

## Изучение влияния аксиального профилирования ТВС (на примере модели Z49A2) на эффекты реактивности

Э.А. Гердт,\* Р.А. Внуков\*

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ,  
факультет ядерной физики и технологий  
Россия, 249030, г. Обнинск

(Поступила в редакцию 01.06.2023; подписана в печать 02.10.2023)

В работе представлены результаты изучения влияния аксиального профилирования выгорающего поглотителя в твэгах ТВС реактора ВВЭР-1200. Профилирование проводилось посредством разбиения твэга на 5 равных зон по высоте, в которых перераспределялись доли Gd, основываясь на данных о распределении плотности потока нейтронов по высоте твэга исходной модели. На следующем этапе проводился пересчет концентраций остальных изотопов таким образом, чтобы общее число ядер каждого изотопа в твэге до и после пересчета оставалось неизменным. Получены данные о снижении темпа потери реактивности, что позволяет выдвинуть утверждение о возможности продления топливной кампании. Проведена оценка изменения коэффициента воспроизводства, исследовано влияние профилирования на безопасность с позиции эффектов реактивности, доли запаздывающих нейтронов. Существенного влияния на КВ и долю запаздывающих нейтронов технология профилирования твэга не оказала, Доплер-эффект оказался практически идентичным, плотностной эффект реактивности в начале кампании оказался более отрицательным, в конце менее. Рассмотрено накопление минорных актинидов (МА). Результаты показали, что после профилирования концентрации МА возрастают. Данный аспект был обоснован расчётом ячейки твэга, который показал, что после профилирования спектр нейтронов затепляется на 50% вследствие чего возрастают скорости реакций накопления МА. Снятые параллельно данные об энерговыделении в соседних таблетках на границах зон профилирования показали значительный градиент энерговыделения ближе к периферии, порядка 15%. Данный результат требует обоснования безопасности с позиции термомеханики.

PACS: 28.41.-i.

УДК: 621.039.5.

Ключевые слова: аксиальное профилирование, выгорающий поглотитель, моделирование, ТВС, эффекты реактивности, ВВЭР-1200, минорные актиниды, обоснование безопасности.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводится огромное количество исследований в сфере развития ядерных технологий с целью повышения безопасности реакторной установки (далее РУ), улучшения выходных характеристик или уменьшения себестоимости нарабатываемой электроэнергии.

Одним из путей решения поставленной задачи является продление топливной кампании, которое решается, в т.ч. увеличением обогащения. Последнее требует уделять больше внимания компенсации избыточной реактивности. Ввиду ограничений по борному регулированию на помощь приходят выгорающие поглотители (далее ВП). В качестве ВП могут применяться оксиды редкоземельных металлов. В статье [1] исследуется применение оксида америция в качестве ВП в гомогенной смеси с диоксидом урана в ТВС реактора ВВЭР-1200. Показано, что подобный метод позволяет добиться снижения избыточной реактивности в начале топливной кампании, увеличения наработки Pu и снижения радиальной неравномерности энерговыделения.

В статьях [2, 3] рассмотрены результаты внедрения

тория в тепловой реактор, как один из альтернативных методов улучшения функционалов РУ.

В статье [4] исследуется использование оксида эрбия, который позволяет добиться ощутимой экономии борной кислоты и положительного влияния на спектральную составляющую температурного эффекта реактивности.

Однако несмотря на приведённые примеры положительного влияния редкоземельных америциевого и эрбиевого выгорающих поглотителей, в настоящее время на практике в ЯЭУ используется оксид гадолиния, поскольку он безопасен в отличие от МА, дешевле в сравнении с эрбием и другими ВП. При этом изотопы  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$  имеют очень большие сечения поглощения нейтронов: 61000 барн и 210000 барн соответственно [5]. Также среди преимуществ  $^{203}\text{Gd}$  можно выделить большой опыт эксплуатации непосредственно в ядерных реакторах.

