

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY


УДК 621.039.54:621.039.524.441
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-07>
EDN VKHUTB



**Анализ и оптимизация внутрикассетной неравномерности
энерговыведения и выгорания топлива ВВЭР-1000**

А.А. Лапкис^{1,2}  , А.С. Старченко¹ , Д.В. Тришечкин¹ , И.Ю. Попова¹

¹Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.

²Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
 aalapkis@mephi.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрены и систематизированы варианты тепловыделяющих сборок (ТВС) для реактора ВВЭР-1000. В нейтронно-физическом коде Serpent смоделирована бесконечная по высоте ТВС с шестью твэгами по образцу U49G6, применяемой в топливных загрузках ВВЭР-1000 «большой серии». В результате расчетов были выбраны варианты размещения твэгов с меньшей неравномерностью энерговыведения по ТВС, и проведена оценка влияния количества твэгов и их размещения на реактивность. Показано, что размещение твэгов в четвертом кольце оптимально с точки зрения неравномерности потвэльного энерговыведения и глубины выгорания. Рассмотрено влияние компоновки ТВС на глубину выгорания топлива по отдельным группам твэлов. Предложен вариант сокращения затрат вычислительных ресурсов путём выделенных наиболее различающихся по энерговыведению и выгоранию групп твэлов. Проведено сравнение исследуемых сборок с существующей ТВС типа U49G6. Предложен способ оценить недопроизводство тепловой энергии в ТВС, связанную с неравномерностью выгорания твэлов в ней, при сохранении максимальной глубины выгорания по отдельным твэлам на уровне существующих образцов. На основе анализа величины недопроизводства предложен вариант совершенствования компоновки ТВС с шестью твэгами для выравнивания поля энерговыведения и сокращения непроизводительных потерь топлива. Для этого может быть снижено обогащение в первом, втором и десятом кольцах твэлов, считая от центральной трубы ТВС. В результате такого профилирования глубина выгорания наиболее выгоревших твэлов в кассете может быть снижена до 1,015 от средней по ТВС.

Ключевые слова: твэг, ТВС, ВВЭР-1000, реактивность, гадолиний, энерговыведение, выгорание, глубина выгорания, Serpent.


Для цитирования: Лапкис А.А., Старченко А.С., Тришечкин Д.В., Попова И.Ю. Анализ и оптимизация внутрикассетной неравномерности энерговыведения и выгорания топлива ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):51–59. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-07>

For citation: Lapkis A.A., Starchenko A.S., Trishechkin D.V., Popova I.Yu. Analysis and optimization of energy release and fuel burnup nonuniformity in the WWER-1000 fuel assembly. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):51–59 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-07>

**Analysis and optimization of energy release and fuel burnup nonuniformity
in the WWER-1000 fuel assembly**

**Aleksandr A. Lapkis^{1,2}  , Aleksandr S. Starchenko¹ , Dmitry V. Trishechkin¹ ,
Irina Yu. Popova¹**

¹Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia

²Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia
 AALapkis@mephi.ru

Abstract. The paper considers and systematises the options of fuel assemblies (FAs) for the WWER-1000 reactor. In the Serpent neutron-physics code, an infinite-height fuel assembly with six fuel pins is modelled using the U49G6 pattern used in the WWER-1000 «large series» fuel assemblies. Variants of fuel elements placement with lower non-uniformity of energy release on fuel assemblies were selected as a result of calculations, and the influence of the number of fuel elements and their placement on reactivity was evaluated. It is shown that gadolinium fuel elements placement in the fourth ring is optimal from the point of view of non-uniformity of fuel energy release and burn-up depth. The influence of the fuel assembly layout on the fuel burnup depth for separate groups of fuel pins is considered. The variant of reduction of computational resources expenditures by means of allocation of the most different in energy release and burnup groups of gadolinium fuel rods is offered. Comparison of the investigated assemblies with the existing U49G6 type fuel assembly is carried out. A method to estimate the underproduction of thermal energy in the fuel assembly associated with the non-uniformity of fuel element burnup in it, while maintaining the maximum burnup depth for individ-

ual fuel elements at the level of existing samples is proposed. On the basis of the analysis of the value of underproduction, a variant of improving the configuration of fuel assemblies with six fuel elements is proposed to equalise the field of energy release and reduce unproductive fuel losses. Therefore, enrichment in the first, second and tenth rings of fuel elements, counting from the centre tube of the fuel assembly, can be reduced. As a result of such profiling, the burnup depth of the most burned-out fuel elements in the cassette can be reduced to 1.015 of the average for the fuel assembly.

Keywords: gadolinium fuel rod, fuel assembly, WWER-1000, reactivity, gadolinium, energy release, burnout, burnup, Serpent.

Введение

В конце топливной кампании в ядерном топливе реактора ВВЭР всегда имеется невыгоревшая часть топливных нуклидов, обусловленная неравномерностью поля энерговыделения в активной зоне. Чем выше эта доля, тем ниже эффективность и выше потенциал для оптимизации использования топлива. Основную часть выработки ядерной энергии сейчас обеспечивают тепловые реакторы, что означает повышенную потребность в использовании ископаемого урана-235, запасы которого ограничены. Так как переход к замкнутому топливному циклу в краткие сроки осуществить затруднительно, то важно сократить все возможные потери топлива.

Вторым аспектом, требующим ещё более равномерного поля энерговыделения в ТВС ядерных реакторов, является повышение их единичной мощности. В настоящее время реакторы ВВЭР-1000 массово прошли повышение мощности до 104%, но АО «Концерн Росэнергоатом» рассматривает и варианты повышения мощности до 107-110%. Так, при неизменном поле энерговыделения и конструкции топлива повышение мощности неизбежно приведёт к снижению запасов по предельным тепловым нагрузкам на твэлы, и таким образом снизит уровень теплотехнической надёжности активных зон.

