

УДК 621.039.5

Математическое моделирование и оптимизация дожигания топлива при выводе из эксплуатации реактора РБМК

© 2025 г. А. М. Загребаяев, Г. А. Литвинова, А. С. Ястребов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

Для АЭС с реакторами типа РБМК ставится и решается физическая задача о выборе временного сдвига между остановами энергоблоков с целью максимального использования энергоресурса топлива реакторов, выводимых из эксплуатации. В основу математической модели при решении оптимизационной задачи положена точечная модель динамики распределения тепловыделяющей сборки (ТВС) по энерговыработкам (спектра ТВС), позволяющая прогнозировать изменение спектра ТВС во времени в работающем реакторе в зависимости от тактики подгрузки выгоревших ТВС из остановленного реактора. Показано, что оптимальное планирование сдвига между остановами энергоблоков позволяет сэкономить сотни «свежих ТВС» в зависимости от выбранной стратегии дожигания топлива. В работе исследуется сценарий, при котором один из реакторов остановлен, а второй продолжает работу в течение ограниченного времени. Изучается возможность подгрузки топлива из первого реактора во второй с целью минимизации общего расхода свежих ТВС. Предлагаемый подход учитывает как физические, так и технологические ограничения. Приведены результаты численного моделирования, демонстрирующие эффективность предложенного алгоритма перераспределения топлива. Полученные данные могут быть использованы при планировании вывода энергоблоков из эксплуатации с целью повышения топливной эффективности и снижения затрат на закупку свежих ТВС.

Ключевые слова: дожигание топлива, РБМК, тепловыделяющая сборка, вывод из эксплуатации, оптимизация, энергоресурс, перегрузка, межреакторное использование топлива, математическая модель.

Введение

Характерной особенностью реакторов РБМК является непрерывная перегрузка топлива. Обычно за сутки перегружается одна-две тепловыделяющие сборки: наиболее выгоревшее топливо заменяется свежим [1].

При этом за время эксплуатации формируется определенный спектр ТВС по энерговыработкам, в котором присутствуют как мало, так и сильно выгоревшие ТВС. На рис. 1. показано распределение ТВС по энерговыработке для одного из энергоблоков Курской АЭС. Таким образом, при останове реактора остается не выработанный энергоресурс тепловыделяющих сборок и возникает возможность использовать его в других еще работающих энергоблоках¹ [2–5]. (Отметим также, что помимо оптимального использования энергоресурса рассматриваются в литературе и задачи по оптимальному использованию ресурса по наработке приборов и оборудования реакторов, выводимых из эксплуатации [6]). Возможны различные постановки задач по использованию энергоресурса ТВС при выводе реактора

¹ Вопросы управления жизненным циклом АЭС. [Электронный ресурс] URL: <https://energypolicy.ru/voprosy-upravleniyazhiznennym-ciklom-aes/energetika/2023/19/24/> (дата обращения: 30.05.24).