Развитием решения задачи совершенствования ЯЭУ является профилирование — процесс перераспределения компонентов ядерного реактора по его объёму. Одним из ожидаемых результатов проведения профилирования является выравнивание поля энерговыделения, что показано в работе [6] на примере реактора ВВЭР-1000.

Таким образом, основываясь на всех вышеперечисленных результатах, полученных в других исследова-

\* gerdtea@mail.ru

ниях, было решено провести исследование влияния аксиального профилирования гадолиниевого выгорающего поглотителя в твэгах ТВС реактора ВВЭР-1200. Результаты, полученные в ходе исследования представлены в настоящей работе.

## 1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Метод профилирования

На первом этапе профилирование твэгов в ТВС проводилось двумя методами: основываясь на данных о распределении плотности потока нейтронов по высоте, и основываясь на данных о распределении выгорания изотопов по высоте. С точки зрения физики выбранные методы эквивалентны, однако, как было показано в статье [7], профилирование по плотности потока нейтронов оказалось более рационально с позиции получаемых погрешностей расчёта в ПС Serpent 2.

Таким образом, общая методология расчёта следующая: проводится расчёт модели ТВС без профилирования для получения данных о распределении плотности потока нейтронов по высоте твэга. Затем твэги в ТВС разбиваются на 5 равных зон по высоте. Между зонами перераспределяются изотопы  $^{155}\text{Gd}$  так, чтобы в той зоне, где поток меньше среднего по стержню, ВП было меньше и наоборот. После пересчёта концентраций изотопа гадолиния, происходит перераспределение остальных изотопов, содержащихся в топливных таблетках, таким образом, чтобы до и после профилирования общее число ядер топлива оставалось неизменным.

### 1.2 Модель ТВС

Модель ТВС Z49A2 [8] реактора ВВЭР-1200 включает в себя 312 твэлов, 12 твэгов, 18 направляющих каналов и 1 инструментальный канал. Твэги располагаются в 5-ом и 9-ом гексагональных кольцах, считая от центра (рис. 1).

Также учтено наличие некоторых конструкционных материалов. Таких как головка ТВС, концевики твэлов/твэгов, опоры ТВС и др. Теплоноситель разбит на 5 зон с нелинейным ростом температуры от нижнего конца топливного канала к верхнему (рис. 2)

Модель не содержит поглощающих стержней, концентрация борной кислоты в теплоносителе не изменяется. Вследствие этого вначале топливной кампании  $k_{eff} > 1$ , а в конце кампании  $k_{eff} < 1$ , что связано с физическими особенностями процесса выгорания топлива.

Исследование и визуализация модели осуществлялись в ПС Serpent 2, созданном для проведения прецизионных итерационных нейтронно-физических расчётов методом Монте-Карло [9].

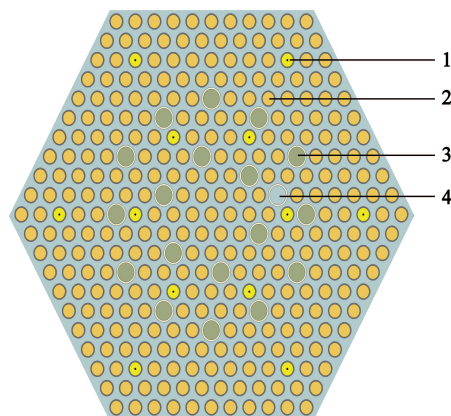


Рис. 1. Попечечный разрез модели ТВС: 1 — твэг, 2 — твэл, 3 — направляющий канал, 4 — инструментальный канал

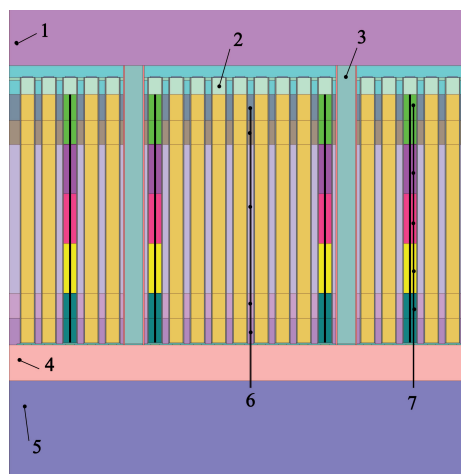


Рис. 2. Продольный срез модели: 1 — головка ТВС, 2 — заглушки твэлов/твэгов, 3 — направляющий канал, 4 — концевик твэлов/твэгов, 5 — опора ТВС, 6 — аксиальное разбиение теплоносителя на температурные зоны, 7 — аксиальное разбиение твэга

