

## Подходы к оптимизации глубины выгорания с помощью радиального профилирования твэга

Р. А. Внуков,<sup>\*</sup> И. А. Жаворонкова,<sup>†</sup> В. В. Колесов,<sup>‡</sup> Г. В. Карпович<sup>§</sup>

*Обнинский институт атомной энергетики, отделение ядерной физики и технологий  
Россия, 249039, Калужская область, Обнинск, Студгородок, д. 1.  
(Поступила в редакцию 28.01.2021; подписана в печать 07.06.2021)*

В настоящей работе поднимается вопрос оптимального использования ресурсов в процессе выгорания ядерного топлива. Задачи оптимизации сводятся к возможному сокращению используемых ресурсов при сохранении текущих характеристик либо продлению кампании за счет использования того же количества ресурсов. В качестве решения моделируемых задач предлагается профилирование топливных таблеток с выгорающим поглотителем. Профилирование осуществляется пропорционально радиальному выгоранию твэга относительно среднего значения. Использование данной технологии в стандартных ТВС представляет интерес с позиции обеспечения безопасности и повышения технико-экономических характеристик. Расчеты производились в программном комплексе Serpent, осуществляющим прецизионные нейтронно-физические расчеты методом Монте-Карло. Относительно стандартной сборки прирост  $k_{eff}$  в середине топливной кампании предоставляет больше гибкости в процессе эксплуатации реакторной установки в моменты перед перегрузкой. Влияние на длину топливной кампании профилирование не оказало. Влияние на микрокампании позволяет сделать вывод о возможном использовании технологии в рамках оптимизации обогащения топлива и продления топливной кампании либо сокращения использования заданной концентрации борной кислоты в начале кампании.

PACS: 28.20.-v, 28.60.+s      УДК: 621.039.51.17

Ключевые слова: выгорающий поглотитель, тепловыделяющий элемент с гадолинием, радиальное профилирование, тепловыделяющая сборка, эффективный коэффициент размножения, выгорание.

### ВВЕДЕНИЕ

Выгорающие поглотители (ВП) нашли широкое применение в связи с необходимостью компенсировать избыточную реактивность топлива из соображений безопасности. Вместе с тем до сих пор возможны альтернативные варианты более эффективного использования ВП, позволяющие продлить кампанию топлива на больший срок. Вопрос влияния на параметры кампании является достаточно интересным и рассматривался в целом ряде работ [1–6].

Одна из возможностей продления кампании заключается в использовании ВП для высвобождения реактивности в процессе его горения, по мере которого происходит все большее число делений  $^{235}\text{U}$  в более глубоких слоях твэга к моменту, когда запас реактивности твэлов становится достаточно малым, и это приводит к относительному росту коэффициента размножения. Однако вследствие неравномерности выгорания топлива ТВС подлежит замене до того, как высвобождается вся запасенная в топливе реактивность, таким образом, уменьшается и потенциал использования выгорающих поглотителей, поэтому актуальной задачей является радиальное профилирование топлива с целью оптимизации кампании в рамках её возможного продления.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование представляет собой процесс рассмотрения профилирования твэгов в ТВС заданной модели за счет нормировки концентраций выгорающего поглотителя по отношению к выгоранию твэга относительно средних значений по ТВС (предлагаемых в качестве исходных данных) для продления кампании (альтернативно рассматривается вопрос оптимизации технико-экономических характеристик водо-водяных энергетических реакторов).

#### 1.1. Расчетная среда

Расчеты проводились с использованием программного комплекса SERPENT-2 [7], реализующего метод Монте-Карло и позволяющего осуществлять высокоточные расчеты различных характеристик системы с учетом непрерывной энергетической зависимости нейтронных сечений.

В ПК Serpent для создания расчетных моделей используется двух- или трехмерная геометрия, состоящая из ячеек, ограниченных элементарными поверхностями и производными от них. Расчет эффективного коэффициента размножения ( $k_{eff}$ ) с использованием ПК Serpent основывается на решении транспортного уравнения переноса нейтронов, в ходе которого стохастическим методом моделируются взаимодействия нейтронов со средой (деление, рассеяние, поглощение и т. д.).