✉ А. С. Ястребов: yastrebovstuff@gmail.com

Поступила в редакцию: 31.07.2025

После доработки: 14.08.2025

Принята к публикации: 09.09.2025

EDN GCYQRI

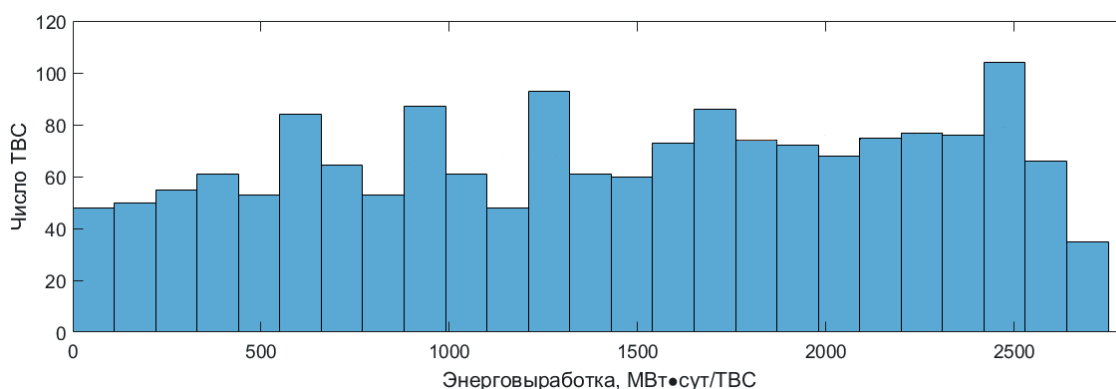


Рис. 1. Распределение спектра ТВС по энерговыработке

из эксплуатации. Например, в работе [7] предлагается продлить работу выводимого из эксплуатации реактора без подпитки топливом за счет пространственного перераспределения ТВС по активной зоне. Рассматривались две стратегии перестановок ТВС.

Удаление выгоревших ТВС и смещение невыгоревших ТВС к центру активной зоны.

Создание двух зон. В центральной зоне мало выгоревшие ТВС, а в периферийной – выгоревшие.

И в том, и в другом случае обеспечивалась критичность реактора, но мощность постепенно падала. Получено, что реактор с выгрузкой может после прекращения подпитки топливом выработать еще ~ 170 ГВт·сут тепловой энергии до полной потери критичности, при этом, однако, его мощность снижается до 25 % номинальной. Невыработанный ресурс – число ТВС, оставшихся в активной зоне, которые могли бы быть использованы, после останова реактора составит 366 в пересчете на свежее топливо. Это на 48 % меньше, чем если бы реактор просто был остановлен. При использовании двухзонной загрузки реактор может выработать до 400 ГВт·сут энергии до полной потери критичности, однако к моменту его останова мощность снижается до 14 % номинальной. Количество невыработанного ресурса уменьшается до 311 свежих ТВС, что на 56 % меньше, чем в случае простого останова.

Указанные оценки являются предельными до полного исчерпания запаса реактивности и получены на основе упрощенной модели реактора типа РБМК с линейной зависимостью мощности и коэффициента размножения.

В работе [8] исследовалась возможность оптимизации использования энергоресурса топлива в целом для АЭС, состоящей из четырех энергоблоков. Рассматривались различные варианты дожигания топлива при последовательном выводе энергоблоков из эксплуатации. Задача решалась в «точечном» по пространству приближении. Учитывались как физические (например, на величину парового коэффициента реактивности), так и технологические (время выдержки в бассейне) ограничения, связанные с возможностью повторного использования топлива. Приведены результаты расчетов для Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС. Эффект экономии свежих ТВС при оптимальном режиме для ЛАЭС, КуАЭС и САЭС, соответственно, составил 1400, 1416 и 1186 тепловыделяющих сборок.

В данной работе ставится и решается задача об оптимальном дожигании топлива из остановленного реактора в последнем из действующих реакторов, выводимых из эксплуатации. Отличие от рассмотренных выше постановок и подходов к решению оптимизационных задач заключается в следующем. Если в работе [2] рассматривается реактор, выводимый из эксплуатации без подпитки топливом, то в данной работе в реакторе дожигается топливо из остановленного реактора и при расчетах используется математическая модель динамики спектра в дискретном варианте.

Таким образом, рассматривается следующая постановка оптимизационной задачи.

Энергосистема состоит из двух реакторов типа РБМК: один из них остановлен, останов второго реактора планируется через время T . В остановленном реакторе остались ТВС всего спектра выгорания, и они могут быть использованы во втором реакторе. Требуется найти такую перегрузку топлива из остановленного реактора в работающий, чтобы к моменту останова второго реактора энергоресурс системы и суммарная подпитка свежим топливом были минимальны.

Математическая постановка задачи

Пусть $n(E, t)$ – спектр ТВС работающего реактора в момент времени t ; $n_{\text{ост}}(E, t)$ – спектр ТВС остановленного реактора в момент времени t ; T – планируемое время останова работающего реактора; $F(E, t)$ – функция перегрузки топлива из остановленного реактора в работающий; $q(t)$ – подпитка топливом работающего реактора для поддержания критичности в момент времени t ; E_m – максимальная возможная по технологическим причинам энерговыработка выгружаемой ТВС. Остаточный ресурс реактора в пересчете на свежие ТВС можно найти следующим образом:

$$R(T) = \int_0^{E_m} \frac{E_m - E}{E_m} n(E, T) dE. \quad (1)$$

Общая подпитка за период времени T составляет:

$$Q(T) = \int_0^T q(t) dt. \quad (2)$$

Тогда функционал, который необходимо минимизировать, выражается в числе свежих ТВС и записывается следующим образом:

$$f(T) = \int_0^{E_m} \frac{E_m - E}{E_m} n_{\text{ост}}(E, T) dE + \int_0^{E_m} \frac{E_m - E}{E_m} n(E, T) dE + \int_0^T q(t) dt. \quad (3)$$

