

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ 18-МЕСЯЧНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ТОПЛИВНЫХ ЗАТРАТ НА БАЗЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТВС В РЕАКТОРАХ ВВЭР-1200

**Т.М. Хашламуц\*, С.Б. Выговский\*, С.Т. Лескин\*\*, А.С. Думан\*\***

\* *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31*

\*\* *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»  
249040, Обнинск, Калужская обл., Студгородок, д. 1*



Представлены результаты исследований, которые были направлены на определение оптимальных параметров удлиненной топливной кампании с целью снижения совокупных эксплуатационных затрат АЭС при переходе с 12-месячной кампании реактора на 18-месячную. Актуальность проведенных исследований связана с тем, что в течение последних лет происходит переход на всех действующих АЭС с ВВЭР-1000 (1200) на удлиненный 18-месячный топливный цикл и проводятся работы по подготовке к дальнейшему удлинению цикла до 24-х месяцев. При этом представляет интерес решение задачи сохранения длительности кампании при снижении числа загружаемых тепловыделяющих сборок (ТВС) со свежим топливом, что позволит снизить совокупные эксплуатационные и топливные затраты. Поиск решения поставленной задачи связан с обязательным выполнением всех требований по безопасной эксплуатации реактора и снижением максимального значения флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора по сравнению с его величиной на действующих АЭС.

С помощью программного комплекса ПРОСТОР исследованы нейтронно-физические характеристики активной зоны на номинальных параметрах реактора ВВЭР-1200 при реализации различных стратегий топливного цикла. Для 18-месячного топливного цикла с различным числом загружаемых ТВС рассмотрены различные схемы перегрузок топлива. Проведен сравнительный анализ основных параметров активной зоны для рассмотренных вариантов схем перегрузок 18-месячного цикла и параметров 12-месячного топливного цикла. Определено минимальное количество ТВС, которое обеспечивает необходимую длительность топливной кампании для полугодового топливного цикла при использовании удлинения кампании за счет снижения мощности в конце кампании до 70% от номинальной. ТВС расставлялись таким образом, чтобы обеспечить полевые ограничения локальной мощности по объему активной зоны и снизить флюенс быстрых нейтронов на корпус реактора по сравнению с проектным значением флюенса. Выявлено, что 18-месячный топливный цикл для реактора ВВЭР-1200 оказался экономичнее 12-месячного топливного цикла.

**Ключевые слова:** ПРОСТОР, флюенс, ВВЭР-1200, схема перегрузки топлива, 12- и 18-месячный топливный цикл, эффективные сутки, календарные сутки, обогащение топлива, глубина выгорания, эксплуатационные затраты, корпус реактора.

Целью исследований было определение загрузки топлива и соответствующей схемы перегрузок для 18-месячного топливного цикла на базе эксплуатируемых конструкций ТВС в реакторах ВВЭР-1200 [1 – 3], которые позволят максимальным образом снизить эксплуатационные расходы АЭС, включая затраты на топливо. При этом проводились исследования по изменению флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора [4] и проверка выполнения всех требований по обеспечению теплотехнической безопасности активной зоны [5].

Необходимо было определить минимальное количество ТВС для обеспечения длительности кампании для полугодового топливного цикла при использовании удлинения топливной кампании за счет снижения мощности в конце кампании до 70% от номинальной и такой расстановки ТВС, которая обеспечит полевые ограничения локальной мощности по объему активной зоны. Дополнительной целью исследований являлось рассмотрение возможности снижения флюенса нейтронов на корпус по сравнению с величиной флюенса, наблюдаемого в настоящее время на действующих АЭС с ВВЭР-1200 [6,7].

Топливный цикл ЯЭУ с реактором ВВЭР затрагивает много аспектов, касающихся реакторной физики, технологии добычи, обогащения урана, изготовления топливных элементов (ТВЭЛов) и тепловыделяющих сборок (ТВС) для активной зоны, их транспортировки, хранения и переработки топлива. В проведенных исследованиях акцент сделан на исследованиях возможности снижения совокупных эксплуатационных затрат АЭС для удлиненных топливных кампаний при переходе с 12-месячного топливного цикла на 18-месячный за счет уменьшения числа свежих загружаемых ТВС [8, 9].