<sup>\*</sup> E-mail: [vnukovra@oiate.ru](mailto:vnukovra@oiate.ru)

<sup>†</sup> E-mail: [zhavoronkovaia@oiate.ru](mailto:zhavoronkovaia@oiate.ru)

<sup>‡</sup> E-mail: [valeri-kolesov@yandex.ru](mailto:valeri-kolesov@yandex.ru)

<sup>§</sup> E-mail: [levz555@mail.ru](mailto:levz555@mail.ru)

В ходе работы были изучены возможности нейтронно-физического расчета реактора. Он может проводить расчеты реакторной установки и ее кампании. Опыты можно классифицировать на различные виды. В настоящей работе рассматривались расчеты бесконечного и эффективного коэффициента размножения нейтронов, плотности потока нейтронов, концентраций изотопов выгорающего поглотителя и топлива [7]. Подобные исследования проводились и ранее [8, 9].

### 1.2. Модель и метод решения

В качестве рабочей модели была выбрана ТВС реактора ВВЭР-1000. Модель представлена на рис. . Можно выделить 11 гексагональных колец, которые были пронумерованы от периферии к центру (1–11). В стандартном варианте имеется 300 твэлов с  $UO_2$ , 18 направляющих каналов, 12 твэгов в кольцах 3 и 7 с ВП ( $UO_2 + Gd_2O_3$ ) и один измерительный канал. Обогащение твэлов 4.45%, твэгов — 4.95%. Данная модель ТВС выбрана с целью определения зависимости выгорания слоёв профилированного твэга от плотности потока нейтронов.

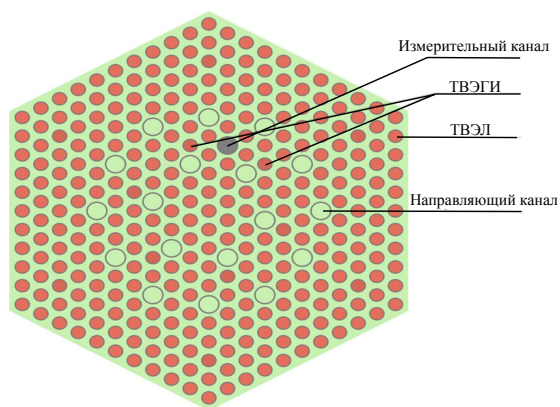


Рис. 1. Модель расчетной ТВС

Каждый твэг с 8% содержанием оксида гадолиния был разбит по радиусу на 10 слоев равной толщины, центральному слою присвоен номер 1, периферийному — 10. Концентрации топлива с ВП в твэгах стандартной сборки были заданы одинаковыми. После каждой итерации выполнялась двойная нормировка концентраций: по среднему выгоранию топлива на значение  $40 \text{ МВт} \times \text{сут}/\text{кг}$  и по суммарному содержанию гадолиния в ТВС, которое должно оставаться постоянным и равным исходному. Таким образом, достичь выравнивания глубины выгорания предполагалось без количественного изменения содержания гадолиния, а лишь за счет его перераспределения по твэгам ТВС.

Изменение концентраций оксида гадолиния в каждом слое выполнялось в соответствии с отношением

реального значения глубины выгорания к среднему в момент достижения  $40 \text{ МВт} \times \text{сут}/\text{кг}$ .

Условием остановки итерационного процесса являлось достижение наибольшего значения коэффициента размножения нейтронов кбеск на значении средней глубины выгорания  $40 \text{ МВт} \times \text{сут}/\text{кг}$ , за которым следовало устойчивое его уменьшение, выходящее за пределы погрешности величины. Результаты работы представлены на рис. 2 и рис. 3.

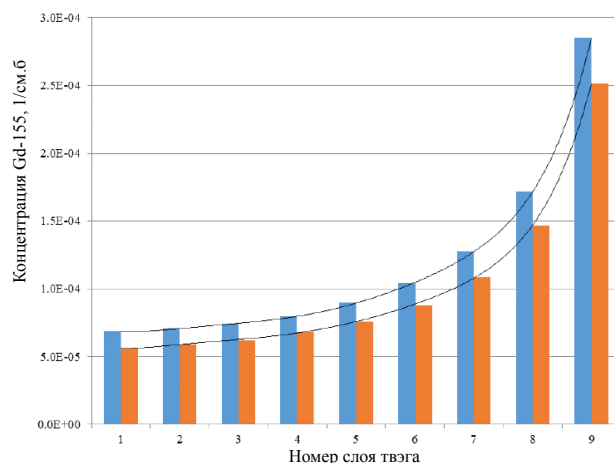


Рис. 2. Оптимальный профиль концентрации  $^{155}\text{Gd}$  модели топливной таблетки с выгорающим поглотителем