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Влияние на коэффициент размножения характеристики

На первом этапе была проведена оценка влияния аксиального профилирования на протекание топливной кампании. Для этого рассматривалось изменение эффективного коэффициента размножения нейтронов ( $k_{eff}$ ) во времени (рис. 3, таблица).

По данным кривым и приведённым численным данным можно сказать, что темп потери реактивности падает после профилирования, следовательно, существуют предпосылки к продлению топливной кампании ТВС. В первом приближении, продление осуществляется на 15 суток.

Таблица. Численные значения  $k_{eff}$

	Стандартная	Профилированная
$k_{eff}$ начало	1.16622	1.16400
$k_{eff}$ конец	0.87655	0.87782
Потеря реактивности	0.289673	0.286178
Темп потери реактивности, 1/(МВт×сут/кг)	0.07241815	0.0715445

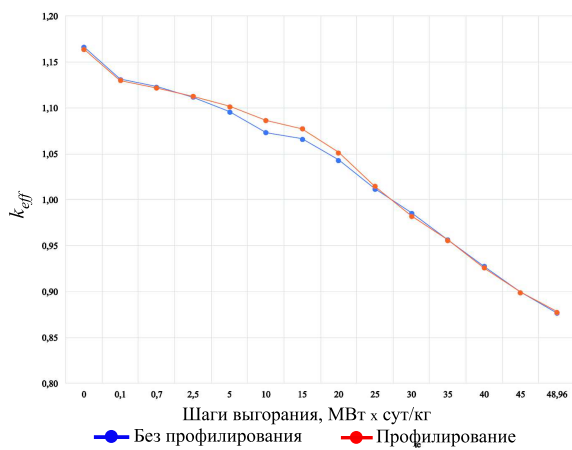


Рис. 3. Падения  $k_{eff}$  в течение топливной кампании

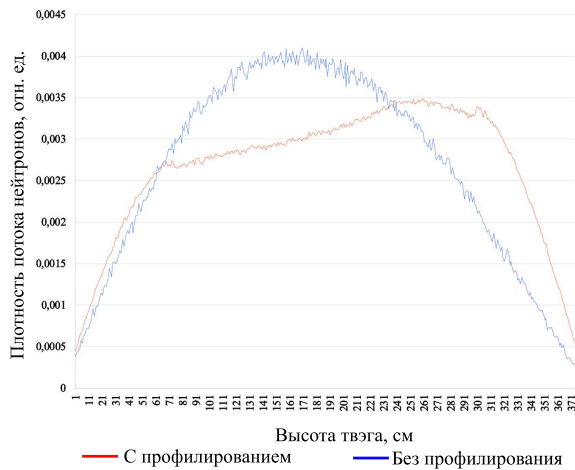


Рис. 4. Распределение плотности потока нейтронов в начале кампании

В середине кампании наблюдаются расхождения, однако они находятся в пределах статистической погрешности. При этом, в соответствии с выбранным методом нас интересуют лишь точки в начале и в конце кампании. Также видно, что в этих точках  $k_{eff}$  больше единицы и меньше единицы соответственно. Однако мы делаем предположение, что в среднем процесс протекания кампании соответствует действительности.