В работе [10] была предложена упрощенная формула для оценки относительных эксплуатационных затрат, включая топливные затраты по отношению к затратам для 12-месячного топливного цикла. Вывод формулы основывался на многочисленных данных, взятых из [11 – 13].

$$K_{зп} = \frac{1 + \alpha \frac{32}{T_{эфф}} + \beta_0 \frac{N_{пер} N_{ТВС} M_{топ0}}{N_{пер0} N_{ТВС} M_{топ}} (0.7 + 0.3 \frac{n\%}{n_0\%}) \frac{\Delta T}{T_{эфф}}}{1 + \alpha \frac{32}{T_{эфф0}} + \beta_0 \frac{\Delta T_0}{T_{эфф0}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – доля эксплуатационных затрат во время профилактического ремонта при перегрузке топлива к затратам при эксплуатации блока на мощности,  $\alpha > 1$  за счет дозовых затрат по ремонту в ГО;  $\beta_0$  – значение коэффициента затрат на топливо относительно общих эксплуатационных затрат меньше единицы ( $\beta_0 < 1$ );  $N_{пер}$  – число перегрузок при непрерывной работе энергоблока при 18-месячном топливном цикле ( $N_{пер} = 60$ );  $N_{пер0}$  – число перегрузок при непрерывной работе энергоблока при 12-месячном топливном цикле ( $N_{пер0} = 40$ );  $N_{ТВС}$  – стандартное число свежих ТВС, используемых при перегрузке для 18-месячного топливного цикла;  $N_{ТВС0}$  – стандартное число свежих ТВС, используемых при перегрузке для 12-месячного топливного цикла;  $M_{топ}$  – проектируемая масса топлива в одной ТВС;  $M_{топ0}$  – масса топлива в одной ТВС для действующих АЭС с ВВЭР-1200;  $n\%$  – предлагаемое для использования обогащение топлива по урану-235;  $n_0\%$  – используемое на действующих АЭС обогащение топлива по урану-235;  $T_{эфф}$  – длительность кампании реактора на базовой мощности при параметрах 18-месячного топливного цикла для действующего оборудования АЭС с ВВЭР-1200;  $T_{эфф0}$  – длительность кампании реактора на базовой мощности при параметрах 12-ме-

сячного топливного цикла для действующего оборудования АЭС с ВВЭР-1200;  $\Delta T_0$  – календарный срок с учетом времени на профилактический ремонт для 12-месячного цикла ( $T_{\text{кал}} + \Delta T_{\text{рем}}$ , сут);  $\Delta T$  – календарный срок с учетом времени на профилактический ремонт для 18-месячного цикла ( $T_{\text{кал}} + \Delta T_{\text{рем}}$ , сут);  $\Delta T_{\text{рем}}$  – время на профилактический ремонт,  $\Delta T_{\text{рем}} \approx 32$  сут; отношение  $T_{\text{эфф}}/\Delta T$  характеризует коэффициент использования установленной мощности на АЭС-КИУМ.

Данная формула отличается от общепринятой в литературе [11 – 13], но в целом отражает все отдельные компоненты эксплуатационных затрат на АЭС. Поскольку нас интересует относительное изменение затрат, то неточность, которую вносит данная формула, не столь значительна для проведения оценок.

Срок службы корпуса реактора на базовой мощности является постоянной и неизменной величиной при различных топливных циклах. Проектное время жизнеспособности корпуса реактора 60 – 70 календарных лет при различных условиях эксплуатации [14, 15]. Для 12-месячного (четырёхгодичного) топливного цикла  $N_{\text{пер}0} = 60$ , а число свежих ТВС  $N_{\text{ТВСО}}$ , загружаемых в зону при каждой перегрузке, равно 42. Вес металлического урана в каждой ТВС составляет 470 кг, а используемое среднее обогащение равно 4,79%. Для 18-месячного топливного цикла величина  $N_{\text{пер}} = 40$ , а число свежих ТВС, загружаемых в зону при каждой проектной перегрузке, равно 72. Для проектной топливной загрузки среднее обогащение топлива подпитки для АЭС с ВВЭР-1200 при 18-месячном цикле составляет 4,68%. Вес металлического урана в каждой ТВС составляет примерно ту же величину, что и для 12-месячного цикла. Были рассмотрены альтернативные варианты с отличными схемами перегрузок топлива (с использованием 67-ми свежих ТВС вместо 72-х). Схемы перегрузок отличались друг от друга разным размещением выгоревших ТВС на периферии активной зоны. В одном случае на периферию зоны ставились ТВС третьего года пребывания и 12-ти свежих ТВС, в другом случае на периферию ставились ТВС с только выгоревшим топливом третьего и второго годов пребывания [16,17].

Расчеты физических характеристик различных вариантов загрузок и схем перегрузок топлива проводились по программному комплексу ПРОСТОП, аттестованному в надзорных органах РФ и имеющему паспортные характеристики на уровне штатных программ сопровождения эксплуатации оборудования АЭС с ВВЭР-1200 [17,18].

Из рассмотренных вариантов с использованием 67-ми ТВС был выбран вариант с установкой 12-ти свежих ТВС на периферию активной зоны и ТВС третьего года пребывания. Вариант с использованием только выгоревших ТВС на периферии был отбракован из-за нарушений требований по обеспечению теплотехнической безопасности зоны.