Обеспечение равномерности поля энерговыделения является одной из главных задач, стоящих перед разработчиками ядерного топлива и топливных загрузок. Чтобы достичь необходимых результатов, в проектах рассматриваются различные варианты ТВС как с использованием выгорающего поглотителя, так и без него, но с разным обогащением по ^{235}U . В роли выгорающего поглотителя применяется Gd_2O_3 в отдельных топливных элементах – твэгах.

Проблема неравномерности поля энерговыделения рассматривалась в работах НИЯУ МИФИ [1-6], НТЦ ЯРБ [3], Курчатовского института [7, 8]. Изучались влияние профилирования по радиусу твэга с выгорающим поглотителем, влияние различных обогащений твэлов и концентраций Gd_2O_3 в твэгах. Особо стоит отметить, что неравномерность энерговыделения в ТВС влияет на характеристики безопасности при обращении с облучёнными ТВС, на радиационную безопасность контейнеров с ОЯТ [3, 4].

Разработчиками ядерного топлива предлагаются варианты ТВС с 6, 12, 18, 24 и 27 твэгами. Применение высокого количества выгорающего поглотителя способствует компенсации большего запаса реактивности [5], но провоцирует неравномерное энерговыделение и выгорание топлива внутри кассеты. Рассмотрим эту проблему на примере ТВС реактора ВВЭР-1000 с шестью твэгами. В качестве прототипа существующей кассеты этого типа может служить

модификация U49G6. Данная ТВС содержит шесть симметрично расположенных твэгов в восьмом гексагональном кольце в соответствии со схемой нумерации на рисунке 1.

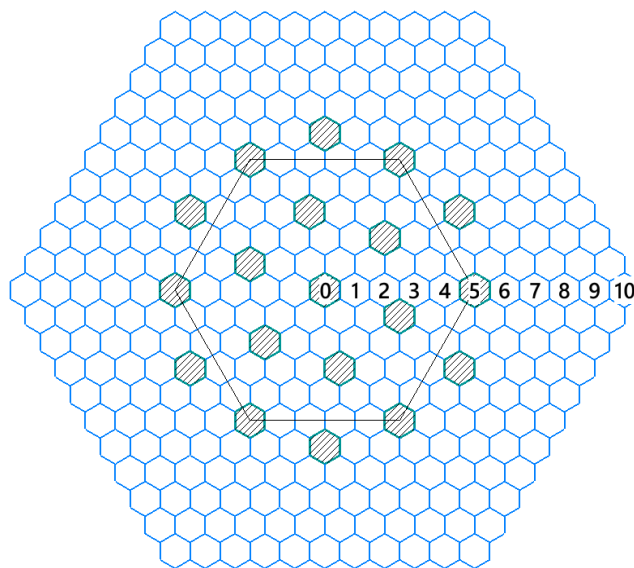


Рисунок 1. Нумерация гексагональных колец
Figure 1. Hexagonal ring numbering

Такая кассета включает 306 твэлов и 6 твэгов. Обогащение твэлов по урану-235 составляет 4,92%, твэгов – 3,6% с добавкой оксида гадолиния массовой долей 5,0%

Для оптимизации потвэльного распределения энерговыделения и глубины выгорания в данной работе необходимо:

- смоделировать решетку ТВС реактора ВВЭР-1000;
- установить зависимость между расположением твэгов в ТВС и их влиянием на степень неравномерности энерговыделения и глубины выгорания;
- оценить недопроизводство энергии в ТВС, связанную с потвэльной неравномерностью, в зависимости от ее компоновки;
- предложить усовершенствованную компоновку ТВС, которая позволит минимизировать потвэльную неравномерность энерговыделения и выгорания топлива и недопроизводство энергии.

Методы исследования

Моделирование внутрикассетных распределений энерговыделения и глубины выгорания ТВС проводилось с помощью нейтронно-физического кода Serpent [9], работа которого основана на методе Монте-Карло. Данный метод подразумевает моделирование случайных траекторий отдельных нейтронов. Это позволяет сократить до минимума количество приме-

няемых при расчёте приближений. Таким образом, метод Монте-Карло можно рассматривать как численный эксперимент, способный заменить эксперимент реальный. Основным недостатком является время, необходимое для получения результата, а также высокая потребность в вычислительных ресурсах.

Так как метод основан на случайных событиях, ему присуща статистическая погрешность. Для обеспечения точности получаемых результатов была проведена проверка сходимости.

Для исследования неравномерности энерговыделения была смоделирована бесконечная по высоте ТВС U49G6 с зеркальными граничными условиями, с использованием ядерных данных по библиотеке JEFF-3.1.1. Проверка сходимости по коэффициенту размножения ($K_{эф}$) показала, что результат с установившейся погрешностью на уровне 0,1% можно получить при 70000 нейтронных историй и 600 циклах (рис. 2). Планки погрешностей на рисунке 3 и последующих соответствуют трём стандартным отклонениям.

