

Извлечение из высокоактивных отходов переработки отработавшего ядерного топлива долгоживущих актиноидов и их последующая утилизация в ЖСР-С позволят замкнуть ядерный топливный цикл по актиноидам, сократить объем высокоактивных отходов переработки отработавшего топлива ВВЭР-1000, -1200, снизить затраты на длительное хранение и последующее захоронение и тем самым повысить коммерческую привлекательность и общественную приемлемость ядерной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В.М., Игнатьев В.В., Федулов В.И., Чередников В.Н. Жидкосольевые ЯЭУ: перспективы и проблемы. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Игнатьев В.В., Фейнберг О.С., Загнитко А.В. и др. Жидкосольевые реакторы — новые возможности, проблемы и решения. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 3, с. 157—165.
3. Татауров А.Л., Фейнберг О.С. Жидкосольевой реактор для производства ^{99}Mo . — Там же, 2017, т. 122, вып. 5, с. 250—253.

Поступила в Редакцию 18.02.18

УДК 621.039.566.6

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА ТИПА РБМК

Загребаяев А.М., Залужная Г.А., Наумов В.И. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Вывод ядерных энергоблоков из эксплуатации является сложной и многогранной задачей, одним из аспектов которой является оптимальное использование отработавшего топлива. Так, повторное применение отработавшего топлива остановленного РБМК в других реакторах позволяет сэкономить значительное количество свежего топлива — от десятков до сотен и даже тысяч ТВС [1]. Однако есть возможность оптимизации топливного ресурса не только в других реакторах, но и внутри каждого энергоблока АЭС за счет внутренних перестановок ТВС.

Физические и конструктивные особенности РБМК (возможность перестановок ТВС в процессе работы) позволяют реализовать разные подходы к формированию критической загрузки без подпитки свежим топливом, например, выгружая наиболее выгоревшее топливо или формируя многозонную, в частности, двухзонную загрузку с размещением выгоревшего топлива на периферии [2]. Есть принципиальная возможность продлить работу выводимого из эксплуатации реактора за счет соответствующего структурирования топливной загрузки активной зоны и тем самым употребить энергоресурс невыгоревшего топлива.

Цель настоящей статьи — с помощью простой модели оценить возможность и эффективность использования остаточного ресурса ядерного топлива за счет внутренней реструктуризации активной зоны при снижении мощности в процессе вывода из эксплуатации.

Математическая модель динамики спектра ТВС по энерговыработке. Для проведения исследований возможности применения энергоресурса выводимого из эксплуатации реактора предлагается следующая математическая модель динамики спектра ТВС по энерговыработке:

$$\frac{\partial n(E, t)}{\partial t} = -\frac{\partial q(E, t)}{\partial E} - S(E, t) + F(E, t), \quad (1)$$

где $\partial n(E, t)/\partial t$ — изменение числа ТВС с энерговыработкой в интервале от E до $E + dE$ в момент времени t ; $\partial q(E, t)/\partial E$ — число ТВС, увеличивающих свою энерговыработку за уровень $E + dE$ в момент времени t ; $S(E, t)dE$ — число ТВС с энерговыработкой в интервале от E до $E + dE$, выгружаемых из реактора в момент времени t (скорость выгрузки); $F(E, t)dE$ — число ТВС с энерговыработкой в интервале от E до $E + dE$, загружаемых в реактор в момент времени t (скорость загрузки).

Уравнение (1) получено из следующих балансных соображений: изменение числа ТВС $(\partial n/\partial t dE)$ в единицу времени с энерговыработкой в интервале от E до $E + dE$ в момент времени t определяется их уменьшением за счет выгорания $q(E + dE, t) - q(E, t) = \partial q/\partial E dE$, выгрузкой $S(E, t)dE$ и увеличением за счет загрузки из бассейнов выдержки или других реакторов $F(E, t)dE$. Связь между выгоранием ТВС $q(E, t)$

и их числом $n(E, t)$ определяется из следующих соображений: за единицу времени энерговыработка ТВС изменится на $W(E)dt$, где $W(E)$ — мощность ТВС с энерговыработкой E . Таким образом, все ТВС с энерговыработкой в интервале от $E - W(E)dt$ до E пересекут уровень энерговыработки E , т.е. $q(E, t) = n(E, t)W(E)$.