В статье представлены результаты сопоставления основных параметров активной зоны для стационарных топливных загрузок, рассчитанных по проектным данным для 12- и 18-месячного циклов и для отобранной альтернативной схемы перегрузок с использованием 67-ми ТВС при загрузке свежего топлива. При анализе безопасности активной зоны и оценки приведенных эксплуатационных затрат рассматривались следующие параметры:

- $DNBR_{\text{min}}$  – минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена;
- $\max(QL - 0.98 \cdot QL_{\text{lim}})$  – максимальная разница между расчетно-экспериментальным и предельным значениями линейной нагрузки на твэл (должна быть  $< 0$ );
- $KQ_{\text{max}}$  – максимальный коэффициент неравномерности мощности ТВС по зоне;
- $KV_{\text{max}}$  – максимальный коэффициент неравномерности энерговыделений по объёму зоны;
- средние значения глубины выгорания топлива за кампанию в периферийных ТВС (для сравнения величины флюенса быстрых нейтронов на корпус для разных вариантов);
- среднее значение глубины выгорания выгружаемого топлива;

## ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

- максимальное (среднее) значение глубины выгорания выгружаемого топлива;
- максимальное значение глубины выгорания топлива твэла в выгружаемом топливе,
- максимальные значения глубины выгорания топливной таблетки твэла в выгружаемом топливе.

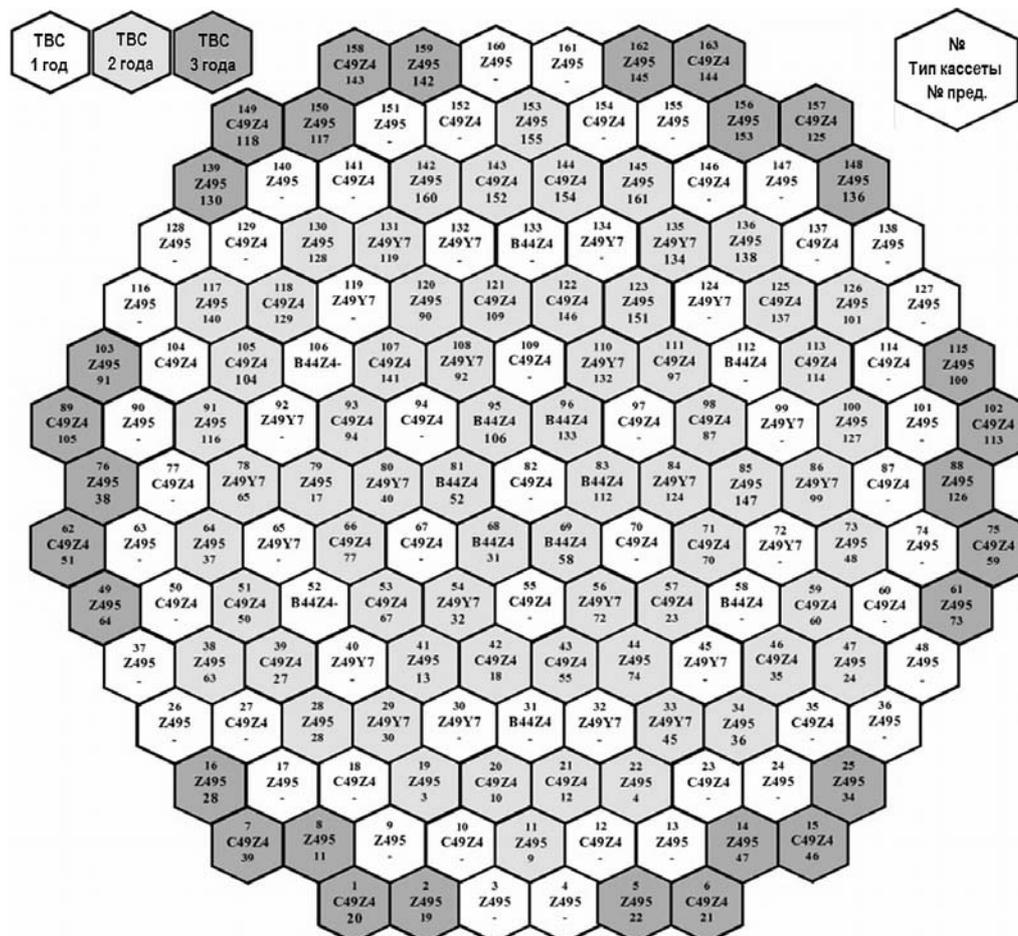


Рис. 1. Картограмма отобранной альтернативной загрузки для 18-месячного топливного цикла (67 ТВС, 3200 МВт)