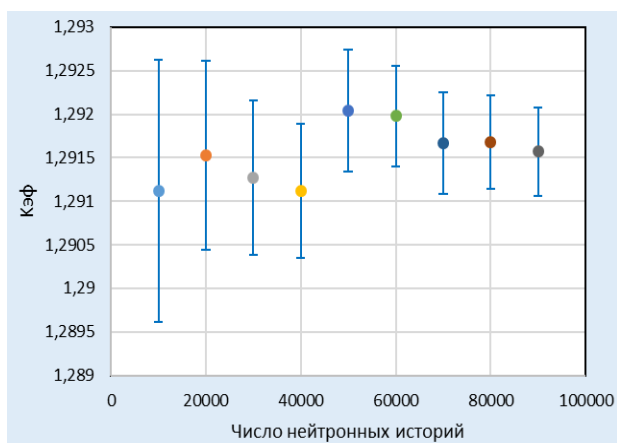


Рисунок 2. Проверка сходимости
Figure 2. Verification of convergence

При этом несимметричность между секторами ТВС по величине относительного энерговыделения в твэле $K_{ТВС}$ не превышает 0,01. Относительное энерговыделение в i -м твэле или твэге определялось по формуле (1):

$$K_{ТВС(i)} = \frac{Q_i}{\langle Q_i \rangle}, \quad (1)$$

где Q_i – мощность, выделяемая в i -м твэле;
 $\langle Q_i \rangle$ – мощность, выделяемая в «среднем» твэле.

Анализ неравномерности энерговыделения и глубины выгорания в ТВС

В ходе работы рассматривались варианты сборки с количеством твэгов 6, 12, 18 и 24. Помимо количества, также менялось расположение твэгов в гексагональных кольцах. Результаты расчетов оценивались с помощью диаграмм и графиков энерговыделения, которые строились для каждой сборки.

При размещении твэгов во втором гексагональном кольце центр ТВС будет обладать более слабым энерговыделением, чем периферия. Поэтому целесообразно размещать твэги, начиная с третьего гексагональ-

ного кольца. В этом случае энерговыделение ТВС станет более равномерным (табл. 1).

Таблица 1. Энерговыделения и $K_{эф}$ в разных вариантах расположения твэгов

Table 1. Energy Emissions and C_{ef} in different variants of gadolinium fuel rods arrangement

| № кольца | Мин. относительное энерговыделение | Макс. относительное энерговыделение | $K_{эф}$ |
|--------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| 2 | 0.83 | 1.10 | 1.3594 |
| 3 | 0.92 | 1.10 | 1.3552 |
| 4 | 0.93 | 1.10 | 1.3540 |
| 6 | 0.89 | 1.10 | 1.3556 |
| 7 | 0.89 | 1.11 | 1.3583 |
| 8 | 0.89 | 1.12 | 1.3584 |
| 9 | 0.88 | 1.12 | 1.3588 |
| 10 | 0.87 | 1.11 | 1.3651 |
| 2 и 3 | 0.78 | 1.14 | 1.3115 |
| 3 и 4 | 0.85 | 1.14 | 1.3041 |
| 3 и 6 | 0.93 | 1.14 | 1.2917 |
| 3 и 7 | 0.94 | 1.12 | 1.2924 |
| 3 и 8 | 0.93 | 1.10 | 1.2919 |
| 3 и 9 | 0.93 | 1.10 | 1.2917 |
| 3 и 10 | 0.92 | 1.10 | 1.2978 |
| 2, 6 и 9 | 0.91 | 1.14 | 1.2336 |
| 3, 6 и 9 | 0.93 | 1.13 | 1.2311 |
| 4, 6 и 9 | 0.93 | 1.16 | 1.2332 |
| 2, 6, 9 и 10 | 0.96 | 1.15 | 1.1769 |
| 3, 6, 9 и 10 | 0.96 | 1.15 | 1.1742 |
| 3, 6, 8 и 9 | 0.96 | 1.14 | 1.1727 |
| 4, 6, 8 и 9 | 0.95 | 1.21 | 1.1756 |

Данные результаты приведены на графике (рис. 3).

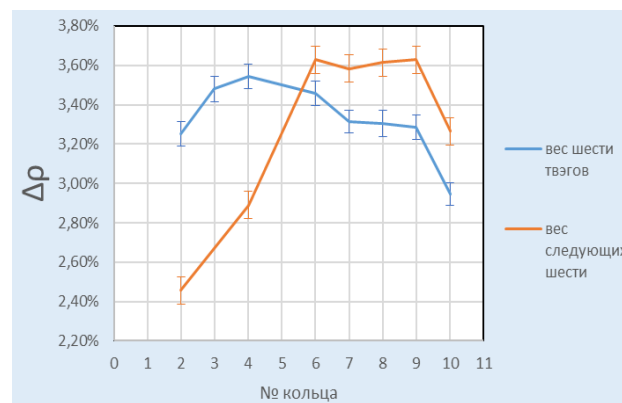


Рисунок 3. Эффективность шести твэгов в различных кольцах ТВС

Figure 3. Efficiency of six gadolinium fuel rods in different fuel assembly rings

На графике приведена эффективность (в единицах реактивности) группы из шести твэгов в случаях:

- ТВС с шестью твэгами;
- ТВС с 12 твэгами при условии, что первые шесть твэгов уже установлены в 3-м кольце.

Наличие в одном секторе двух твэгов в соседних кольцах снижает эффективность компенсации запаса реактивности. Твэг максимально эффективно выполняет свою задачу, когда он располагается в центре

сектора. Равная удалённость твэгов друг от друга позволяет нейтронам со всей ТВС с одинаковой вероятностью поглощаться именно в твэге.

По коэффициентам неравномерности энерговыделения и влияния твэгов на реактивность были отобраны две конфигурации ТВС: одна с шестью твэгами в 4-м кольце и одна с двенадцатью твэгами в 3-м и 7-м кольцах. Данные сборки обладают наиболее равномерным энерговыделением по сравнению с остальными рассмотренными сборками.