Основное уравнение, описывающее взаимодействие двух реакторов:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{-\partial n}{\partial E} (W_0 - BE) + Bn(E, t) + F(E, t) + q(t). \quad (4)$$

При этом на систему наложены следующие ограничения на критичность, размер активной зоны и перегрузку топлива:

$$\begin{cases} K_{\min} \leq K_{\text{эф}} \leq K_{\max} \quad \forall t \in [0, T]; \\ \int_0^{E_m} n(E, t) dE \leq N_{\max} \quad \forall t \in [0, T]; \\ 0 \leq F(E, t) \leq n_{\text{ост}}(E, t) \quad \forall t \in [0, T]. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим ограничение на эффективный коэффициент размножения для бесконечного цилиндрического гомогенного реактора без учета аксиальной утечки. Условие критичности такого реактора в момент времени t :

$$\frac{\bar{K}_{\infty}(t) / K_{\text{эф}} - 1}{M^2} = \left(\frac{2.405}{R(t)} \right)^2, \quad (6)$$

где $\bar{K}_{\infty}(t)$ – коэффициент размножения в бесконечной среде; $R(t)$ – радиус АЗ реактора в момент времени t .

В условиях введенной математической модели спектра ТВС:

$$\bar{K}_{\infty}(t) = \int_0^{E_m} (K_0 - AE) n(E, t) dE \bigg/ \int_0^{E_m} n(E, t) dE. \quad (7)$$

Размер АЗ можно описать следующим соотношением (площадь АЗ равна произведению числа ТВС в ней на размер одной ТВС):

$$\pi R^2(t) = a^2 \int_0^{E_m} n(E, t) dE. \quad (8)$$

Таким образом, для бесконечного цилиндрического реактора получим ограничение:

$$K_{\text{эф}}(t) = \bar{K}_{\infty}(t) / \left(1 + \left(\frac{M \cdot 2.405}{R(t)} \right)^2 \right), \quad (9)$$

$$K_{\min} \leq K_{\text{эф}}(t) \leq K_{\max}. \quad (10)$$

Варьируя $K_{\min}$, можно заложить аксиальную утечку и задавать оперативный запас реактивности. Итак, математически постановка задачи выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \min_{F(E, t)} \left(\int_0^{E_m} \frac{E_m - E}{E_m} n_{\text{ост}}(E, T) dE + \int_0^{E_m} \frac{E_m - E}{E_m} n(E, T) dE + \int_0^T q(t) dt \right); \\ \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{-\partial n}{\partial E} (W_0 - BE) + Bn(E, t) + F(E, t) + q(t); \\ K_{\min} \leq K_{\text{эф}} \leq K_{\max} \quad \forall t \in [0, T]; \\ \int_0^{E_m} n(E, t) dE \leq N_{\max} \quad \forall t \in [0, T]; \\ 0 \leq F(E, t) \leq n_{\text{ост}}(E, t) \quad \forall t \in [0, T]; \\ n(E, 0) = n_{\text{ост}}(E, 0) = \frac{q_0}{W_0 - BE}. \end{cases} \quad (11)$$

Для упрощения поиска минимума предлагается искать оптимальный способ перегрузки $F(E, t)$ среди ограниченного множества стратегий. Данную систему предлагается решать численными методами, записав уравнения и ограничения в разностном виде.