Для полноценного сравнения необходимо проведение оценок изменения флюенса быстрых нейтронов на корпус для различных вариантов топливных загрузок. В работе [1], в которой приведено базовое азимутальное распределение быстрых нейтронов выше 0.5 МэВ на внутренней поверхности корпуса серийного ВВЭР-1000, найденное по программе DORT [20], предложена простая методика оценки этого изменения:

$$\frac{\Phi_{\text{var}}(\theta_i)}{\Phi_0(\theta_i)} \approx \frac{db_{\text{vari}}}{db_{0i}}, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, \dots, 7$ ;  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 7.59^\circ$ ,  $\theta_3 = 16.10^\circ$ ,  $\theta_4 = 25.29^\circ$ ,  $\theta_5 = 34.72^\circ$ ,  $\theta_6 = 44.84^\circ$ ,  $\theta_7 = 52.41^\circ$ ;  $\Phi_{\text{var}}(\theta_i)$  – азимутальное распределение быстрых нейтронов на внутренней поверхности корпуса реактора в наиболее уязвимых местах для рассматриваемого варианта топливной загрузки;  $\Phi_0(\theta_i)$  – базовое азимутальное распределение быстрых нейтронов на внутренней поверхности корпуса серийного реактора ВВЭР-1000 в наиболее уязвимых местах;  $db_{\text{vari}}$  – изменение глубины выгорания в  $i$ -ой периферийной ТВС за период работы топливной загрузки между очередными перегрузками в секторе симмет-

рии 60° для исследуемого варианта;  $db_{0i}$  – изменение глубины выгорания в  $i$ -ой периферийной ТВС за период работы топливной загрузки между очередными перегрузками в секторе симметрии 60° для базового варианта на действующих АЭС.

Условие для обеспечения проектного срока службы корпусного оборудования

$$\frac{\Phi_{\text{var}}(\theta_i)}{\Phi_0(\theta_i)} \approx \frac{db_{\text{vari}}}{db_{0i}} < 1.$$

С учетом 60-градусной симметрии отражателя вокруг активной зоны достаточно проверить выполнение вышеуказанного неравенства для периферийных ТВС в этом секторе.

На рисунках 1, 2 приведены схемы перегрузок топлива и картограммы топливных загрузок для отобранного альтернативного варианта реализации 18-месячного цикла и для проектного варианта 18-месячного цикла.

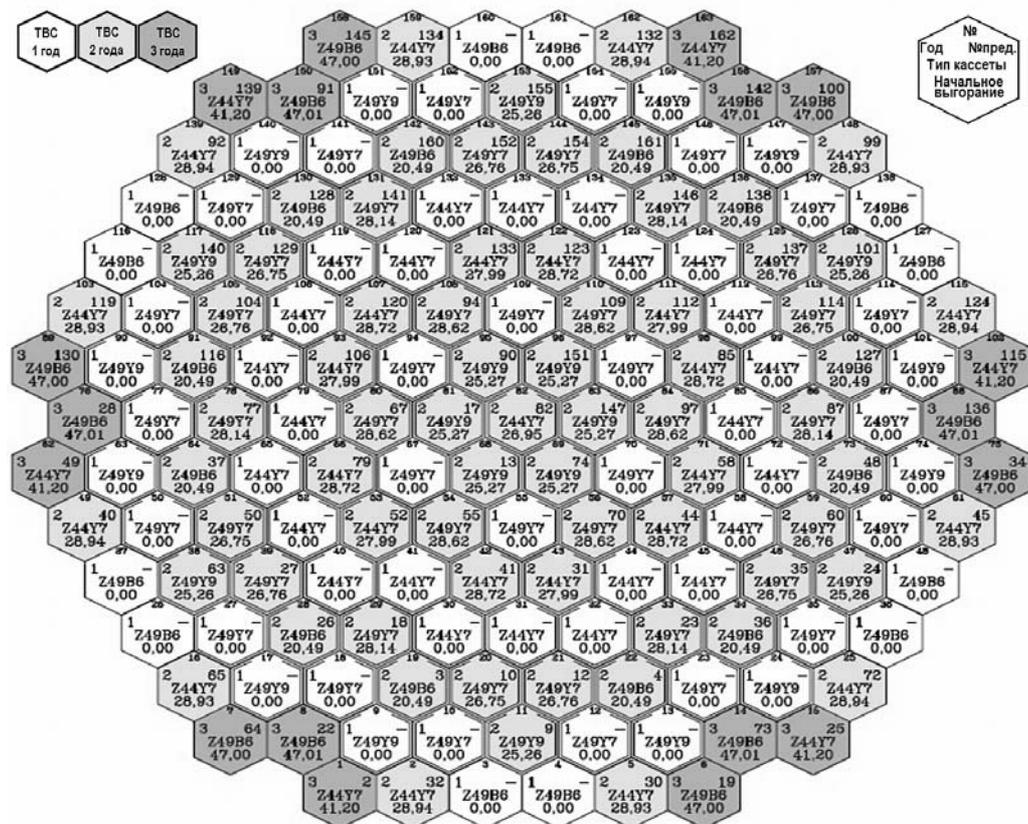


Рис. 2. Картограмма проектной загрузки для 18-месячного топливного цикла (72 ТВС, 3200 МВт)

Рассмотренные варианты обеспечили сохранение полевых ограничений по локальной мощности в объеме активной зоны и минимальные коэффициенты запаса до кризиса теплообмена  $DNBR$  больше 1.35. Коэффициент неравномерности мощности ТВС по активной зоне не превышает величины 1.4 для всех вариантов (рис. 3 – 6).