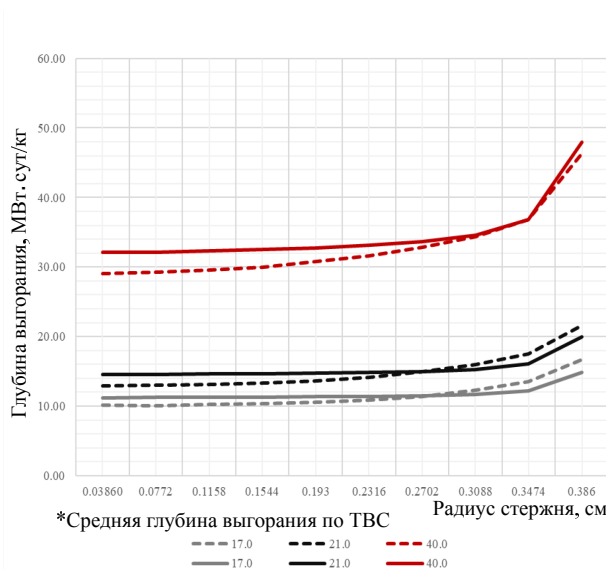


Рис. 3. Глубина выгорания в слоях периферийных твэгов при различном среднем значении выгорания  $17 \text{ МВт}$  (а),  $21 \text{ МВт}$  (б),  $40 \text{ МВт}$  (в)

Таблица 1. Соотношения концентраций изотопа  $^{155}\text{Gd}$  в исходных и профилированных твэгах

Внешняя граница слоя, см	Концентрация (внешнее кольцо твэгов), $1/\text{см}\times\text{б}$	Концентрация (внутреннее кольцо твэгов), $1/\text{см}\times\text{б}$	Отношение концентраций (внешнее кольцо / внутреннее кольцо)	Исходная концентрация, $1/\text{см}\times\text{б}$
0.0386	0.00005249	0.00003278	1.60	0.000521139
0.0772	0.00005254	0.00003380	1.55	0.000521139
0.1158	0.00005637	0.00003684	1.53	0.000521139
0.1544	0.00006369	0.00004065	1.57	0.000521139
0.1930	0.00007561	0.00004877	1.55	0.000521139
0.2316	0.00009739	0.00006312	1.54	0.000521139
0.2702	0.00013608	0.00009013	1.51	0.000521139
0.3088	0.00022122	0.00014988	1.48	0.000521139
0.3474	0.00056690	0.00041560	1.36	0.000521139
0.3860	0.002651180	0.002678500	0.99	0.000521139

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения задачи использовался итерационный процесс нормировки концентраций гадолиния по выгоранию топлива по радиусу твэга.

В результате было получено дискретное решение, содержащее оптимальные концентрации для каждого слоя внешнего и внутреннего кольца твэгов.

Значения концентраций и их отношение для колец отражены в табл. 1.

Для слоев 1–9 как внешнего, так и внутреннего колец наблюдается закономерность в изменении концентраций, которая хорошо аппроксимируется полиномиальным законом четвертой степени. Отклонение наблюдается в 10, периферийном слое твэга, где концентрация гадолиния остается высокой на протяжении всего итерационного процесса. На рис. графически отражено изменение концентраций по слоям твэгов внешнего и внутреннего колец.

Для слоев 1–9 как внешнего, так и внутреннего колец наблюдается закономерность в изменении концентраций, которая хорошо аппроксимируется полиномиальным законом четвертой степени. Отклонение наблюдается в 10, периферийном слое твэга, где концентрация гадолиния остается высокой на протяжении всего итерационного процесса. Более высокие значения концентраций  $^{155}\text{Gd}$  в центральных слоях внешнего кольца твэгов (на рис. выделены синим) объясняются различными значениями плотности потока нейтронов по ТВС.

В результате работы удалось достичь выравнивания выгорания по слоям твэгов для микрокампаний стандартной и увеличенной (до 21 МВт $\times$ сутки/кг). Что касается полного топливного цикла, выравнивание выгорания на внутренних и периферийном слоях практически не достижимо в связи с наработкой избыточного

плутония в процессе горения гадолиния по краям твэга. В итоге из-за экранировки части топлива выгорание твэга представляется неравномерным.

