формуле (3), на которые умножалось обогащение.

Для упрощенной модели рассчитывались все те же характеристики, что и для самой модели 2.

На рисунке 5 приведено сравнение радиальных профилей выгорания модели 2г и упрощенной модели.

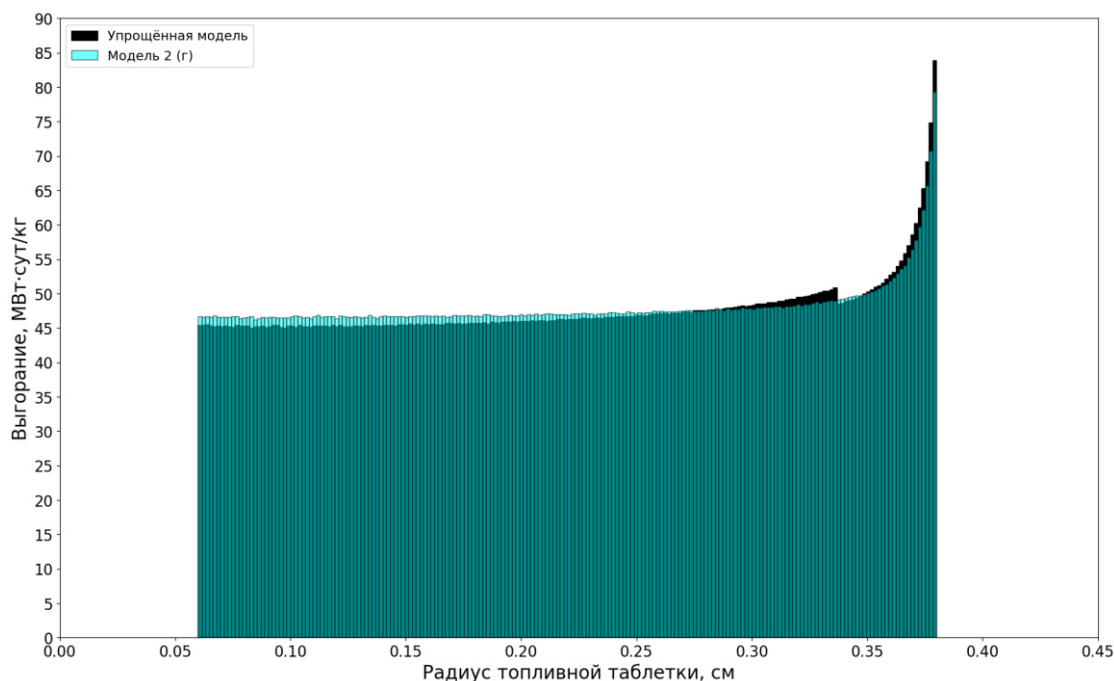


Рисунок 5. Сравнение радиальных профилей выгорания модели 2г и упрощенной модели
Figure 5. Comparison of radial burnout profiles of the 2d model and the simplified model

Как можно заметить, в результате описанного упрощения неравномерность выгорания несколько вырастает относительно модели 2г, но при этом также остается сниженной относительно базовой модели (на 15.03%).

Кроме того, из полученных для упрощенной модели результатов следует, что ее нейтронно-физические характеристики в пределах статистической погрешности совпадают с аналогичными характеристиками для модели 2г.

Как можно увидеть из рисунка 6, в результате профилирования повышается неравномерность энерговыделения в начале, и в конце топливной кампании (причем идентично для моделей 2г и упрощенной). В промежуточных точках энерговыделение по таблетке потенциально должно оказаться более близким к среднему значению, причем сниженным относительно базовой модели. Коэффициент неравномерности энерговыделения на начало кампании для моделей 2г и упрощенной составил соответственно 1.48 и 1.47 (для базовой модели – 1.48), на конец

кампании – 2.53 для обеих моделей (по сравнению с 2.54).

При этом, хотя коэффициенты неравномерности энерговыделения остаются неизменными, к концу кампании в результате профилирования фокус энерговыделения смещается на периферию (в то время, как в базовой модели распределение более равномерное).