Тогда уравнение (1) можно свести к уравнению в частных производных первого порядка относительно функции $q(E, t)$:

$$\frac{1}{W(E)} \frac{\partial q(E, t)}{\partial t} = - \frac{\partial q(E, t)}{\partial E} - S(E, t) + F(E, t). \quad (2)$$

$$\text{Начальное условие: } q(E, 0) = n(E, 0)W(E). \quad (3)$$

$$\text{Граничное условие: } q(0, t) = q_0(t). \quad (4)$$

Уравнение (3) определено на интервале $(0, E_m)$. Физическая постановка задачи предполагает, что при достижении максимальной глубины энерговыработки E_m ТВС извлекается из активной зоны. В идеальном режиме установившихся перегрузок со свежим топливом выгружаются ТВС с максимальной энерговыработкой E_m . Тогда математическая модель (2) — (4) имеет вид

$$0 = - \frac{\partial q(E, t)}{\partial E};$$

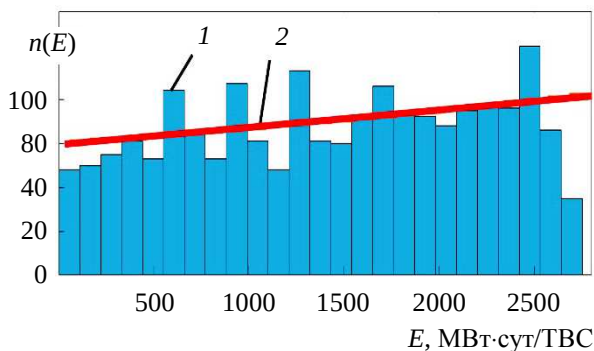
$$q(0) = q_0,$$

распределение ТВС по энерговыработке —

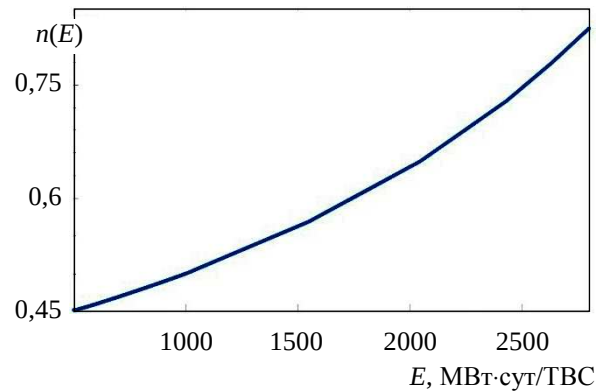
$$n(E) = q_0 / W(E). \quad (5)$$

На рис. 1 показан спектр, полученный по формуле (5) при линейной зависимости мощности ТВС от энерговыработки и плотности потока нейтронов

$$W(E, r) = \frac{\varphi(r)}{\varphi_{\max}} (W_0 - BE)$$



Р и с. 1. Реальный спектр ТВС (1) и полученный в результате моделирования (2)



Р и с. 2. Спектр ТВС по энерговыработке спустя время t после прекращения подпитки свежим топливом

в условиях максимального потока. Распределение ТВС по энерговыработке $n(E)$ не зависит от плотности потока нейтронов.

Из физических соображений понятно, что если подпитка свежим топливом прекращена, то через время t минимальная энерговыработка топлива в реакторе будет $E(t) = E_0$. ТВС с энерговыработкой меньше E_0 в реакторе не будет (рис. 2).

Рассмотрим оба способа продления работы реактора за счет структурирования активной зоны. Оценки предполагают линейную зависимость коэффициента размножения и мощности ТВС от энерговыработки. Была построена модель с параметрами, близкими РБМК [2]:

$$K(E) = K_0 - AE; \bar{K}_{\infty} = 1,02; K_0 = 1,2;$$

$$A = 1,1535 \cdot 10^{-4} \text{ ТВС}/(\text{МВт} \cdot \text{сут});$$

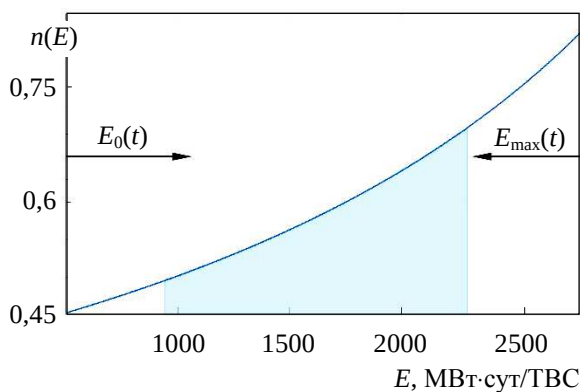
$$W(E) = \frac{\varphi(r)}{\varphi_{\max}} (W_0 - BE); W_0 = 3 \text{ МВт}/\text{ТВС};$$

$$B = 5,3571 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}.$$

В расчетах используются следующие физические величины: число ТВС в активной зоне $N = 1600$, квадрат длины миграции $M^2 = 0,04 \text{ м}^2$, площадь ячейки с ТВС a^2 составляет $0,06 \text{ м}^2$.

Реактор с выгрузкой выгоревших ТВС. После прекращения подпитки свежим топливом по мере выгорания левая граница спектра смещается вправо, правая — влево (рис. 3). Распределение плотности потока нейтронов в таком реакторе подчиняется уравнению

$$\begin{cases} \Delta\varphi + \frac{\bar{K}_{\infty}/K_{\text{эф}} - 1}{M^2} \varphi = 0; \\ \varphi'(0) = 0; \\ \varphi(R) = 0, \end{cases} \quad (6)$$



Р и с. 3. Изменение спектра ТВС по энерговыработке в гомогенном реакторе

где

$$\bar{K}_{\infty} = \frac{\int_{E_0}^{E_{\max}} n(E) K(E) dE}{\int_{E_0}^{E_{\max}} n(E) dE}.$$

Радиус активной зоны реактора находится

$$\text{по соотношению } \pi R^2 = a^2 \int_{E_0}^{E_{\max}} n(E) dE.$$

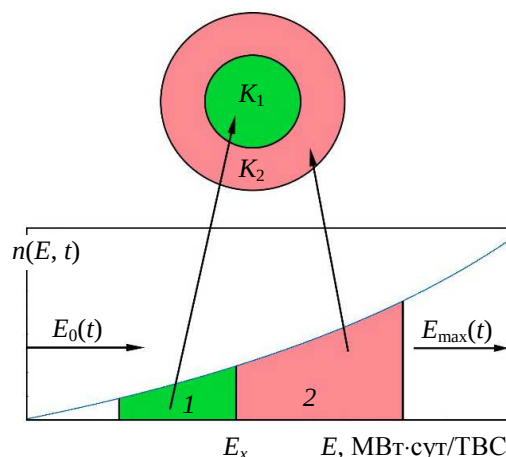
Условие критичности реактора

$$\frac{\bar{K}_{\infty}/K_{\text{эф}} - 1}{M^2} = (2,405/R)^2.$$

Отсюда следует, что при заданных квадрате длины миграции M^2 , эффективном коэффициенте размножения $K_{\text{эф}}$, площади ячейки и известного спектра $n(E) = q_0/W(E)$ можно найти зависимость энерговыработки выгружаемого топлива $E_{\max}(t)$ от энерговыработки $E_0(t)$. По мере выгорания топлива для поддержания критичности следует извлекать топливо с меньшей энерговыработкой. Наконец, наступает момент, когда поддержание критичности становится невозможным. Таким образом, концепция такого реактора предполагает извлечение ТВС с энерговыработкой меньше штатной.

Двухзонный реактор. Рассмотрим модель двухзонной топливной загрузки реактора (рис. 4). В центральной зоне находится топливо с энерговыработкой в интервале $E_0(t) - E_x(t)$, в периферийной — $E_x(t) - E_m(t)$. По мере выгорания топлива левая и правая границы спектра $E_0(t)$ и $E_m(t)$ смещаются вправо, граница между зонами $E_x(t)$ — влево. Критическое состояние реактора описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 + \frac{K_1/K_{\text{эф}} - 1}{M^2} \varphi_1 = 0; \\ \Delta\varphi_2 + \frac{K_2/K_{\text{эф}} - 1}{M^2} \varphi_2 = 0, \end{cases}$$



Р и с. 4. Перестановка свежих ТВС (1) в центральную зону и выгоревших (2) на периферию