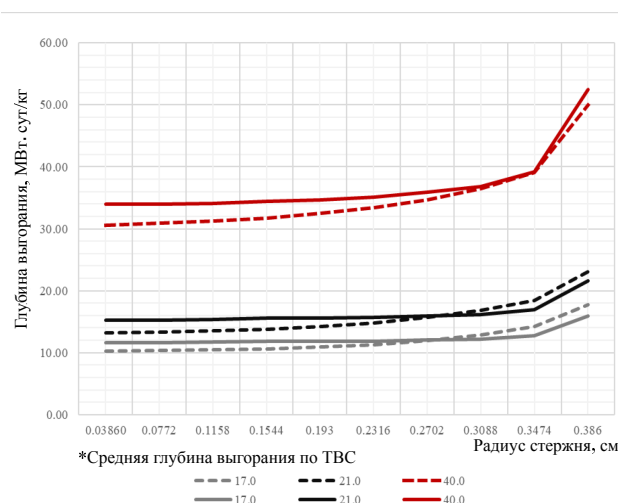


Рис. 4. Глубина выгорания в слоях центральных твэгов при различном среднем значении выгорания 17 МВт (а), 21 МВт (б), 40 МВт (в)

Глубина выгорания по слоям твэгов отражена на графиках, рис. 3 и рис. 4 (пунктирной линией отмечен стандартный или исходный твэг, сплошной линией — профилированный).

Значения  $k_{eff}$  отслеживались в каждой итерации на протяжении всего топливного цикла. Изменение  $k_{eff}$  при достижении различных глубин выгорания отражено на рис. 5.

Как видно из рисунка, выделяются два участка: на первом стандартная сборка превосходит по значению  $k_{eff}$  вплоть до 17 МВт $\times$ сутки/кг, что эквивалентно