Выводы, сделанные выше, носят отпечаток принятых допущений: так, зеркальные граничные условия подразумевают, что свежая ТВС окружена другими такими же свежими ТВС. Исходя из картограмм загрузки ВВЭР-1000, это не полностью так. Но в противном случае сделанные выводы не носили бы общего характера, а касались бы только ТВС в определённой позиции в активной зоне.

Для определения зависимости глубины выгорания от расположения была выбрана сборка с шестью твэгами: в варианте U49G6 и в предложенном варианте с твэгами в 4-м кольце. Так как при расчетах в Serpent параметры твэлов были заданы одним материалом, и программа усредняла глубину выгорания по всей сборке, то было принято решение условно разделить твэлы на группы, не меняя при этом их параметры. Разделение проводилось следующим образом: твэлы на последнем кольце, на первом кольце, вокруг твэгов и все остальные.

Чтобы наглядно показать, как компоновка ТВС влияет на глубину выгорания, стоит ввести понятие неравномерности выгорания. Неравномерность выгорания представляет собой отношение глубины выгорания в определенном материале к средней глубине выгорания. Таким образом, была проведена серия расчетов с изменением расположения твэгов (рис. 4-6).

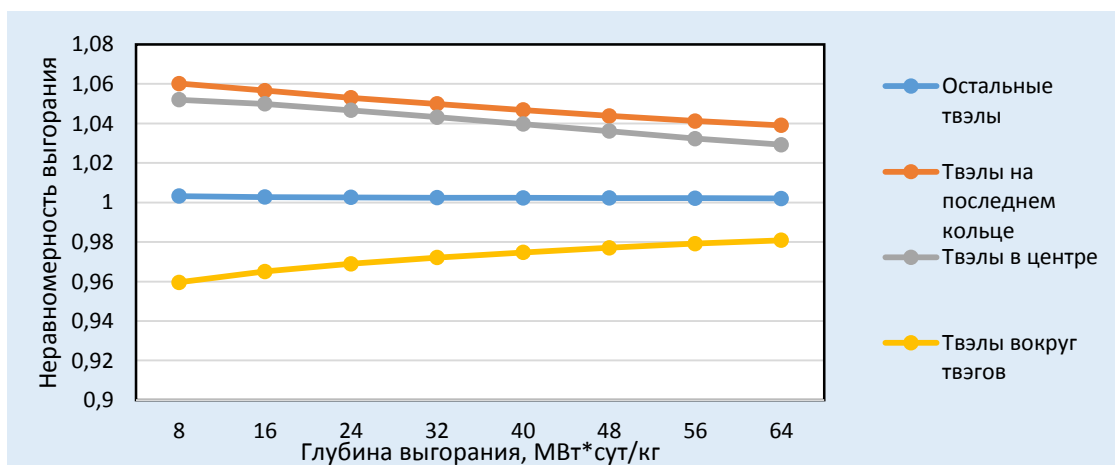


Рисунок 4. Неравномерность выгорания при твэгах в 4-м кольце
Figure 4. Unevenness of burnout at gadolinium fuel rods in the 4th ring

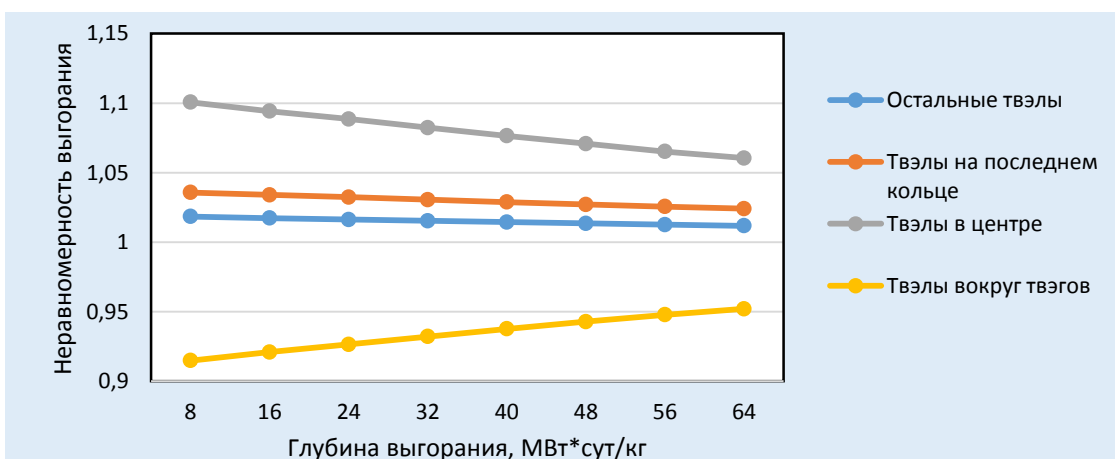


Рисунок 5. Неравномерность выгорания при твэгах в 7-м кольце
Figure 5. Unevenness of burnout at gadolinium fuel rods in the 7th ring