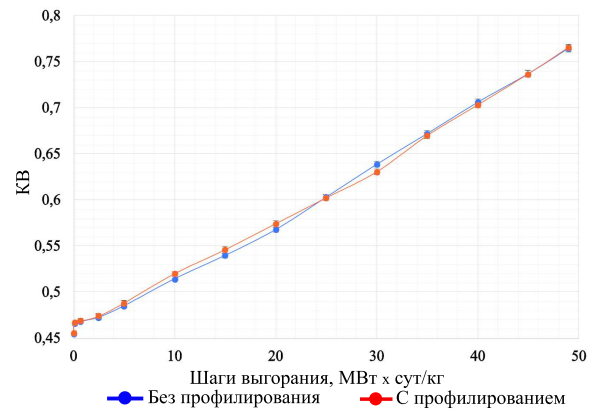


Рис. 5. Изменение коэффициента воспроизводства

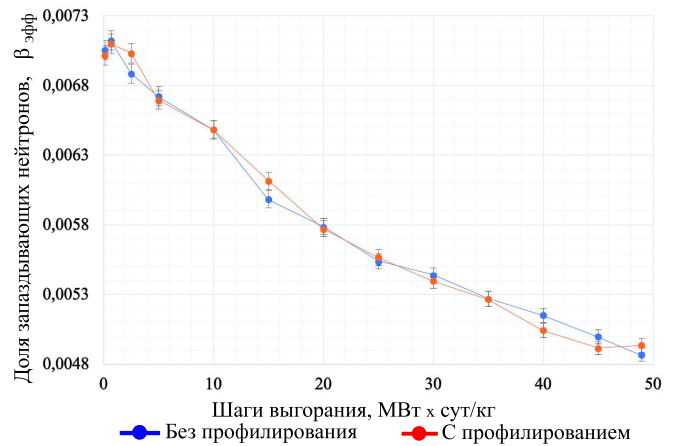


Рис. 6. Изменение доли запаздывающих нейтронов

## 2.2. Выравнивание плотности потока нейтронов

Аксиальное распределение плотности потока нейтронов до и после профилирования в начале топливной кампании представлено на рис. 4.

Результаты показывают, что поток нейтронов выравнивается: наблюдается плато, максимум смещен в верхнюю часть активной зоны, на торцах поток вырос в профилированной версии относительно стандартной. Таким образом, концепция возможность выравнивать плотность потока нейтронов работает.

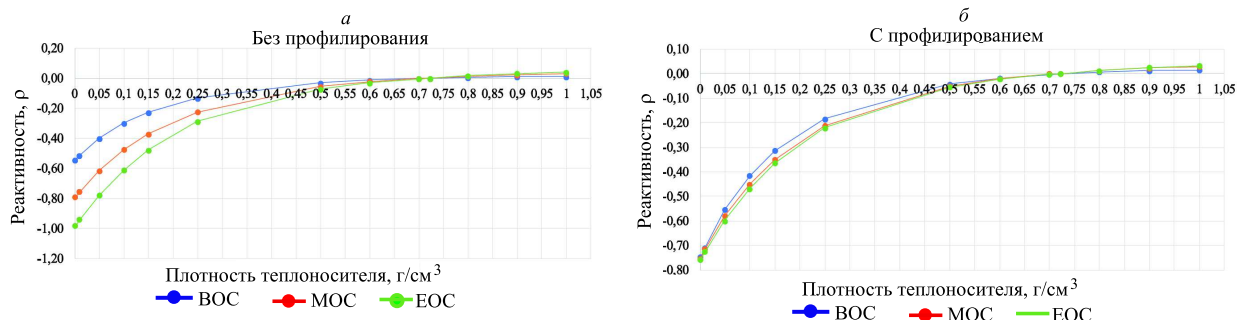


Рис. 7. Изменение плотностного эффекта реактивности: *a* — без профилирования, *b* — с профилированием

### 2.3. Влияние на коэффициент воспроизводства

На рис. 5 представлены графики изменения коэффициента воспроизводства ( $k_v$ ) с течением топливной кампании. Также по представленным кривым видно, что аксиальное профилирование твэгов в ТВС не оказывает существенного влияния на  $k_v$ .

### 2.4. Влияние на долю запаздывающих нейтронов

На рис. 6 проведено сравнение изменения доли запаздывающих нейтронов до и после профилирования. Очевидно, по данному аспекту также не наблюдается отклонений выше статистической погрешности.