На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента приведенных затрат от дозовых затрат при различных величинах топливной составляющей эксплуатационных затрат для проектного варианта реализации 18-месячного топливного цикла с использованием 72-х свежих ТВС со стандартным топливом при загрузке на стационарном режиме перегрузок топлива.

Из приведенных результатов на рис. 8 подтверждается вывод о том, что 18-месячный

## ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

цикл для реактора ВВЭР-1200 экономичнее, чем 12-месячный. Для отобранного альтернативного варианта загрузки и схемы перегрузок при использовании 67-ми ТВС эксплуатационные затраты заметно меньше, чем для проектного варианта при использовании 72-х ТВС.

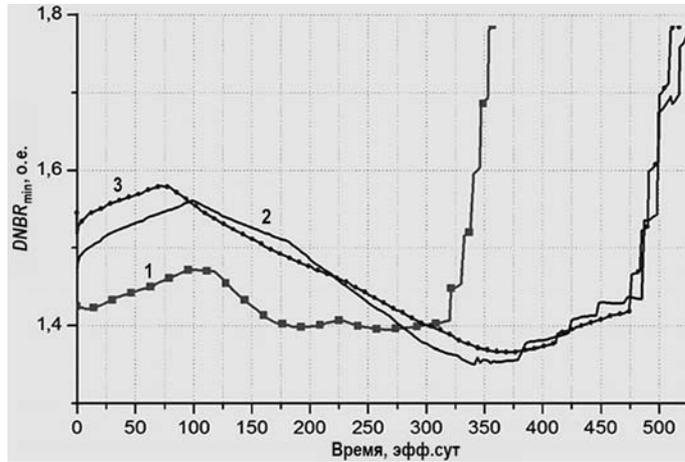


Рис. 3. Зависимость  $DNBR_{min}$  от времени при выгорании топлива в течение стационарной кампании: 1 – проектный 12-месячный удлиненный цикл; 2 – проектный 18-месячный удлиненный цикл; 3 – альтернативный 18-месячный цикл

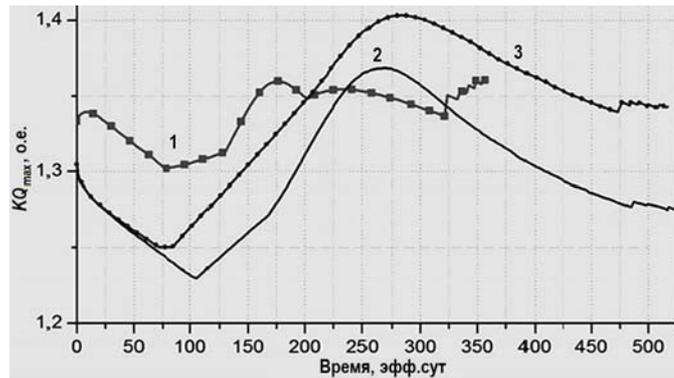


Рис. 4. Зависимость  $KQ_{max}$  от времени при выгорании топлива в течение стационарной кампании: 1 – проектный 12-месячный удлиненный цикл; 2 – проектный 18-месячный удлиненный цикл; 3 – альтернативный 18-месячный цикл

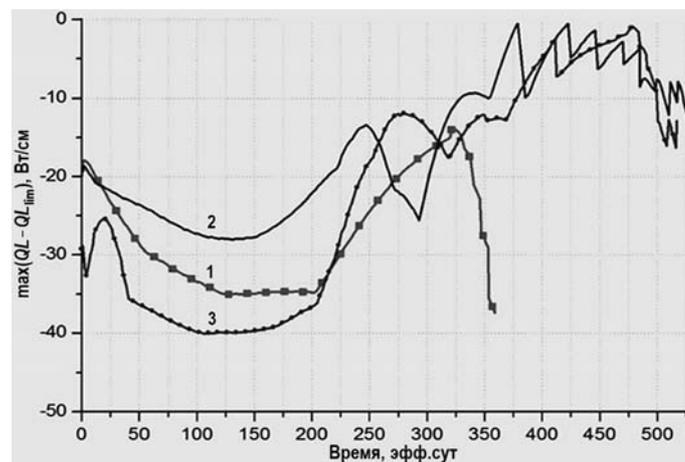


Рис. 5. Зависимость  $\max(QL - 0.98 \cdot QL_{lim})$  от времени при выгорании топлива в течение стационарной кампании: 1 – проектный 12-месячный удлиненный цикл; 2 – проектный 18-месячный удлиненный цикл; 3 – альтернативный 18-месячный цикл