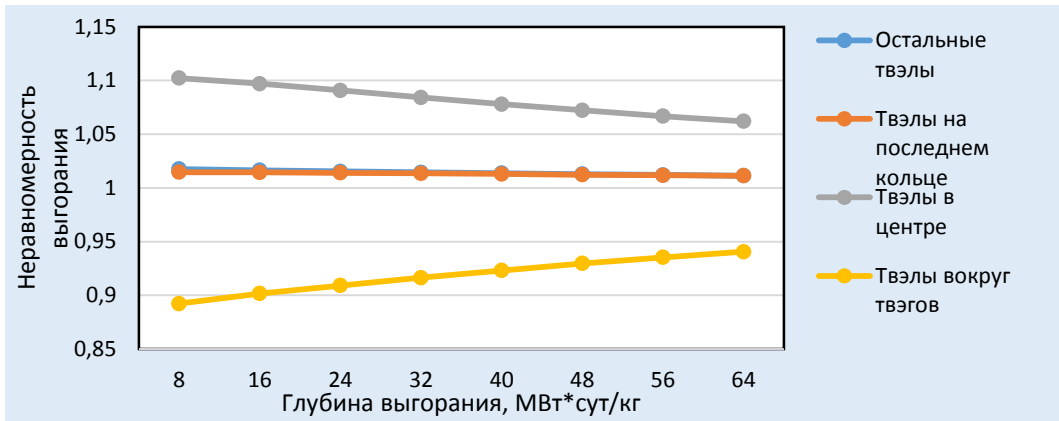


Рисунок 6. Неравномерность выгорания при твэгах в 10-м кольце
 Figure 6. Unevenness of burnout at gadolinium fuel rods in the 10th ring

По результатам, представленным на графиках, видно, что в случаях расположения твэгов в средних кольцах ТВС наблюдается меньшая неравномерность выгорания в сравнении с другими вариантами расположения. Таким образом, неравномерность энерговы-

деления и выгорания имеют одинаковую зависимость от компоновки ТВС (рис. 7).

В настоящее время в загрузках ВВЭР-1000 применяются ТВС типа U49G6, где твэги располагаются в восьмом кольце (рис. 8).

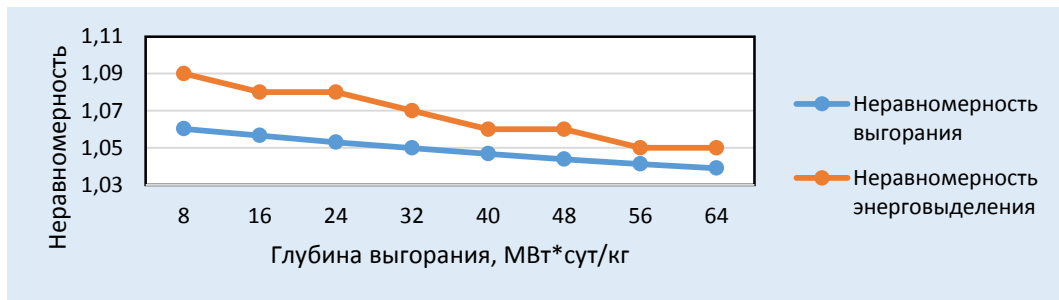


Рисунок 7. Неравномерности при расположении твэгов во 4-м кольце
 Figure 7. Irregularities in the positioning of gadolinium fuel rods in the 4th ring

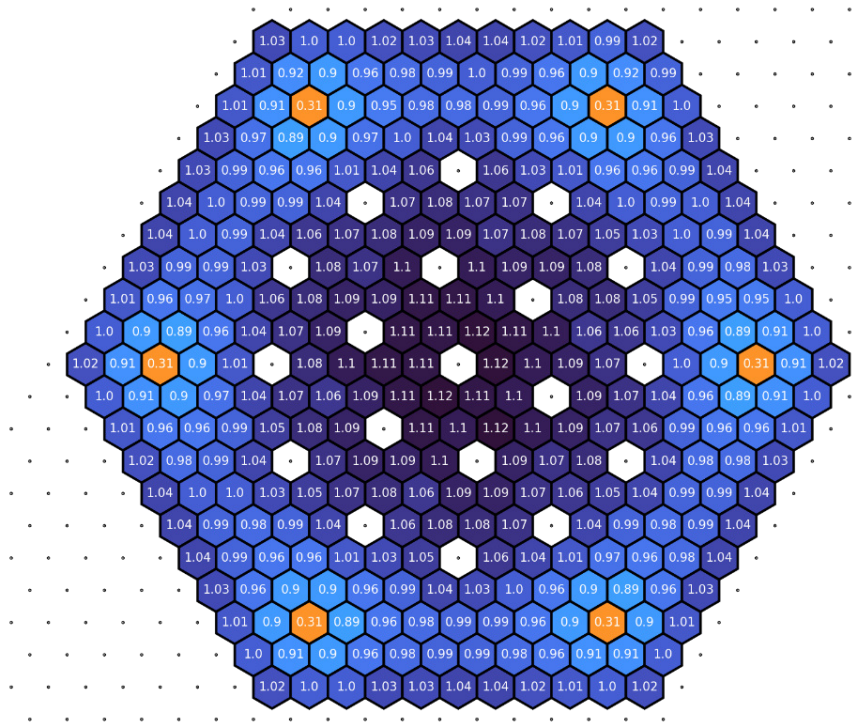


Рисунок 8. Потвэльное энерговыделение в ТВС типа U49G6
 Figure 8. Potential energy release in U49G6 type fuel assemblies

Данная сборка рассматривалась в качестве эталона, с которым можно сравнивать результаты расчетов сборок, используемых в работе. Поскольку такие кассеты применяются, и ядерная безопасность их применения обоснована, то снижение неравномерности энерговыделения и выгорания приведёт либо к дополнительной выработке тепловой энергии кассетой, либо к увеличению запасов по теплотехнической надёжности и прочности твэлов. Для оценки недовыработки в ТВС использовалась формула (2):

$$\Delta B = \sum_i (B_{max} - B_i) \cdot n, \quad (2)$$

где n – количество твэлов в i -й группе,

B_i – глубина выгорания твэлов i -й группы;

B_{max} – глубина выгорания в группе наиболее выгоревших твэлов.

Результаты расчетов при средней по ТВС глубине выгорания 64 МВт·сут/кг представлены в таблице 2.