При разбиении топливной таблетки на меньшее число слоев (модели 2а – 2в) в начале кампании энерговыделение будет происходить в основном в центральных слоях, в конце – в периферийных.

Влияние разницы в энерговыделениях в профилированных версиях на градиент температур и другие физические характеристики топлива необходимо рассмотреть в перспективе данной работы.

3. Модель 3.

Всего было рассчитано 10 подмоделей. Радиус границы между слоями, обогащения для соответствующих моделей, а также сравнение их нейтронно-физических характеристик приведены в таблице 2.

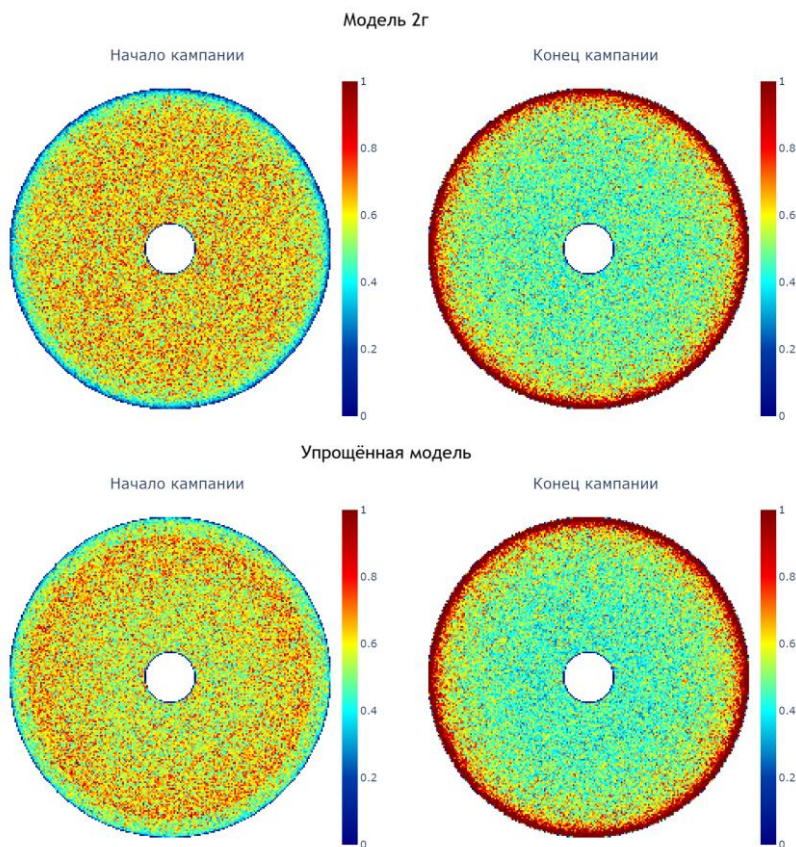


Рисунок 6. Радиальное распределение энерговыделений (в отн. ед.) для модели 2г и упрощенной модели
Figure 6. Radial distribution of energy emissions (in relative units) for the 2d model and the simplified model

Таблица 2. Результаты нейтронно-физических расчетов различных вариантов модели 3**Table 2.** The results of neutron physics calculations of various variants of the model 3

Модель	Радиус границы между слоями, см	Обогащение слоя, %		Выгорание в слое, МВт·сут./кг		$\langle K_{\text{беск}} \rangle$	Средний темп потери реактивности, 10^{-4} сут^{-1}	$\beta_{\text{эфф}}$ на начало кампании
		Центр.	Периф.	Центр.	Периф.			
3а	0.0867	1.00	5.07	23.23	49.70	1.0438	3.56	0.007037
3б	0.1133	1.60	5.19	26.46	50.55	1.0442	3.56	0.007115
3в	0.1400	2.20	5.31	29.75	51.43	1.0437	3.55	0.007054
3г	0.1667	2.80	5.40	33.04	52.27	1.0441	3.56	0.006919
3д	0.1933	3.40	5.44	36.33	52.95	1.0438	3.56	0.006963
3е	0.22	4.00	5.40	39.66	53.31	1.0438	3.56	0.007246
3ж	0.2467	4.60	5.19	43.04	53.03	1.0440	3.55	0.006875
3з	0.2733	5.20	4.70	46.49	51.50	1.0435	3.55	0.007041
3и	0.3000	5.80	3.60	50.06	47.22	1.0434	3.54	0.007019
3к	0.3267	6.40	0.98	53.83	35.64	1.0432	3.52	0.007147