### 2.5. Влияние на эффекты реактивности

Рассмотрены два эффекта: при изменении плотности теплоносителя, при изменении температуры топлива. В перспективе стоит рассмотреть эффект при изменении температуры теплоносителя.

#### 2.5.1. Плотностной эффект реактивности

В рамках плотностного эффекта реактивности принималось следующее приближение: плотность теплоносителя идентичная на всех участках высоты. Таким образом, не рассматриваются случаи с нелинейным изменением плотности теплоносителя по высоте активной зоны. Результаты представлены на рис. 7.

Результаты показывают следующее: при плотности теплоносителя, близкой к нулю (моделирование пустотного эффекта реактивности), наблюдается схождение значений для разных моментов кампании к одному значению. Таким образом, повышается управляемость РУ, собранной из ТВС лишь исследуемого типа, поскольку для оператора уменьшается число реперных точек, которые необходимо знать.

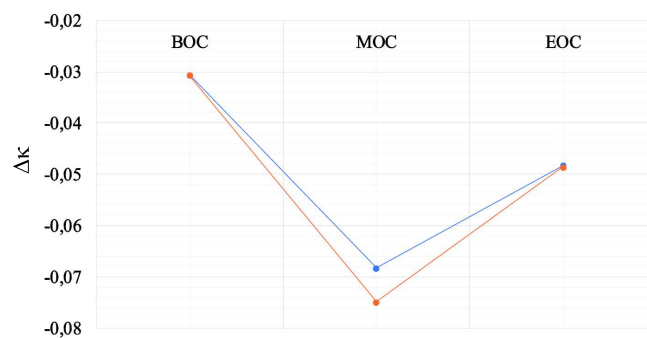


Рис. 8. Изменение Допплер-эффекта

#### 2.5.2. Допплер-эффект

Далее был проведён анализ данных о влиянии аксиального профилирования на Допплер-эффект, который является следствием повышения температуры топлива [10]. По полученным графикам (рис. 8) можно видеть, что в начале и конце топливной кампании влияния не наблюдается, из чего формируется вывод об отсутствии изменений в данном аспекте. В середине кампании наблюдается сильное изменение, однако это требует дополнительного исследования, поскольку в связи с особенностями проведённого моделирования (отсутствие поглощающих стержней) составы топлива в указанный момент времени принимаются не соответствующими действительности.

### 2.6. Накопление минорных актинидов

Изменение концентрации некоторых МА представлено на рис. 9. Заметна общая тенденция: общее количество минорных актинидов растёт. Где концентрации не значительны, разница там выше, в целом увеличение концентрации конкретного изотопа (за исключением  $^{247}\text{Cm}$ ) не превышает 15%. Данная ситуация согласуется при определении скоростей реакций, где в начале, середине и конце кампании наблюдаются более высокие сечения радиационного захвата у профилированной версии в сравнении со стандартной.