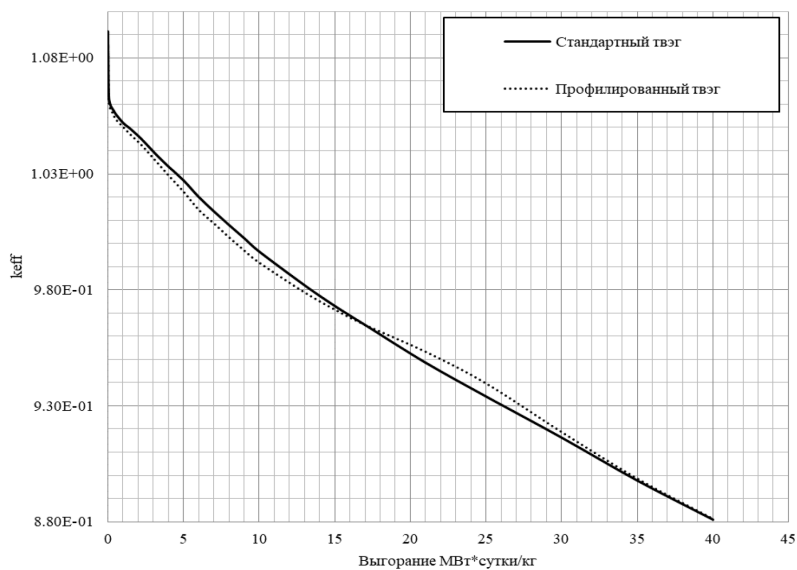


Рис. 5. Изменение  $k_{eff}$  в процессе кампании

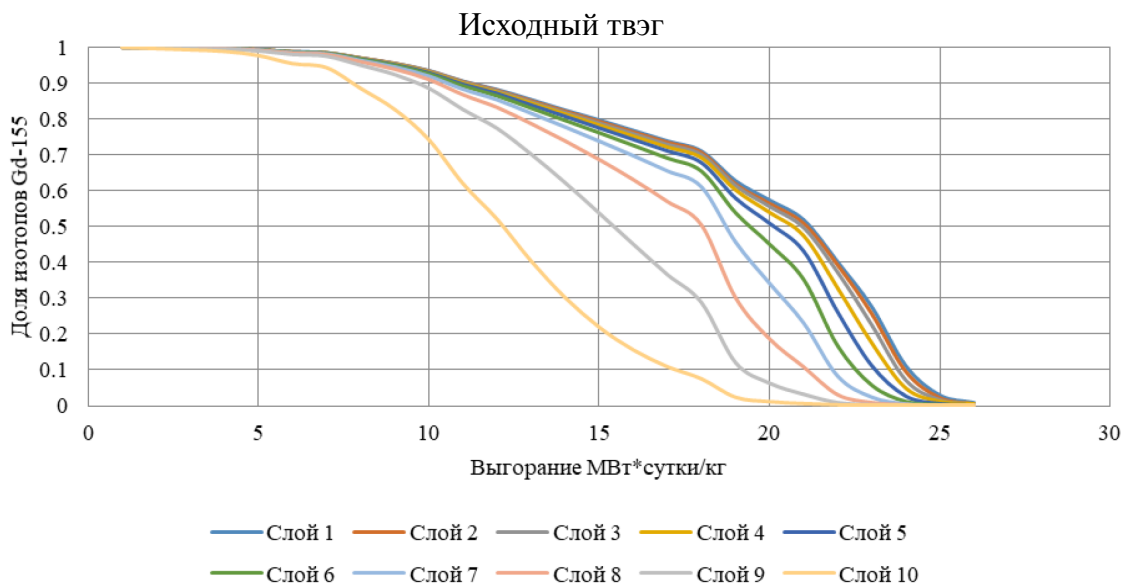


Рис. 6. Изменение концентрации  $^{155}\text{Gd}$  в исходном твэге в слоях 1–10

425 эфф. суткам. То есть с позиции оценки микрокампании мы можем говорить о возможной экономии поглотителя (например, борной кислоты) в процессе работы реакторной установки, так как достаточно продолжительное время (а номинальная длина микрокампании равнялась 330 эфф. суткам) наблюдаются более низкие значения  $k_{eff}$ .

Второй участок интересен с позиции профилирования активной зоны, так как локально можно повысить энерговыделение в зонах, где она проседает. Окончательные же результаты показывают, что данный вид профилирования в целом практически никак не ска-

зывается на длину топливной кампании (наблюдалось увеличение значений на 0.001 абсолютных единиц).

Кроме того, интерес представляет изменение нуклидного состава как с позиции сжигания выгорающего поглотителя, так и с позиции горения топлива. Результаты можно видеть на рис. 6 и рис. 7.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение возможности увеличения реакторной кампании является более перспективным ввиду нали-

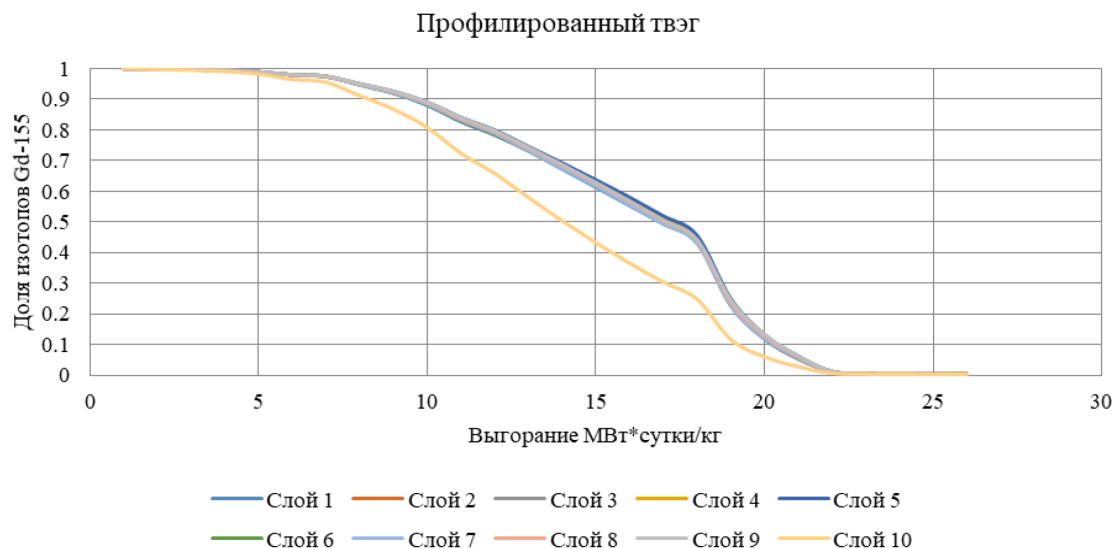


Рис. 7. Изменение концентрации  $^{155}\text{Gd}$  в профилированном твэге в слоях 1–10

чия сильной дифференциации  $k_{inf}$  между профилированной и стандартной видами топлива в промежутке с 10 до 21 МВт×сутки/кг. Явным преимуществом использования профилированной версии твэга является большая гибкость эксплуатации реакторной установки в интервалы времени перед перегрузками топлива.