Статистическая погрешность $K_{\text{беск}} = 6 \cdot 10^{-4}$ Статистическая погрешность $\beta_{\text{эфф}} = 1.27 \cdot 10^{-4}$

Можно заметить, все модели, за исключением моделей 3б, 3г, 3к, имеют идентичные нейтронно-физические характеристики в пределах статистической погрешности по $K_{\text{беск}}$ и $\beta_{\text{эфф}}$ в сравнении друг с другом и базовой моделью. $\langle K_{\text{беск}} \rangle$ для модели 3к также совпадает в пределах статистической погрешности с соответствующей величиной для базовой модели.

Среди трех выделенных моделей можно выделить 2 принципиально отличных друг от друга случая. Первый случай: в центральной части топливной таблетки находится низкообогащенное тонкое кольцо, а вокруг – слой с повышенным в несколько раз обогащением (модель 3б и 3г). Второй случай: центральная часть представляет собой относительно толстый слой с высоким обогаще-

нием по ^{235}U , периферийный слой – довольно тонкое кольцо со значительно сниженным обогащением (модель 3к).

При этом, поскольку в моделях 3б и 3г обогащение на периферии в начале топливной кампании оказывается повышенным относительно базовой модели, данные модели оказываются неэффективными в плане решения поставленной задачи: формирование гит-слоя в них в результате повышенного обогащения ускоряется.

Кроме того, как видно из приведенной на рисунке 7 тепловой карты энерговыделений, значительным недостатком моделей, подобных по своей структуре моделям 3б и 3г, является неэффективное использование делящегося материала, расположенного в центральной части топливной таблетки.