Численное решение задачи нелинейного программирования

Введем сетку $M \times N$ с шагом ΔE по энергосодержанию ($j \in [0, M]$, $M = E_m/\Delta E$) и Δt по времени ($i \in [0, N]$, $N = T/\Delta t$). Запишем уравнение выгорания топлива в разностной форме, используя шаблон на рис. 2:

$$\frac{n^{i+1, j} - n^{i, j}}{\Delta t} = (W_0 - Bj\Delta E) - \left(\frac{n^{i, j} - n^{i, j-1}}{\Delta E} \right) + Bn^{i, j}, \quad i \in [0, N-1], j \in [1, M]. \quad (12)$$

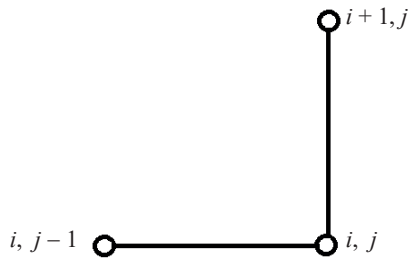


Рис. 2. Шаблон явной схемы

Отсюда можно выразить множество точек спектра на $(i + 1)$ -м слое по времени:

$$n^{i+1,j} = n^{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta E} (W_0 - Bj\Delta E)(n^{i,j} - n^{i,j-1}) + B\Delta t n^{i,j}. \quad (13)$$

Определим теперь изменения спектра вставке ТВС. Пусть вставляется ТВС с энерговыработкой от E_1 до E_2 . Полагаем, что вставка – равномерная. Тогда

$$F^{i,j} = \frac{n}{(j_2 - j_1) \cdot E}. \quad (14)$$

Подпитку свежим топливом q^i можно моделировать с помощью «вставки» топлива с энерговыработкой $[0, \Delta E]$.

Для моделирования перегрузки и подпитки сделаем допущение: положим, что подпитка и перегрузка топлива являются моментальной процедурой, не меняющей спектр в динамике. Тогда, если в момент времени t происходит подпитка и перегрузка, то точки спектра на $i + 1$ слое:

$$n^{i+1,j} = n^{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta E} (W_0 - Bj\Delta E)(n^{i,j} - n^{i,j-1}) + B\Delta t n^{i,j} + F^{i,j} + q^i. \quad (15)$$

Запишем в разностной форме минимизируемый функционал:

$$f(T) = \sum_{j=0}^M \frac{E_m - j\Delta E}{E_m} n^{N,j} \Delta E + \sum_{j=0}^M \frac{E_m - j\Delta E}{E_m} n_{\text{ост}}^{N,j} \Delta E + \sum_{i=0}^N q^i. \quad (16)$$

Запишем также выражения для числа ТВС и эффективного коэффициента размножения:

$$N^i = \Delta E \sum_{j=0}^M n^{i,j}, \quad (17)$$

$$K_{\text{эф}}^i = \bar{K}_{\infty}^i / \left(1 + \left(\frac{M 2.405}{R^i} \right)^2 \right), \quad (18)$$

$$\bar{K}_{\infty}^i = \sum_{j=0}^M (K_0 - Aj\Delta E) n^{i,j} / \sum_{j=0}^M n^{i,j}, \quad (19)$$

$$\pi(R^i)^2 = a^2 \Delta E \sum_{j=0}^M n^{i,j}. \quad (20)$$

Итак, в дискретном виде задача ставится следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_F \left(\sum_{j=0}^M \frac{E_m - j\Delta E}{E_m} n^{N,j} \Delta E + \sum_{j=0}^M \frac{E_m - j\Delta E}{E_m} n_{\text{ост}}^{N,j} \Delta E + \sum_{i=0}^N q^i \right); \\ n^{i+1,j} = n^{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta E} (W_0 - Bj\Delta E)(n^{i,j} - n^{i,j-1}) + B\Delta t n^{i,j} + F^{i,j} + q^i; \\ K_{\min} \leq K_{\text{эф}}^i \leq K_{\max} \quad \forall i \in [0, N]; \\ N^i \leq N_{\max} \quad \forall i \in [0, N]; \\ 0 \leq F^{i,j} \leq n_{\text{ост}}^{i,j}; \\ n_{\text{ост}}^{0,j} = n_{\text{ост}}^{0,j} = q_0 / (W_0 - Bj\Delta E). \end{array} \right. \quad (21)$$

Решение предлагается находить из ограниченного множества стратегий перегрузки. В данной работе рассматриваются две стратегии.