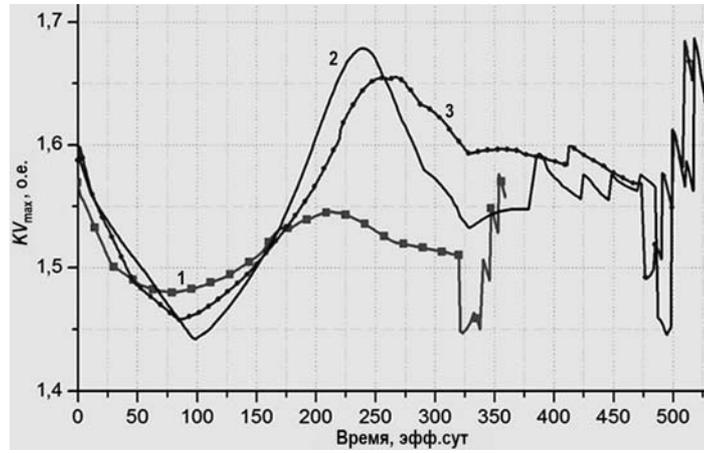


Рис. 6. Зависимость  $KV_{max}$  от времени при выгорании топлива в течение стационарной кампании: 1 – проектный 12-месячный удлиненный цикл; 2 – проектный 18-месячный удлиненный цикл; 3 – альтернативный 18-месячный цикл

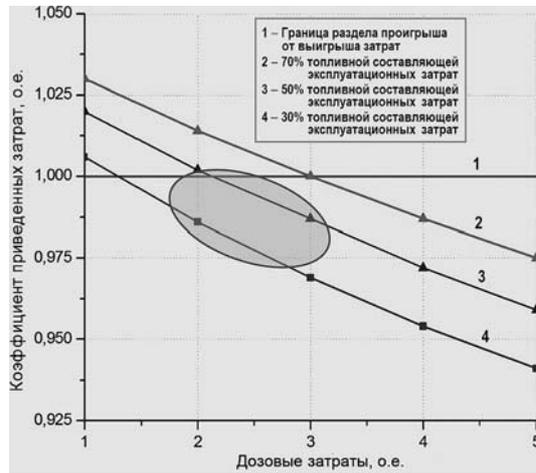


Рис. 7. Коэффициент приведенных затрат 18-месячного топливного цикла к затратам 12-месячного цикла для проектного варианта топливной загрузки и схемы перегрузки топлива в зависимости от приведенной величины дозовых затрат

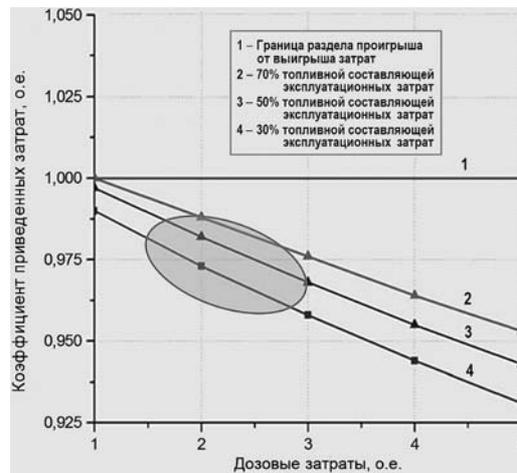


Рис. 8. Коэффициент приведенных затрат 18-месячного топливного цикла к затратам 12-месячного цикла для альтернативного варианта топливной загрузки и схемы перегрузки топлива в зависимости от приведенной величины дозовых затрат

Таблица 1

**Распределение средних значений энерговыработки ТВС в периферийном ряду в секторе активной зоны 60° для проектных и альтернативных вариантов стационарной топливной загрузки, определяющей флюенс быстрых нейтронов на корпус**

Угол от нулевой линии, под которым располагается центр очередной периферийной ТВС $\theta_i, ^\circ$		0	7.59	16.10	25.29	34.72	44.84	52.41
Энерговыработка за кампанию периферийной ТВС, отнесенная к её массе топлива $\Delta W(\theta_i)$ МВт-сут/кг	Проектная схема перегрузок, 3200МВт (42 ТВС)	18.95	10.40	10.71	23.45	23.45	10.71	6.29
	Проектная схема перегрузок, 3200МВт (72 ТВС)	12.11	6.82	11.41	19.88	19.89	11.42	6.98
	Альтернативная схема перегрузок (67 ТВС) 3200МВт	11.66	6.06	9.93	19.97	19.97	9.93	6.05

Для 18-месячного цикла все рассмотренные варианты загрузок обеспечили заметное снижение величины флюенса по сравнению с 12-месячным. Причем для альтернативного варианта загрузки топлива величина флюенса меньше, чем для проектного варианта в наиболее уязвимых местах корпуса (табл. 1). Из таблицы следует, что для отобранного альтернативного варианта загрузки с 67-ю ТВС неравномерность выгорания для выгружаемых ТВС заметно меньше, чем для проектной схемы перегрузок топлива.