Лучшим образом, в сравнении с эталонной сборкой, себя показала ТВС с твэгами в четвертом кольце (рис. 9), поэтому она будет использоваться для дальнейшего исследования.

Таблица 2. Влияние компоновки ТВС на глубину выгорания и недовыработку

Table 2. Effect of fuel assembly layout on burn-up depth and underproduction

| Расположение твэгов | Недовыработка в ТВС, МВт*сут/кг | Максимальная глубина выгорания, МВт*сут/кг | Минимальная глубина выгорания, МВт*сут/кг |
|---------------------|---------------------------------|--|---|
| ТВС без твэгов | 686.982 | 66.2029 | 63.7569 |
| 2 кольцо | 633.588 | 66.5911 | 58.5090 |
| 3 кольцо | 647.251 | 66.6206 | 62.0657 |
| 4 кольцо | 613.002 | 66.4973 | 62.7743 |
| 6 кольцо | 941.955 | 67.5784 | 61.4411 |
| 7 кольцо | 1043.767 | 67.8665 | 60.9249 |
| 8 кольцо (U49G6) | 1091.639 | 68.1526 | 60.6327 |
| 9 кольцо | 1102.109 | 68.1076 | 60.8108 |
| 10 кольцо | 1081.551 | 67.9694 | 60.1965 |

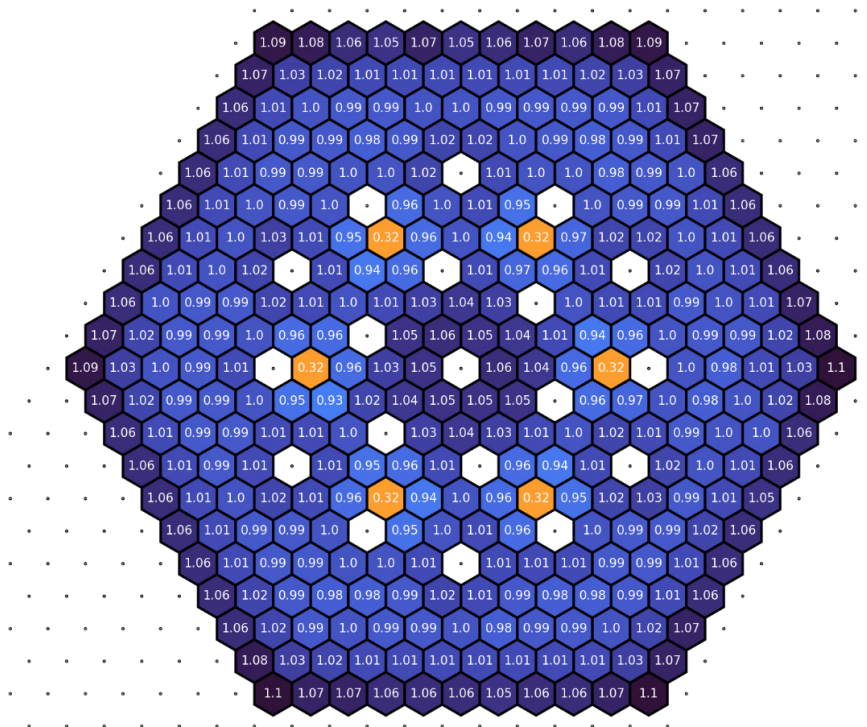


Рисунок 9. Потенциальное энерговыделение в ТВС с твэгами в 4-м кольце

Figure 9. Potential energy release in fuel assemblies with gadolinium fuel rods in the 4th ring

Проверим, есть ли необходимость в разбиении твэлов на большее количество групп, например, по кольцам. При перерасчете ТВС с твэгами в четвертом кольце для данного случая были получены результаты, приведенные в таблице 3. Посчитанная по формуле (2) недовыработка составила 617,5 МВт·сут/кг, что мало отличается от результатов, полученных в случае

разбиения твэлов на 4 группы (613, МВт·сут/кг). Разбиение на большее число групп является более точным, но в то же время требует использовать при расчете методом Монте-Карло больше оперативной памяти. Поэтому, если нет необходимости изменять обогащение отдельных твэлов, исследование можно проводить и с меньшим числом групп.

Таблица 3. Глубина выгорания в различных группах твэлов

Table 3. Burn-up depth in different fuel element groups

| № кольца | Глубина выгорания, МВт*сут/кг | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 8.4239 | 16.821 | 25.161 | 33.443 | 41.640 | 49.789 | 57.894 |
| 2 | 8.2822 | 16.564 | 24.816 | 33.031 | 41.186 | 49.303 | 57.383 | 65.431 |
| 3 | 7.9355 | 15.917 | 23.906 | 31.909 | 39.902 | 47.900 | 55.889 | 63.881 |
| 4 | 7.7675 | 15.606 | 23.475 | 31.368 | 39.282 | 47.216 | 55.169 | 63.115 |
| 5 | 7.8901 | 15.825 | 23.786 | 31.754 | 39.727 | 47.700 | 55.702 | 63.684 |
| 6 | 8.0453 | 16.094 | 24.141 | 32.183 | 40.223 | 48.262 | 56.296 | 64.322 |
| 7 | 7.9667 | 15.925 | 23.885 | 31.850 | 39.830 | 47.810 | 55.791 | 63.783 |
| 8 | 7.9231 | 15.835 | 23.752 | 31.688 | 39.639 | 47.609 | 55.581 | 63.558 |
| 9 | 8.0706 | 16.114 | 24.157 | 32.193 | 40.233 | 48.265 | 56.293 | 64.323 |
| 10 | 8.4796 | 16.902 | 25.278 | 33.605 | 41.886 | 50.126 | 58.331 | 66.513 |
| ТВЭГи | 3.0587 | 6.6185 | 10.591 | 14.970 | 19.755 | 24.938 | 30.524 | 36.475 |