1. Каждые сутки из остановленного реактора в работающий переставляется n ТВС с энерговыработкой $[E_{\min}; E_{\min} + \delta E]$, где $E_{\min}$ – минимальное значение энерговыработки топлива, оставшегося в реакторе; δE – выбранный разброс энерговыработки (стратегия «от свежего к выгоревшему»).

2. Каждые сутки из остановленного реактора поочередно переставляется n ТВС с энерговыработкой либо $[E_{\min}; E_{\min} + \delta E]$, либо $[E_{\text{сред}} - \delta E/2; E_{\text{сред}} + \delta E/2]$, где $E_{\min}$ – минимальное значение энерговыработки топлива, оставшегося в реакторе, а $E_{\text{сред}} = \frac{E_{\min} + E_m}{2}$ – середина спектра (стратегия «переменная перегрузка»).

Предлагается следующий алгоритм для моделирования:

- 1) раз в сутки происходит перестановка ТВС из остановленного реактора в работающий согласно выбранной стратегии;
- 2) если критичности реактора не хватает, вставляется свежее топливо;
- 3) если число ТВС в АЗ превышено, а условие критичности не выполняется, из работающего реактора выгружается наиболее выгоревшее топливо;
- 4) до следующих суток перегрузки не происходит.

Исследование различных стратегий перегрузки топлива

На рис. 3 показана зависимость остаточного энергоресурса топлива от планируемого времени останова действующего реактора при различных стратегиях перегрузки. Из рисунка видно, что оптимальным является останов реактора примерно через 400–500 сут. после останова предыдущего блока. При этом перегружается ежедневно две ТВС, и стратегия перегрузки («от свежего к выгоревшему» или «переменная перегрузка») дает приблизительно одинаковые результаты.

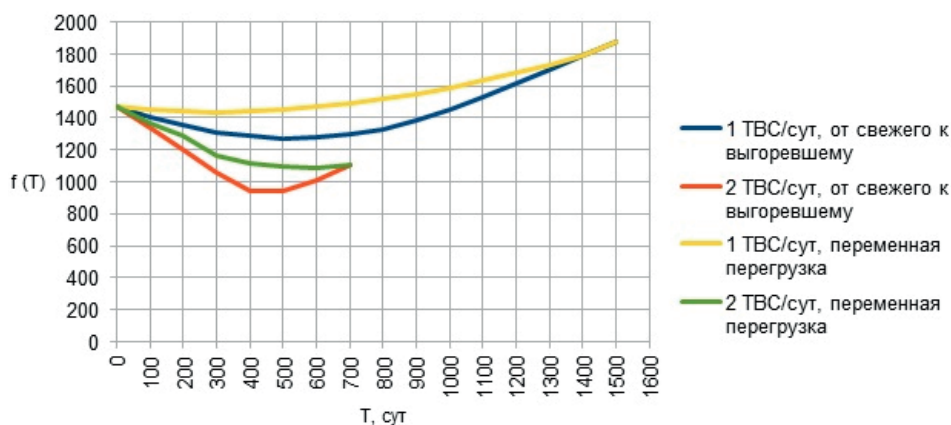


Рис. 3. Зависимость значения оптимизируемого функционала от времени останова работающего реактора при различных стратегиях перегрузки

Характер приведенных зависимостей отражает физический факт того, что сначала значение остаточного ресурса в системе убывает за счет дожигания топлива из остановленного реактора в работающем. При этом за счет использования наименее выгоревшего топлива из остановленного реактора работающий реактор сохраняет свою критичность без подпитки свежим топливом. Далее, когда мало выгоревшее топливо в остановленном реакторе заканчивается, возрастает потребность в подпитке свежим топливом. Полученный результат в целом совпадает с выводами об оптимальном дожигании топлива в РБМК, изложенными в работе [1]. А именно, если планировать перегрузку через 600 эффективных суток, то экономится 400 свежих ТВС, и можно обойтись без подпитки свежим топливом.