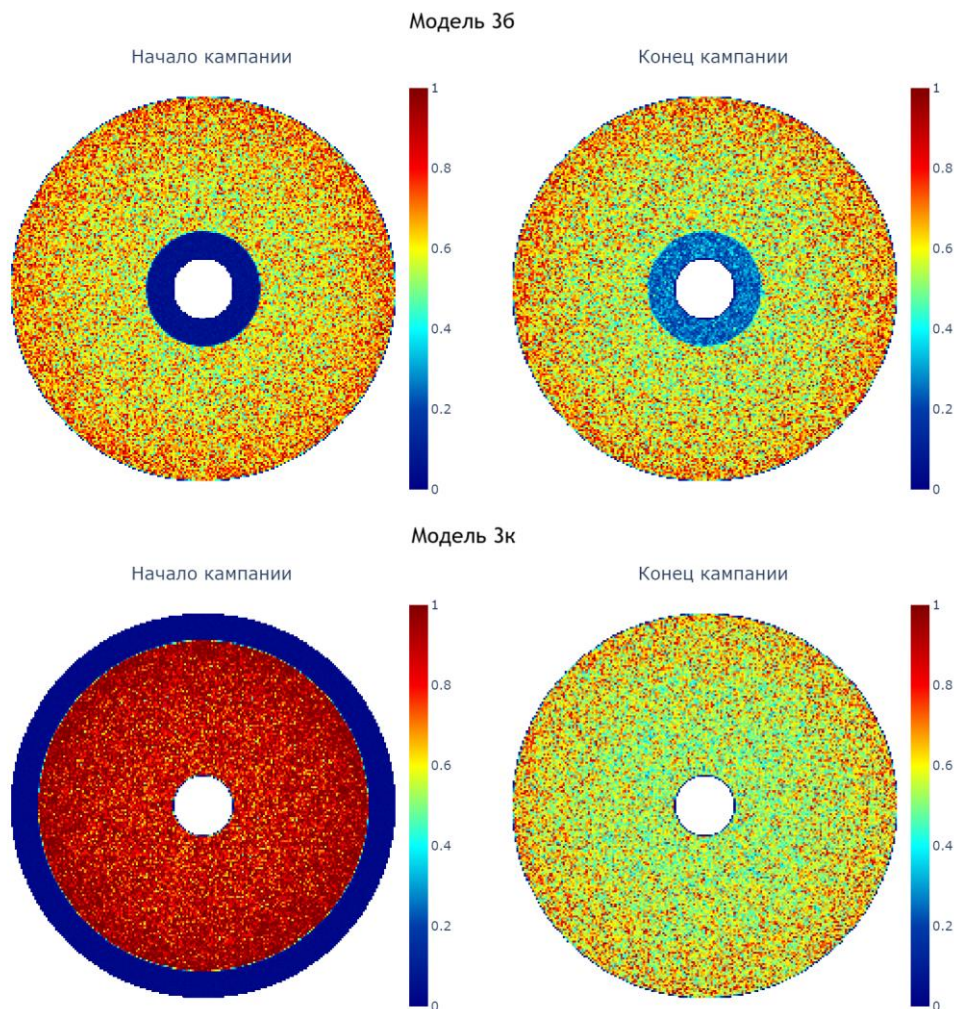


Рисунок 7. Радиальное распределение энерговыделений (в отн. ед.) для моделей 3б и 3к
Figure 7. Radial distribution of energy emissions (in relative units) for models 3b and 3j

При более длительной эксплуатации топливной таблетки из модели 3к выгорание должно оказаться более равномерным в результате образования значительного количества ^{239}Pu на периферии. Однако для получения больших глубин выгорания требуется топливо большего обогащения в среднем по топливной таблетке, что потребует дополнительной оценки оптимального соотношения размеров слоев и их обогащений.

В сумме по топливной таблетке ни в одной из моделей не происходит наработки избыточного количества минорных актинидов относительно базовой модели, но при этом фокус их образования смещается преимущественно в периферийную часть.

В результате продление топливной кампании потенциально возможно только для рассмотренной здесь модели 3к, которая качественно совпадает с полученными при

профилировании различными вариантами модели 2.

4. Эффекты реактивности.

Для отслеживания потенциального изменения эффектов реактивности в результате профилирования топливной таблетки производились нейтронно-физические расчеты для базовой модели и для модели 2г в 3-х точках: в начале, середине и конце кампании.

С целью отслеживания плотностного эффекта реактивности производились нейтронно-физические расчеты в ПК Serpent с изменением плотности воды от 0.001% (эффект опустошения) до 150% от плотности воды в номинальном режиме работы (номинальной плотностью принята 0.7 г/см^3). Для отслеживания эффектов реактивности по температуре топлива при наличии теплоносителя и при его отсутствии

(при постоянной плотности воды, соответственно 0.001% и 100% от плотности в номинальном режиме работы) температура топлива изменялась от 300 до 3000 К.

Результаты расчета эффектов реактивности на рисунке 8:

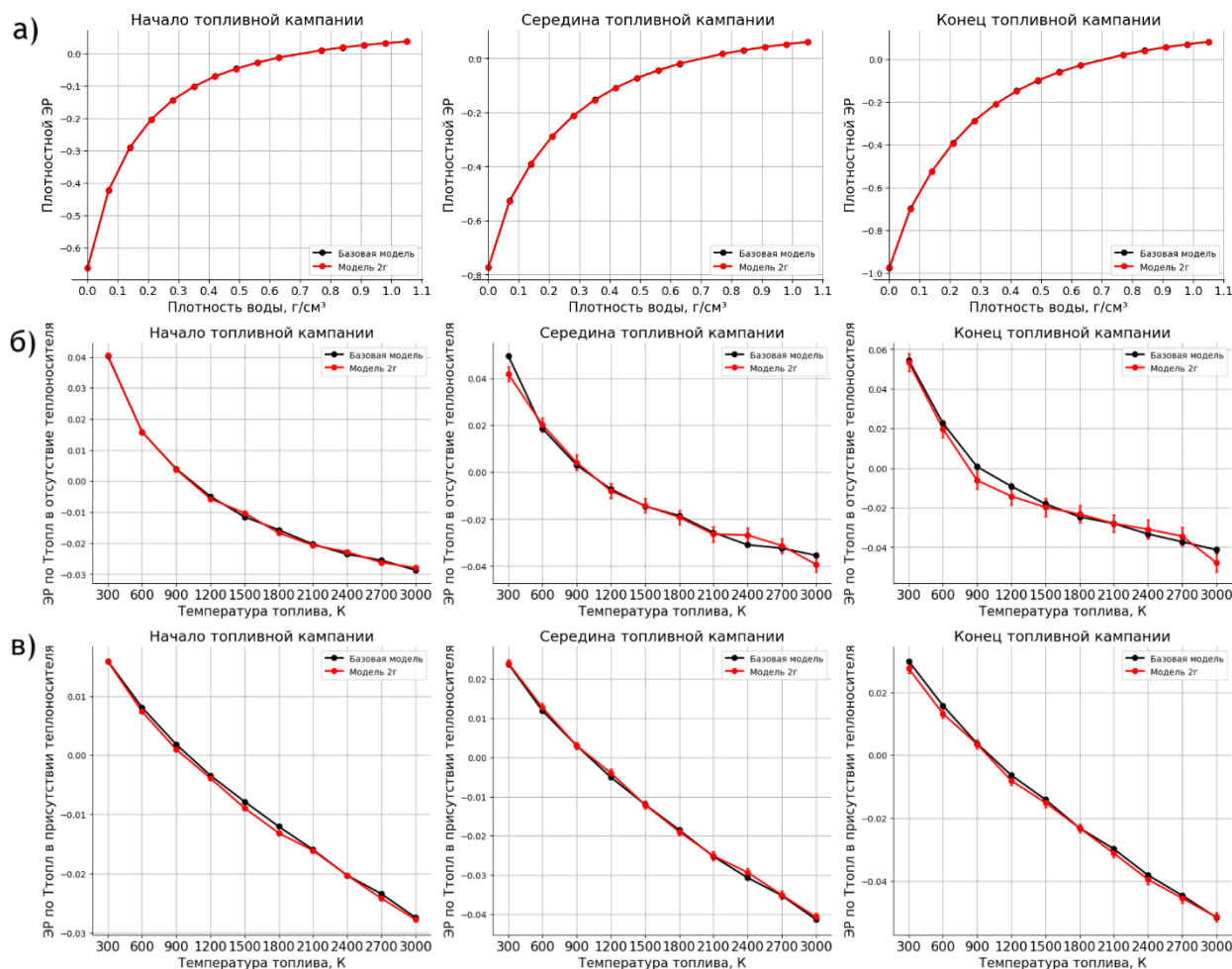


Рисунок 8. Сравнение эффектов реактивности для базовой модели и модели 2г (а – плотностной эффект реактивности, б – эффект реактивности по температуре топлива в отсутствие теплоносителя, в – эффект реактивности по температуре топлива в присутствии теплоносителя)

Figure 8. Comparison of reactivity effects for the basic model and the 2d model (a – density reactivity effect, b – fuel temperature reactivity effect in the absence of coolant, c – fuel temperature reactivity effect in the presence of coolant)

Как можно заметить, величины эффектов реактивности в результате профилирования не изменяются, так как совокупный нуклидный состав топлива остается неизменным, а пространственные эффекты от размещения делящихся ядер обратно пропорционально выгоранию незначительны.

Величины эффектов реактивности для упрощенной модели лежат в диапазоне между соответствующими значениями для базовой модели и модели 2г, поэтому здесь не приводятся.