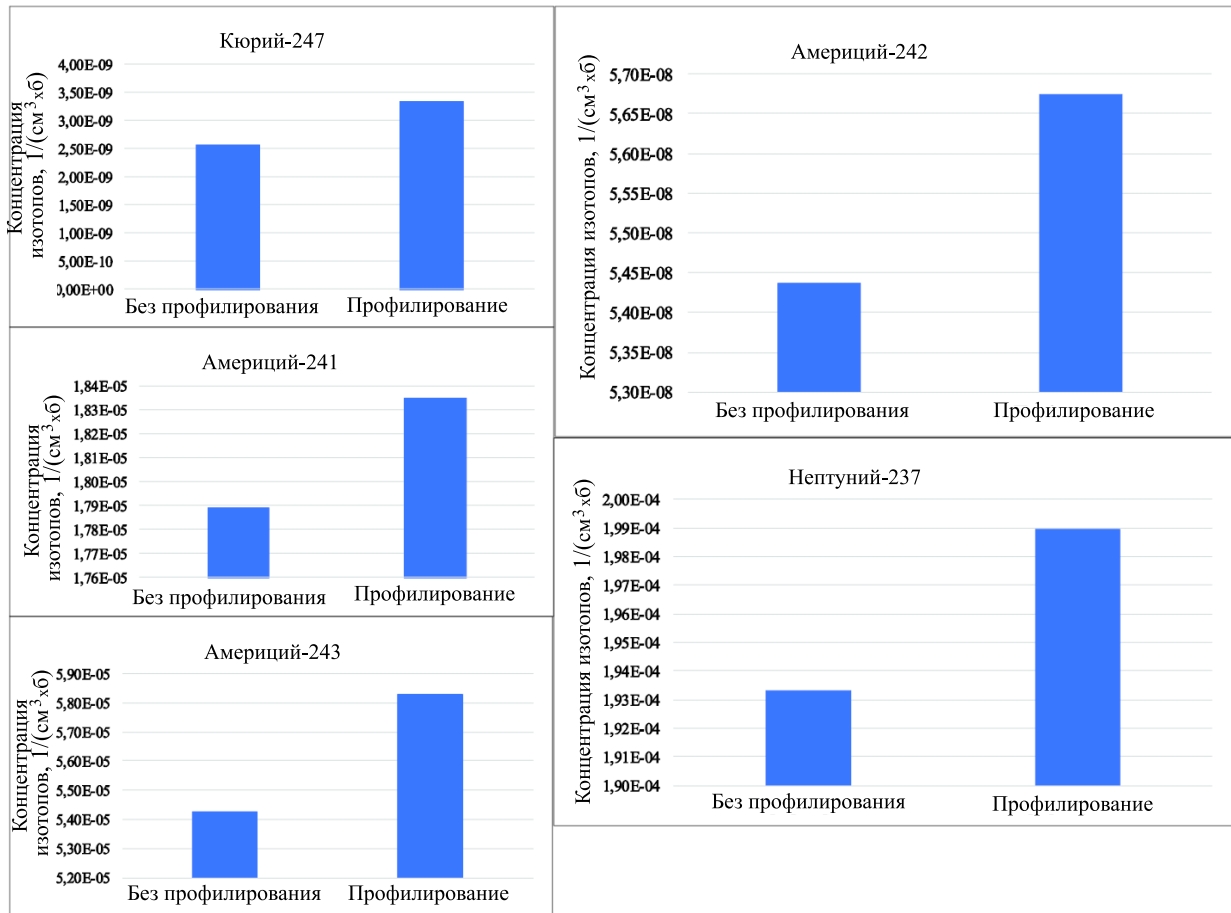


Рис. 9. Накопление минорных актинидов

Данное явление объясняется затеплением спектра. Средняя энергия нейтронов, вызывающих деление уменьшилась с  $\sim 0.4$  эВ до  $\sim 0.2$  эВ. Таким образом, увеличивается общее накопление тяжелых ядер.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по всем вышеприведенным аспектам, можно сделать вывод, что с позиции нейтронно-физических характеристик наблюдается положительный эффект по продлению топливной кампании, а также по выравниванию аксиального поля энерговыделения. Влияния на коэффициент воспроизводства не выявлено.

С позиции безопасности наблюдаются улучшения

по плотностному эффекту реактивности. Влияние на долю запаздывающих нейтронов, спектрометрический эффект не оказывается.

Доплер эффект в начале и в конце кампании также не изменяется. В середине кампании наблюдаются отклонения, связанные, предположительно, с моделью, в которой коэффициент размножения не равен единице и, как следствия, составы в указанный момент времени не реалистичны. По данному эффекту реактивности требуется дальнейшее уточнения.

Перспектива продолжения исследования заключается в моделировании активной зоны и анализ влияния эффектов перекомпенсации на полученные преимущества и недостатки. Также необходимо проведение дополнительных теплогидравлических расчётов.

- [1] Shelley A., Ovi M.H. // Nuclear Engineering and Technology. N 53(1). (2021).  
 [2] Serfontein D.E., Mulder E.J. // Nuclear Engineering and Design. 271. 106. (2014).  
 [3] Шаманин И.В. // Изв. вузов. Ядерная энергетика. № 3.