Предложения по усовершенствованию компоновки ТВС

Для снижения неравномерности выгорания рассмотрен ряд вариантов с внутрикассетным профилированием обогащения ядерного топлива. Было принято решение снижать обогащение в отдельных твэлах. В разных вариантах ТВС обогащение менялось по кольцам. Сборкой, в которой удалось добиться заметного снижения недовыработки и неравномерности,

была ТВС с понижением обогащения в твэлах первого, второго и десятого колец. При этом, общее количество урана-235 в кассете было сохранено, недостаток обогащения был равномерно распределён между остальными твэлами. Обогащение первого и десятого колец было снижено на 0,3%, второго на 0,1%. Результаты расчёта глубины выгорания по кольцам ТВС с предлагаемой схемой профилирования приведены в таблице 4.

Таблица 4. Глубина выгорания в различных группах твэлов с уменьшенным обогащением в 10-м кольце

Table 4. Burn-up depth in different groups of fuel elements with reduced enrichment in the 10th ring

| № кольца | Глубина выгорания, МВт*сут/кг | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 8.4599 | 16.890 | 25.265 | 33.580 | 41.823 | 49.994 | 58.125 |
| 2 | 8.3075 | 16.608 | 24.897 | 33.128 | 41.327 | 49.476 | 57.604 | 65.688 |
| 3 | 7.9501 | 15.942 | 23.959 | 32.001 | 40.029 | 48.074 | 56.113 | 64.137 |
| 4 | 7.7974 | 15.665 | 23.566 | 31.496 | 39.450 | 47.419 | 55.391 | 63.369 |
| 5 | 7.9233 | 15.897 | 23.892 | 31.896 | 39.918 | 47.940 | 55.965 | 63.994 |
| 6 | 8.0981 | 16.196 | 24.297 | 32.390 | 40.471 | 48.545 | 56.606 | 64.664 |
| 7 | 8.0272 | 16.037 | 24.052 | 32.070 | 40.087 | 48.111 | 56.134 | 64.153 |
| 8 | 8.0006 | 15.989 | 23.977 | 31.972 | 39.978 | 47.984 | 55.991 | 63.992 |
| 9 | 8.1992 | 16.346 | 24.465 | 32.574 | 40.671 | 48.747 | 56.806 | 64.850 |
| 10 | 8.1984 | 16.372 | 24.514 | 32.626 | 40.709 | 48.781 | 56.847 | 64.911 |
| ТВЭГи | 3.0666 | 6.6398 | 10.639 | 15.037 | 19.856 | 25.073 | 30.690 | 36.682 |

Полученная компоновка ТВС имеет недовыработку равную 1,02 МВт*сут/кг при общей выработке 34486,38 МВт*сут. Коэффициент неравномерности энерговыделения в начале и в конце кампании равен 1,06 и 1,04 соответственно, а коэффициент неравномерности по выгоранию составил 1,015. Максимальное выгорание снизилось до 64,97 МВт*сут/кг при среднем значении 64,0 МВт*сут/кг. В этом случае недовыработка составила 462 МВт*сут на одну ТВС, что меньше недовыработки и в исходном варианте U49G6, и в предложенном варианте с твэгами в четвёртом кольце.

Кроме того, на графике энерговыделения для непрофилированной ТВС (см. рис. 9) есть заметные пи-

ки энерговыделения в угловых твэлах. В случае с уменьшением обогащения в том же кольце данные пики снизились с 1,10 до 1,06 в относительных величинах (рис. 10).

Выводы

В работе построена и проанализирована модель ТВС ВВЭР-1000 для расчёта потвэльного распределения энерговыделения и глубины выгорания методом Монте-Карло. Рост количества выгорающих материалов слабо влияет на точность результатов, но при этом требует больше вычислительных ресурсов.

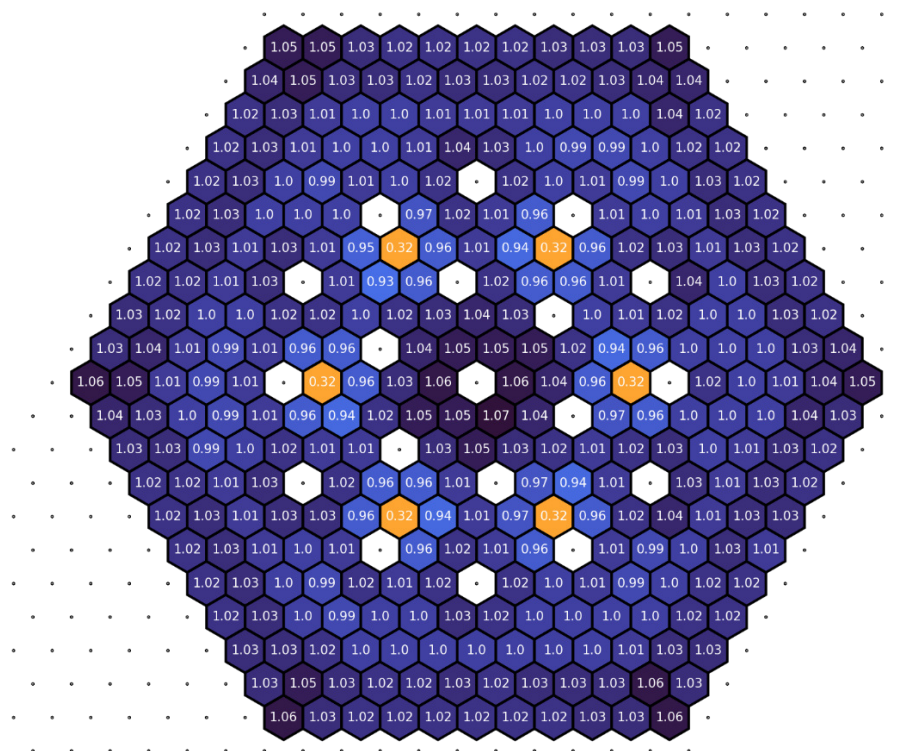


Рисунок 10. Потвэльное энерговыделение в ТВС с твэгами в 4-м кольце и с понижением обогащения в твэлах 10-го кольца