Таким образом, поставлена и решена задача оптимизации режима дожигания топлива остановленного реактора в работающем для минимизации подпитки и остаточного энергоресурса в системе. Исследованы различные способы перегрузки топлива, для каждого из них найдено оптимальное время останова работающего реактора. Вместе с тем понятно, что при реальном планировании времени останова энергоблока помимо физических соображений должны учитываться ограничения технологического и иного характера. Поэтому приведенные результаты имеют принципиальный характер и позволяют оценить потери при отходе от физически оптимального решения.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

А.М. Загребаев – разработка математической модели; формулировка идеи и целей исследования; постановка задачи; выбор методов исследования; подбор литературных источников.

Г.А. Литвинова – анализ нормативной базы; постановка эксперимента; разработка концепции исследования.

А.С. Ястребов – анализ нормативной базы; выполнение экспериментальных работ; обработка результатов; проведение численных расчетов; редактирование текста статьи.

Список литературы

1. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный энергетический ядерный реактор. М.: Атомиздат, 1980.
2. Краюшкин А.В., Новиков В.Г., Федосов А.М., Ушпурас Е., Римкявичус С, Кривошеин Г.С. Оптимальное дожигание топлива 1-го энергоблока в реакторе 2-го энергоблока Игналинской станции // Физические проблемы топливных циклов ядерных реакторов. Материалы XIV семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 4–8 сентября 2006 г. М.: МИФИ, 2006. С. 100–102.
3. Канашов Б.А., Кузьмин И.В., Костюченко А.Н., Перепелкин С.О., Чесанов В.В. Оценка остаточного ресурса ТВС из остановленных энергоблоков РБМК-1000 для дожигания на действующих энергоблоках АЭС // Сб. докладов X Международного форума «Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов – «Атомтранс-2015». С.-Петербург, 5–9 октября 2015 г.
4. Кузнецов В.М., Юрчевский Е.Б., Амерханов Р.А., Спиридонов В.П. Вопросы обеспечения безопасности и технические аспекты вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Энергосбережение и водоподготовка, 2022. № 2 (136). С. 57–69.
5. Хомяков Д.Н., Меньшиков В.Ф. Снятие с эксплуатации энергоблоков АЭС // Сборник докладов Всероссийской конференции «Энергетика России в 21 веке: проблемы и научные основы устойчивого и безопасного развития», 2000.
6. Загребаев А.М., Евстюхина Е.В., Ястребов А.С., Андреев М.Г. Математическое моделирование и стратегия использования остаточного ресурса расходомеров остановленных энергоблоков РБМК в процессе вывода АЭС из эксплуатации // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2025. Т. 14. № 2. С. 149–156.
7. Загребаев А.М., Залужная Г.А., Наумов В.И. Упрощенная математическая модель и реализация остаточного ресурса ядерного топлива при выводе из эксплуатации реактора типа РБМК // Атомная энергия, 2018. Т. 125. Вып. 5. С. 255–258.
8. Федосов А.М. Оптимальное использование топлива при выводе АЭС с РБМК из эксплуатации // Атомная энергия, 2007. Т. 102. Вып. 5. С. 284–290.

Mathematical modeling and optimization of fuel utilization in the decommissioning of an RBMK reactor

A. M. Zagrebaev, G. A. Litvinova, A. S. Yastrebov ✉

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

✉ yastrebovstuff@gmail.com

Received July 31, 2025; revised August 14, 2025; accepted September 09, 2025

For NPPs with RBMK reactors, a physical problem of choosing a time shift between power unit shutdowns is formulated and solved in order to maximize the use of the fuel energy resource of reactors being decommissioned. The mathematical model used to solve the optimization problem is based on a point model of the fuel assembly distribution dynamics by energy production (fuel assembly spectrum), which allows predicting the change in the fuel assembly spectrum over time in an operating reactor depending on the tactics of loading burnt-out fuel assemblies from a shut-down reactor. It is shown that optimal planning of the shift between power unit shutdowns allows saving hundreds of «fresh fuel assemblies» depending on the selected fuel afterburning strategy. The paper examines a scenario in which one of the reactors is shut down and the second one continues to operate for a limited time. The possibility of loading fuel from the first reactor to the second one is studied in order to minimize the total consumption of fresh fuel assemblies. The proposed approach takes into account both physical and technological limitations. The results of numerical modeling are presented, demonstrating the efficiency of the proposed fuel redistribution algorithm. The obtained data can be used in planning the decommissioning of power units in order to increase fuel efficiency and reduce the costs of purchasing fresh fuel assemblies.