Альтернативное преимущество использования технологии профилирование выражено в обеспечении безопасности ядерно-энергетической установки при ис-

пользовании топлива с большим обогащением: при использовании того же объёма борной кислоты в теплоносителе и большего обогащения топлива не возникает положительной обратной связи температуре теплоносителя. Кроме того, возможно сокращение использования борной кислоты для компенсации избыточной реактивности при том же составе топлива, однако данный аспект представляется менее экономически эффективным.

- [1] Abu Sondos M.A. et al. // IOP Conf. Series: Jour. of Ph.: Conf. Series. 2019. **1189**. 012003.
- [2] Abu Sondos M.A et al. // Gl. Nucl. Saf. **14**. P. 56.
- [3] Abu Sondos M.A. et al. Gl. Nucl. Saf. **14**. P. 103.
- [4] Frybortova L. // Nucl. Sc. Tech. 2019. **30**. P. 14.
- [5] Khoshahval F. et al. // Ann. of Nucl. En. 2016. **87**. P. 648.
- [6] Saad H.M. et al. Rad. Saf. Foll. jour. 2019. **84**. P. 46.
- [7] Leppanen J. PSG2/SERPENT – A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.
- [8] Каражелевская Ю.Е., Колесов В.В., Терехова А.М. Учебное пособие. Использование программного комплекса SERPENT для проведения нейтронно-физического расчета реакторов по курсу «Физический расчет ядерных реакторов». Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ. 2016. С. 64.

- [9] Бани Хамад С.А., Демин В.М., Абу Сондос М.А. Оценка влияния геометрических приближений формы представления ТВС ядерного топлива на результаты расчета мощности поглощенной дозы гамма-излучения. В сборнике: Тезисы докладов XIII Международной молодежной научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий», Москва, НИЯУ МИФИ. 2019. С. 85.
- [10] Демин В.М., Абу Сондос М.А., Джанполат А.С. Опыт использования программного средства Serpent для проведения оценок параметров ядерной безопасности систем, содержащих ядерное топливо. В сборнике: Тезисы докладов XV Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров». Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ. 2018. С. 123.

## Approaches to optimizing the burnup depth using radial fuel rod profiling

R. A. Vnukov<sup>a</sup>, I. A. Zhavoronkova<sup>b</sup>, V. V. Kolesov<sup>c</sup>, G. W. Karpovich<sup>d</sup>

*Department of Nuclear Physics and Technology, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering  
Obninsk, Kaluga region, 239039, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>vnukovra@oiate.ru, <sup>b</sup>zhavoronkovaia@oiate.ru, <sup>c</sup>valeri-kolesov@yandex.ru, <sup>d</sup>levz555@mail.ru.*

This paper raises the question of the optimal use of resources in the process of nuclear fuel burnup. Optimization tasks boil down to a possible reduction in the resources used while maintaining the current characteristics or extending the campaign by using the same amount of resources. As a solution to the simulated problems, profiling of fuel pellets with a burnable absorber is proposed. Profiling is carried out in proportion to the radial burnup of the fuel rod relative to the average value. The use of this technology in standard fuel assemblies is of interest from the standpoint of ensuring safety and improving technical and economic characteristics. The calculations were carried out in the Serpent software package, which performs precision neutron-physical calculations by the Monte Carlo method. Compared to a standard assembly, the increase in  $k_{eff}$  in the middle of the fuel campaign provides more flexibility during the operation of the reactor plant in the moments before refueling. Profiling had no effect on the length of the fuel campaign. The impact on reactor campaigns allows us to conclude that the technology can be used to optimize fuel enrichment and extend the fuel campaign or reduce the use of a given boric acid concentration at the beginning of the campaign.

PACS: 28.20.-v, 28.60.+s.

*Keywords:* burnable absorber, fuel element with gadolinium, radial profiling, fuel assembly, effective criticality factor, burnout.

*Received 28 January 2021.*

### Сведения об авторах

1. Внуков Руслан Адхамович — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; e-mail: vnukovra@oiate.ru.
2. Жаворонкова Ирина Андреевна — студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ; тел.: (495) 939-11-00, e-mail: zhavoronkovaia@oiate.ru.
3. Колесов Валерий Васильевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-11-00, e-mail: valeri-kolesov@yandex.ru.
4. Карпович Глеб Владиславович — ассистент; тел.: (495) 939-11-00, e-mail: levz555@mail.ru.