124. (2015).

- [4] Альссаф С.Х., Савандер В.И., Хассан А.А. // Изв. вузов. Ядерная энергетика. № 3. 62. (2020).  
 [5] Арабей Б. Г., Чекунов В. В. Поглощающие материалы для регулирования ядерных реакторов: Сокр. пер. с ан-

- гл. М.: Атомиздат, 1965.
- [6] Зуев А.А. Анализ применения аксиального профилирования твэг / А.А. Зуев // Материалы 16-й научно-технической конференции молодых специалистов ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 26-27 марта 2014 г. Подольск, 2014. <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2014/documents/kms2014-005.pdf>
- [7] Gerdt E.A., Vnukov R.A. Comparative Analysis of Methods for Axial Profiling of the WWER-1200 Fuel Assembly Using an Example of Model Z49A2 // Physics of Atomic Nuclei. 555. (2022).
- [8] Активная зона ВВЭР-1200 (В-392М). Назначение и проектные основы. [Электронный ресурс]. URL: <https://ppt-online.org/274776>.
- [9] Leppänen J. Development of a New Monte Carlo Reactor Physics Code [Uuden Monte Carlo reaktorifysiikkakoodin kehittäminen]. Espoo, 2007 VTT Publications 640. 228 p. + app. 8 p.
- [10] Тамбовцев С.Д., Дузин В.А., Раскач К.Ф. // Атомная энергия. № 3. 163 . (2012). <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1382/1363>.

## Research of the influence of axial profiling of fuel assemblies (on the example of the Z49A2 model) on the effects of reactivity

E.A. Gerdt<sup>a</sup>, R.A. Vnukov<sup>b</sup>

*Obninsk institute for nuclear power engineering (OINPE), Department of Nuclear Physics and Technology  
Obninsk, 249030, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>gerdtea@mail.ru, <sup>b</sup>vnukovra@oiate.ru*

The paper presents the results of studying the effect of axial profiling of the burnup absorber in the fuel rods of the fuel assemblies of the VVER-1200 reactor. Profiling was carried out by dividing the fuel rod into 5 equal zones in height, in which the shares of Gd were redistributed, based on data on the distribution of the neutron flux density along the height of the fuel rod of the original model. At the next stage, the concentrations of the remaining isotopes were recalculated so that the total number of nuclei of each isotope in the fuel element remained unchanged before and after the recalculation. Data were obtained on a decrease in the rate of reactivity loss, which allows us to put forward an assertion about the possibility of extending the fuel campaign. An assessment of the change in the conversion ratio was carried out, the influence of profiling on safety was investigated from the standpoint of reactivity effects, the proportion of delayed neutrons. The technology of fuel rod profiling did not have a significant effect on the CR and the proportion of delayed neutrons, the Doppler effect turned out to be almost identical, the density effect of reactivity at the beginning of the fuel campaign turned out to be more negative, at the end less. The accumulation of minor actinides (MA) is considered. The results showed that after profiling, the concentrations of MA increase. This aspect was justified by the calculation of the TVEG cell, which showed that after profiling, the neutron spectrum is warmed by 50%, as a result of which the rates of MA accumulation reactions increase. The data taken in parallel on the energy release in neighboring tablets at the boundaries of the profiling zones showed a significant gradient of energy release closer to the periphery, about 15%. This result requires a safety justification from the position of thermomechanics.

PACS: 28.41.-i.

*Keywords:* Axial profiling, burnup absorber, modeling, fuel assemblies, reactivity effects, VVER-1200, minor actinides, safety justification.

*Received 01 June 2023.*

### Сведения об авторах

1. Гердт Эдуард Аликович — студент; e-mail: [gerdtea@mail.ru](mailto:gerdtea@mail.ru).
2. Внуков Руслан Адхамович — преподаватель, аспирант; e-mail: [vnukovra@oiate.ru](mailto:vnukovra@oiate.ru).