Keywords: fuel burnup, RBMK, fuel assembly, decommissioning, optimization, fuel resource, refueling, inter-reactor fuel transfer, mathematical model.

References

1. Dollezhal N.A., Emel'yanov I.Ya. Kanal'nyj energeticheskij yadernyj reaktor [Channel-type power nuclear reactor]. Moscow: Atomizdat Publ., 1980 (in Russian).
2. Krayushkin A.V., Novikov V.G., Fedosov A.M., Ushpuras E., Rimkyavichus S., Krivoshein G.S. Optimal'noe dozhiganie topliva 1-go energobloka v reaktore 2-go energobloka Ignalinskoj stantsii [Optimal fuel burnup of Unit 1 in the reactor of Unit 2 at the Ignalina nuclear power plant]. Fizicheskie problemy toplivnykh tsiklov yadernykh reaktorov. Materialy XIV seminarov po problemam fiziki reaktorov [Proc. XIV Seminar on Reactor Physics Problems]. Moscow, 4–8 September 2006. Moscow: MIFI, 2006. Pp. 100–102 (in Russian).
3. Kanashov B.A., Kuzmin I.V., Kostyuchenko A.N., Perepelkin S.O., Chesanov V.V. [Assessment of the residual resource of fuel assemblies from shutdown RBMK-1000 units for further burnup in operating NPP units]. Sb. dokladov X Mezhdunarodnogo foruma «Bezopasnost' yadernykh tekhnologij: transportirovanie radioaktivnykh materialov – «Atomtrans-2015» [Collection of reports from the X International Forum «Safety of Nuclear Technologies: Transportation of Radioactive Materials – Atomtrans-2015»] (in Russian).
4. Kuznetsov V.M., Yurcheskiy E.B., Amerkhanov R.A., Spiridonov V.P. Voprosy obespecheniya bezopasnosti i tekhnicheskie aspekty vyvoda iz ekspluatatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energetiki [Safety assurance and technical aspects of decommissioning of nuclear power facilities]. Energobezopasnost' i Vodopodgotovka, 2022. No. 2 (136). Pp. 57–69 (in Russian).
5. Khomyakov D.N., Menshikov V.F. Snyatie s ekspluatatsii energoblokov AES [Decommissioning of NPP units]. Sbornik dokladov Vserossijskoj konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke: problemy i nauchnye osnovy ustojchivogo i bezopasnogo razvitiya» [Proc. All-Russian Conference «Power Industry of Russia in the 21st Century: Problems and Scientific Foundations of Sustainable and Safe Development»], 2000 (in Russian).
6. Zagrebaev A.M., Evstyukhina E.V., Yastrebov A.S., Andreev M.G. Matematicheskoe modelirovanie i strategiya ispol'zovaniya ostatotochnogo resursa raskhodomerov ostanovlennykh energoblokov RBMK v protsesse vyvoda AES iz

ekspluatatsii [Mathematical modeling and strategy for utilizing the remaining resource of flow meters from shutdown RBMK units during the decommissioning of nuclear power plants]. Vestnik NIYaU MIFI, 2025. Vol. 14. No. 2. Pp. 149–156 (in Russian).

7. Zagrebaev A.M., Zaluzhnaya G.A., Naumov V.I. Uproshchennaya matematicheskaya model' i realizatsiya ostatotochnogo resursa yadernogo topliva pri vyvode iz ekspluatatsii reaktora tipa RBMK [Simplified mathematical model and implementation of the residual resource of nuclear fuel during the decommissioning of an RBMK-type reactor]. Atomnaya Energiya, 2018. Vol. 125. No. 5. Pp. 255–258 (in Russian).

8. Fedosov A.M. Optimal'noe ispol'zovanie topliva pri vyvode AES s RBMK iz ekspluatatsii [Optimal fuel utilization in the decommissioning of NPPs with RBMK reactors]. Atomnaya Energiya, 2007. Vol. 102. No. 5. Pp. 284–290 (in Russian).