Заключение

В данной работе проведен поиск оптимального способа перераспределения делящегося материала по радиусу топливной таблетки для снижения радиальной неравномерности выгорания твэлов, исследовано влияние данного способа на нейтронно-физические характеристики на примере элементарной ячейки реактора ВВЭР-1200. Оптимальными среди рассмотренных вариантов можно назвать модели 2-ую упрощенную и 3к. Преимуществом упрощенной модели является снижение неравномерности выгорания на 15.03% при практически неизмен-

ном распределении энерговыделения относительно исходной модели. Преимущество модели 3к состоит в снижении темпа потери реактивности. Однако имеется существенный радиальный градиент энерговыделения в топливной таблетке, влияние которого на характеристики таблетки актуально рассмотреть в будущем.

Радиальное профилирование твэлов по выгоранию может быть применено для продления срока их эксплуатации в ядерном реакторе, поскольку при этом возникает запас срока службы конструкционных и топливных материалов. При этом, конечно, непосредственно для продления топливной кампании необходимо повышать обогащение топлива.

Обнаружено, что при условии сохранения неизменной мощности ядерного реактора не

происходит изменение средних по твэлу изотопных составов на конец топливной кампании. При этом зоны наибольшего образования плутония и других минорных актинидов смещаются в периферийные слои, в результате чего изменяется радиальное распределение энерговыделений в твэле.

Учет изменения температур при профилировании обогащения топлива важен для обеспечения безопасности топливной таблетки и, возможно, будет осуществлен в дальнейшем при осуществлении теплогидравлического расчета. Кроме того, актуально исследование влияния азимутальных и радиальных неравномерностей распределения плотности потока нейтронов на характеристики профилированного топлива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Андрианов А.Н., Баранов В.Г., Тихомиров Г.В., Хлунов А.В. Моделирование ядерно-физических процессов в поверхностном слое топливного сердечника. *Атомная энергия*. 2008;104(6):353–358. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1792> (дата обращения: 22.07.2025).
Andrianov A.N., Baranov V.G., Tikhomirov G.V., Khlunov A.V. Modeling of nuclear physical processes in the surface layer of a fuel core. *Atomnaya Energiya*. 2008;104(6):353–358. (In Russ.). Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1792> (accessed: 22.07.2025).
2. Хашламунов Т.М.Р.С. Оптимизация параметров удлиненных топливных загрузок для реакторов ВВЭР-1000 (1200) с целью минимизации эксплуатационных затрат на АЭС: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.14.03. М., 2018. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/b9002140-be9b-46ba-95a8-473a2a9b1faf> (дата обращения: 22.07.2025).
Hashlamun T.M.R.S. Optimization of parameters of extended fuel loads for VVER-1000 (1200) reactors in order to minimize operating costs at NPPs: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.14.03. M., 2018. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/b9002140-be9b-46ba-95a8-473a2a9b1faf> (accessed: 22.07.2025).
3. Гердт Э. А., Внуков Р. А. Сравнительный анализ методов аксиального профилирования ТВС реактора ВВЭР-1200 на примере модели Z49A2. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;3(44):65–72. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-06>
Gerdt E. A., Vnukov R. A. Comparative Analysis of Methods for Axial Profiling of the WVER-1200 Fuel Assembly Using an Example of Model Z49A2. *Global nuclear safety*. 2022;3(44):65–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-06>
4. Leonard F.P. Van Swam. Nuclear fuel pellet. Patent № 005991354A United States, Int. Cl⁶. G21C 3/16, G21C 3/32. Заявка № 08/988,200 dated 26.11.1997; опубл. 23.11.1999. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5991354A/en> (accessed 22.07.2025).
5. Restani R., Horvath M., Goll W., Bertsch J., Gavillet D., Hermann A., Martin M., Walker C.T. On the condition of UO₂ nuclear fuel irradiated in a PWR to a burn-up in excess of 110 MWd/kgHM. *Journal of Nuclear Materials*. 2016;481:88–100. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.08.023>
6. Matzke H., Spino J. Formation of the Rim Structure in High Burnup Fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 1997;248:170–179. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(97\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)00171-2)
7. Ayanoglu M., Montgomery R., Harp J., Sasikumar Y. Metallographic examinations and hydrogen measurements of high-burnup spent nuclear fuel cladding. *Journal of Nuclear Materials*. 2024;589: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154833>
8. Баранов В.Г., Хлунов А.В., Курина И.С., Иванов А.В., Тенишев А.В., Тихомиров Г.В., Тимошин И.С. Комбинированная таблетка ядерного топлива. Патент № 2427936 C1 Российская Федерация, МПК G21C 3/00.