Figure 10. Potential energy release in fuel assemblies with gadolinium fuel rods in the 4th ring and with decreasing enrichment in fuel elements of the 10th ring

Расположение твэгов в ТВС оказывает заметное влияние на распределение поля энерговыделения и глубины выгорания в ТВС реактора ВВЭР-1000. На примере множества кассет с шестью твэгами установлено, что расположение твэгов в 4-м кольце показывает лучшие результаты по неравномерности энерговыделения.

Для оценки экономического ущерба от неравномерности энерговыделения в ТВС можно определить недовыработку энергии с помощью формулы (2). ТВС с твэгами в 4-м кольце показала меньшую недовыработку в сравнении с прочими вариантами кассет с шестью твэгами.

Дальнейшего снижения неравномерности выгорания топлива в ТВС возможно добиться применением

профилирования – выделения групп твэлов различного обогащения. Многовариантные расчёты позволили предложить усовершенствованную компоновку ТВС, позволяющую уменьшить потвэльную неравномерность энерговыделения и выгорания топлива в сравнении с используемой в топливных загрузках ВВЭР-1000 ТВС типа U49G6. Для этого следует снизить обогащение в первом, втором и десятом гексагональных кольцах, считая от центральной трубы. Дополнительная выработка при этом при условии оптимального проектирования топливной загрузки составит до 462 МВт·сут с одной усовершенствованной кассеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Внуков Р.А., Жаворонкова И.А., Колесов В.В., Карпович Г.В. Подходы к оптимизации глубины выгорания с помощью радиального профилирования твэга. *Ученые записки физического факультета московского университета*. 2021;1:2110303. Режим доступа: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2021/1/2110303.pdf> (дата обращения: 29.08.2023).
2. Внуков Р.А., Колесов В.В., Жаворонкова И.А., Котов И.А., Праманик М.Р. Влияние выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;(2):27–37. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03>
3. Соболев А.В., Каражелевская Ю.Е., Зубков А.А. Анализ неравномерности высотной глубины выгорания топлива в сборках ВВЭР-1000 при работе на низких уровнях мощности. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;2(92):10–16. EDN HLBFB0 <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2019.92.2.002>
4. Внуков В.С., Куликов В.И., Чукатели Л.И. Влияние аксиального распределения глубины выгорания ОТВС на значение $K_{эфф}$ контейнеров с отработавшим ядерным топливом. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2015;2:108–116. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.2.11>
5. Абу Сондос М.А. Демин В.М., Савандер В.И. Сравнение влияния выгорающих поглотителей (Gd и Eu) на нейтронно-физические характеристики ТВС реакторов ВВЭР-1000. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2019;8(3):199–205. EDN WBOFAI. <https://doi.org/10.1134/S2304487X19030027>

6. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлинённых кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(2):42-55. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>

7. Бергельсон Б.Р. [и др.] Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями. *Атомная энергия*. 2010;109(4):240–245. Режим доступа: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t109-4_2010/go,14/ (дата обращения: 29.08.2023).

8. Бикеев А.С., Дайченкова Ю.С., Калугин М.А., Шкаровский Д.А. Оптимизация параметров расчётной схемы при моделировании выгорания активной зоны ВВЭР-1000 по прецизионной программе MCU. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2018;4:5–14. Режим доступа: URL: <https://vant.ippe.ru/year2018/4/neutron-constants/1559-1.html> (дата обращения: 30.09.2023).

9. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2014;82:06021 <https://doi.org/10.1051/snanc/201406021>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Лапкис А.А. – постановка задач, определение методики исследования;

Старченко А.С. – выполнение расчётов.

Тришечкин Д.В. – литературный обзор, анализ достоверности и сходимости результатов

Попова И.Ю. – анализ и визуализация результатов

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Аркадьевич Лапкис, к.т.н., доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; ведущий инструктор учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Александр Сергеевич Старченко, 5 курс 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8797-5831>

e-mail: shura.star2001@mail.ru

Дмитрий Витальевич Тришечкин, 5 курс 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7402-7224>

e-mail: shuh.red@yandex.ru

Ирина Юрьевна Попова, к.б.н., доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: YPopova@mephi.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023

После доработки 21.11.2023

Принята к публикации 23.11.2023

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Lapkis A.A. – setting the objectives, defining the research methodology;

Starchenko A.S. – making calculations;

Trishechkin D.V. – literature review, analysis of reliability and convergence of results;

Popova I.Yu. – analysing and visualising results.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Senior Instructor of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant – branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Aleksandr S. Starchenko, 5th-year student of «Nuclear Power Plants: Design, Operation and Engineering» Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8797-5831>

e-mail: shura.star2001@mail.ru

Dmitry V. Trishechkin, 5th-year student of «Nuclear Power Plants: Design, Operation and Engineering» Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7402-7224>

e-mail: shuh.red@yandex.ru

Irina Yu. Popova, Cand. Sci. (Bio.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: YPopova@mephi.ru

Received 17.10.2023

Revision 21.11.2023

Accepted 23.11.2023