В таблице 2 приведены значения максимальной глубины выгорания в ТВС и в твэлах для всех рассмотренных вариантов. Из сравнения этих величин следует, что максимальные значения выгорания топлива минимальны для альтернативной топливной загрузки. Полученные результаты свидетельствуют о лучшем использовании топлива для альтернативного варианта загрузки.

Таблица 2

**Значения глубины выгорания топлива по зоне в ТВС и твэлах и длительности кампании для различных вариантов стационарной загрузки**

Тип загрузки и схема перегрузки	12-месячный удлиненный цикл (42)	18-месячный удлиненный цикл (72)	18-месячный удлиненный цикл (67)
Средняя глубина выгорания выгружаемого топлива, МВт-сут / кг U	57.94	50.40	52.86
Максимальная глубина выгорания (среднее по ТВС) выгружаемого топлива, МВт-сут / кг U	64.71	58.21	58.63
Максимальное выгорание топлива твэла в выгружаемом топливе, МВт-сут / кг U	71.19	65.20	65.70
Максимальное выгорание топливной таблетки твэла в выгружаемом топливе, МВт-сут / кг U	78.93	70.13	70.13
Длительность работы топливной загрузки при удлинении кампании при снижении мощности до 70%, эфф.сут	367	539	528

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили определить альтернативную (проектной схеме) схему перегрузок топлива и сформировать стационарную топливную загрузку. Для найденных схем перегрузок и загрузки топлива показано преимущество альтернативного варианта реализации 18-месячного топливного цикла по всем основным характеристикам активной зоны:

- по средней глубине выгорания выгружаемого топлива;
- по равномерности выгорания выгружаемого топлива;
- по величине флюенса быстрых нейтронов в наиболее уязвимых местах корпуса;
- по величине приведенных эксплуатационных затрат, причем при максимальном разбросе отдельных их составляющих.

Для найденных схем перегрузок топлива и стационарной топливной загрузки обоснована теплотехническая безопасность активной зоны. Все основные параметры, характеризующие безопасность активной зоны, находятся в пределах допустимых значений по данным главного конструктора.

Важно отметить, что предлагаемое решение можно реализовать на базе эксплуатируемых конструкций ТВС уже в настоящее время.

## Литература

1. *Выговский С.Б., Рябов Н.О., Семенов А.А., Чернов Е.В., Богачек Л.Н.* Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.
2. *Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И.* Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 116 с.
3. *Малыгин В.Б.* Топливный цикл энергетических реакторов и проблемы увеличения ресурса тепловыделяющих элементов. – М.: МИФИ, 2001. 84 с.
4. *Яновский С.Э., Еременко М.Л., Овдиенко Ю.Н.* Разработка подходов к анализу чувствительности модели расчета флюенса нейтронов на корпуса реакторов ВВЭР на базе комплекса кодов DOORS. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2011. – № 3 (51). – С. 38-43.
5. *Выговский С.Б., Рябов Н.О., Чернов Е.В.* Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
6. Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов (РБ-007-99), утверждены от 21.04.1999. // Вестник Госатомнадзора России. – 1999. – № 1 (5). – С. 2-14.
7. Методика нейтронного контроля на внешней поверхности корпусов водо-водяных энергетических реакторов АЭС (РБ-018-01), утверждены 17.12.2001. // Вестник Госатомнадзора России. – 2001. – № 6 (19). – С. 32-47.
8. *Дементьев Б.А.* Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоиздат, 1990. – 352 с.
9. *Молчанов В.Л.* Ядерное топливо для АЭС с ВВЭР: современное состояние и перспективы. VI Международная конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» 26 – 29 мая 2009. ОАО «ОКБ «Гидропресс», г. Подольск.
10. *Хашламун Т.М., Выговский С.Б.* Исследование возможности повышения экономичности использования топлива на АЭС с ВВЭР-1000 для 18-месячного топливного цикла. // Ядерная физика и инжиниринг. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018.
11. *Харитонов В.В.* Энергетика. Техничко-экономические основы. – М.: НИЯУ МИФИ, 2007. – 256 с.
12. *Томас С.* Ядерная энергия: миф и реальность. // Экономика ядерной энергетики. – 2005. – № 5. – С. 47.
13. ОЭСР. Экономика ядерного топливного цикла. Агентство по ядерной энергии. – М.: Энергоиздат, 1999. – 141 с.
14. *Семченков Ю., Павловичев А., Чибиняев А.* Близость к сценарию. Перспективы эволюционного развития топлива ВВЭР. // Атомная энергетика России. – 2011. – № 10. – С. 25-29.
15. *Батурин Д.М., Выговский С.Б.* Учет спектральной истории выгорания при подготовке

нейтронно-физических констант ТВС ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. – Вып. 4. – С. 256-260.