Заявка № 2010105647/07 от 18.02.2010; опубл. 27.08.2011. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2427936C1_20110827 (дата обращения: 22.07.2025).

Baranov V.G., Khlunov A.V., Kurina I.S., Ivanov A.V., Tenishev A.V., Tikhomirov G.V., Timoshin I.S. Combined nuclear fuel pellet. Patent № 2427936 C1 Russian Federation, MPC G21C 3/00. Application № 2010105647/07 dated 18.02.2010; published 27.08.2011. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2427936C1_20110827 (access date: 22.07.2025).

9. Богданов Е.А. Получение, свойства и области применения функциональных тонкопленочных оксидных покрытий: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.16.06. — СПб, 2017. Режим доступа: <https://elibr.spbstu.ru/dl/2/r17-63.pdf/download/r17-63.pdf> (дата обращения: 22.07.2025).

Bogdanov E.A. Preparation, properties and applications of functional thin-film oxide coatings: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.14.03. — М., 2018. (In Russ.). Available at: <https://elibr.spbstu.ru/dl/2/r17-63.pdf/download/r17-63.pdf> (accessed: 22.07.2025).

10. Мельников Е.В., Митин В.И., Крайнов Ю.А., Проселков В.Н., Панюшкин А.К., Калинушкин А.Е., Семченков Ю.М. Способ нанесения покрытия из выгорающего поглотителя нейтронов на основу – топливные таблетки из диоксида урана. Патент № 2175151 C1 Российская Федерация, МПК G21C 3/20, G21C 3/62. Заявка №2000117494 от 05.07.2000; опубл. 20.10.2001. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2175151C1_20011020 (дата обращения: 22.07.2025).

Melnikov E.V., Mitin V.I., Kraynov Y.A., Proselkov V.N., Panushkin A.K., Kalinushkin A.E., Semchenkov Y.M. The method of applying a coating from a fading neutron absorber to the base is fuel tablets made of uranium dioxide. Patent № 2175151 C1 Russian Federation, MPC G21C 3/20, G21C 3/62. Application № 2000117494 dated 05.07.2000; published 20.10.2001. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2175151C1_20011020 (accessed: 22.07.2025).

11. Шалумов Б.З., Коваленко В.М., Дьякова В.В. Способ получения оксидных покрытий. Патент № 2060236 C1 Российская Федерация, МПК C03C 17/25. Заявка № 5006020/33 от 27.08.1991; опубл. 20.05.1996. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2060236C1_19960520 (дата обращения: 22.07.2025).

Shalumov B.Z., Kovalenko V.M., Dyakova V.V. Method of obtaining oxide coatings. Patent № 2060236 C1 Russian Federation, MPC C03C 17/25. Application № 5006020/33 dated 27.08.1991; published 20.05.1996. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2060236C1_19960520 (accessed: 22.07.2025).

12. Glen E. McDonald. Method for depositing an oxide coating. Patent № US4350574A United States, Int. Cl.³ C25D9/08. Заявка № 246,772 dated 23.03.1981; опубл. 21.09.1982. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4350574A/en> (accessed: 22.07.2025).

13. Годин Ю.Г., Тенишев А.В., Новиков В.В. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Под общей ред. Б.А. Калина. Том 6, часть 2. Ядерные топливные материалы. М.: МИФИ, 2008. 604 с.