где для внутренней зоны

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\int_{E_0}^{E_x} n(E) K(E) dE}{\int_{E_0}^{E_x} n(E) dE}; \\ N_1 = \int_{E_0}^{E_x} n(E) dE — \text{число ТВС}; \\ \pi r_1^2 = a^2 N_1 — \text{размер зоны}, \end{cases}$$

для внешней зоны —

$$\begin{cases} K_2 = \frac{\int_{E_x}^{E_m} n(E) K(E) dE}{\int_{E_x}^{E_m} n(E) dE}; \\ N_2 = \int_{E_x}^{E_m} n(E) dE — \text{число ТВС}; \\ \pi R^2 = a^2 (N_1 + N_2) — \text{размер зоны}. \end{cases}$$

При одинаковых коэффициентах диффузии в зонах уравнения однозначности имеют вид

$$\begin{cases} \varphi_1'(0) = \varphi_2(R) = 0; \\ \varphi_1(r_1) = \varphi_2(r_1); \\ \varphi_1'(r_1) = \varphi_2'(r_1). \end{cases}$$

Решение двухзонной задачи позволяет получить условие, которое будет содержать, помимо $K_{\text{эф}}$, радиус внутренней и внешней зоны r_1 и R , коэффициент размножения в бесконечной среде в центральной и периферийной зоне K_1 и K_2 , зависящие, в свою очередь, от $E_0(t)$, $E_x(t)$, $E_{\max}(t)$. Таким образом, для заданного минимально допустимого эффективного коэффициента размножения $K_{\text{эф}}$ можно найти минимальную энерговыработку топлива $E_0(t)$, при которой

в реакторе можно сохранить критичность. Концепция двухзонного реактора предполагает перестановку ТВС на периферию, а не извлечение. Если предположить, что в реакторе поддерживается такая плотность потока нейтронов, что с самой напряженной ТВС снимается мощность W_0 , то мощность реактора составит

$$W = \overline{W}_1 N_1 + \overline{W}_2 N_2,$$

где $\overline{W}_1 = W_0 / K_1^E K_1^\Phi$; $\overline{W}_2 = W_0 \phi_2^{\max} / \phi_1^{\max} / K_2^E K_2^\Phi$ — средняя мощность ТВС в центре и на периферии соответственно; $K_1^E, K_1^\Phi, K_2^E, K_2^\Phi$ — коэффициент неравномерности энерговыработки и плотности потока в каждой зоне соответственно.

Результаты. Было проведено моделирование вывода из эксплуатации реактора типа РБМК с помощью двух рассмотренных способов. Минимально допустимый эффективный коэффициент размножения в активной зоне принят равным 1,02 с учетом запаса на аксиальную утечку и оперативный запас реактивности. Получено, что реактор с выгрузкой может после прекращения подпитки свежим топливом вырабатывать 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 ТВС от энерговыработки. При этом длительная работа реактора объясняется значительным в 4—5 раз снижением мощности.

При наложении технических, экономических и прочих ограничений, не позволяющих реализовать в полной мере остаточный энергоресурс за счет реструктуризации топливной загрузки при снижении мощности реактора, может быть использован метод перемещения выгоревших ТВС из остановленного энергоблока в действующий [1].

Авторы выражают благодарность А.М. Федосову за интерес к работе и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов А.М. Оптимальное использование топлива при выводе АЭС с РБМК из эксплуатации. — Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 5, с. 284—290.
2. Доллежал Н.А., Емельянов И.Я. Канальный энергетический ядерный реактор. М.: Атомиздат, 1980.

Поступила в Редакцию 6.03.18

УДК 621.039.50

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА

Кобзарь Л.Л., Олексюк Д.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Одним из направлений увеличения производства энергии на АЭС является повышение мощности. При ее увеличении возрастет энергонапряженность активной зоны реактора. Для обеспечения достаточного теплотехнического запаса требуется внедрение дополнительных устройств, которые интенсифицируют тепло-

массообмен в пучке твэлов. В ВВЭР внедряются ТВС с решетками-интенсификаторами тепло-массообмена различных конструкций.

Целью исследований интенсификации тепло-массообмена является обоснование выбора конструкций решеток-интенсификаторов. Интерес представляют решетки-интенсификаторы,