Godin Y.G., Tenishev A.V., Novikov V.V. Physical materials science: A textbook for universities. Under the general editorship of B.A. Kalin. Volume 6, Part 2. Nuclear fuel materials. М.: МЕРНИ, 2008. 604 p. (In Russ.).

14. Зайцев В.А., Зайцев П.А. Ядерное топливо с покрытием. М.: Техносфера, 2018. 240 с. Режим доступа: https://elibr.biblioatom.ru/text/zaytsev_yadernoe-toplivo-s-pokrytiem_2018/ (дата обращения: 22.07.2025).

Zaytsev V. A., Zaytsev P.A. Coated nuclear fuel. М.: Technosfera, 2018. 240 p. (In Russ.). Available at: https://elibr.biblioatom.ru/text/zaytsev_yadernoe-toplivo-s-pokrytiem_2018/ (accessed: 22.07.2025).

15. Leppanen J., PSG/SERPENT – A Continuous Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland. 2015. Available at: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 22.07.2025).

16. Dufek, J., Kotlyar, D., Shwageraus, E., Leppänen, J. Numerical stability of the predictor–corrector method in Monte Carlo burnup calculations of critical reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2013;56:34–38. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.018>

17. Nuclear Energy Agency (NEA) – The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library. Available at: https://oecd-nea.org/jcms/pl_14470/the-jeff-3-1-1-nuclear-data-library (accessed: 22.07.2025).

18. Noura H. Hafez, Hesham Shahbunder, Esmat Amin, S. U. El-Kamessy, S. A. Elfiki, Ahmed Latef. The Effect of burnable absorbers on neutronic parameters of VVER1200 reactor. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;956. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/956/1/012007>

19. Митин В. С., Бибилашвили Ю.К., Краснобаев Н.Н., Петрухин А.П., Афонин М.М. Таблетка ядерного топлива с покрытием (ее варианты), способ нанесения покрытия и установка для осуществления способа. Патент № 2131626 C1 Российская Федерация, МПК G21C 3/00, G21C 3/20, G21C 3/326, G21C 7/04, G21C 21/02. Заявка № 96117361/25 от 27.08.1996; опубл. 10.06.1999. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2131626C1_19990610 (дата обращения: 22.07.2025).

Mitin V. S., Bililashvili Y. K., Krasnobaev N. N., Petrukhin A. P., Afonin M. M. A coated nuclear fuel tablet (its variants), a coating method, and an installation for implementing the method. Patent № 2131626 C1 Russian Federation, MPC G21C 3/00, G21C 3/20, G21C 3/326, G21C 7/04, G21C 21/02. Application № 96117361/25 dated 27.08.1996; published 10.06.1999. (In Russ.). Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2131626C1_19990610 (accessed: 22.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Попов М.А. – изучение литературных источников по теме исследования, нейтронно-физический расчет, написание текста статьи;

Внуков Р.А. – постановка задачи, нейтронно-физический расчет, проверка результатов, редактирование текста статьи;

Колесов В.В. – постановка задачи, редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Максим Александрович Попов, студент, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0003-5617-7059>

e-mail: maksim.popovf@yandex.ru

Руслан Адхамович Внуков, старший преподаватель, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

Валерий Васильевич Колесов, кандидат физ.-мат. наук, доцент, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Popov M.A. – study of reference sources on the research topic, neutron physics calculation, writing the text of the article;

Vnukov R.A. – setting the task, neutron physics calculation, verification of results, editing the text of the article;

Kolesov V.V. – setting the task, editing the text of the article.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Maksim A. Popov, Student, Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0003-5617-7059>

e-mail: maksim.popovf@yandex.ru

Ruslan A. Vnukov, Senior lecturer, Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-2048-0828>

e-mail: vnukovra@oiate.ru

Valeriy V. Kolesov, Cand. Sci. (Phys. and Math), Obninsk Institute of Atomic Energy the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Obninsk, Kaluga region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8905-1995>

e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 31.03.2025

После доработки / Revision 23.07.2025

Принята к публикации / Accepted 29.07.2025