16. *Мастепанов А.М.* Топливо-энергетический комплекс России на рубеже веков: состояние проблемы и перспективы развития. Том 1. – М.: Энергоатомиздат, 2009г. – 477с.

17. *Жиμεριν Д. Г.* Проблемы развития энергетики. – М.: Энергия, 1978. – 288 с.

18. *Будникова О.А., Выговский С.Б., Зимин В.Г., Кориковский К.П., Краюшкин Ю.А., Мищерин С.А., Осадчий М.А., Семенов А.А., Страшных В.П., Чернов Е.В., Чернаков В.А.* Программный комплекс ПРОСТОП (версия 1). Приложение к аттестационному паспорту № 182 от 28.10.2004.

19. *Анохин А.Ю., Цибульский В.Ф., Давиденко В.Д.* Программный комплекс UNK для детального расчета спектра нейтронов в ядерных реакторах. – Отчет ИЯР/РНИЦ «КИ». Инв. №35-410-4/81 от 18.05.2001. Москва.

20. *Rhoades W.A., Childs R.L.* The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code. // Nucl.Sci.&Eng. – 1988. Vol. 99. – No. 1. – PP. 88-89.

Поступила в редакцию 08.05.2018 г.

#### Авторы

Хашламун Таха Мохд, аспирант  
E-mail: tahashlamoon@yahoo.com

Выговский Сергей Борисович, доцент, к.т.н.,  
E-mail: vigovskii@mail.ru

Лескин Сергей Терентьевич, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.,  
E-mail: LSST@yandex.ru

Думан А. Сафа, студент  
E-mail: safaduman@gmail.com

UDC 621.039.542:621.039.548:621.311.25

### **DETERMINATION OF 18-MONTH FUEL CYCLE PARAMETERS WITH GOAL OF FUEL COSTS MINIMIZATION AT THE BASIS OF USE CONSTRUCTIONS OF FUEL ASSEMBLIES IN VVER-1200 REACTORS**

Hashlamoun T.M.\*, Vygovskiy S.B.\*, Leskin S.T.\*\*, Duman A.S.\*\*

\* National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute)

31 Kashirskoe sh., Moscow, 115409 Russia

\*\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

#### ABSTRACT

This article presents the results of research, that were focused on determining the optimal parameters of the extension of reactor fuel cycle in order to reduce the total operating costs of nuclear power plants during the transition from 12-month reactor fuel cycle to 18-month fuel cycle.

The relevance of the research is related to the fact that, in recent years, there is a transition at all operating nuclear power plants WWER-1000 (1200) from 12-month reactor fuel cycle to extended 18-month fuel cycle. At the same time, represent the interests to solve the problem of conservation the extension of reactor fuel cycle while reducing the number of loaded fuel assemblies with fresh fuel assemblies which would reduce the total operating and fuel costs. Search for solutions of this problem is

associated with mandatory implementation of all requirements for the safe operation of the reactor and the reduction of the maximum fast neutron fluence on the reactor vessel in comparison with its value at the operating nuclear power plants.

In the present work, with using the program PROSTOR software complex researched the neutron-physical characteristics of the core at the nominal parameters of the VVER-1200 reactor through the implementation of various fuel cycle strategies. The article developed various schemes of fuel reloading for an 18-month fuel cycle with a different number of fuel assemblies. The article carries out a comparative analysis of the main parameters in the core for fuel reloading schemes options of an 18- and 12-month fuel cycle with each other. Determine the minimum amount of fuel assemblies and provide the necessary duration of the reactor fuel cycle for 18-month fuel cycle with using the extension of reactor fuel cycle by reducing the power at the end of the reactor cycle to 70% of the nominal power. In the article the arrangements of fuel assemblies were developed to provide field limitations of local power by volume of the core, which reduce the fluence of fast neutrons on the reactor vessel in comparison with the projected value of the fluence. This article shows that the 18-month fuel cycle for the VVER-1200 reactor is more economical than the 12-month fuel cycle. These studies were carried out for the VVER-1200 reactor at the power of 100% of the nominal.

**Key words:** PROSTOR, fluence, VVER-1000, fuel reloading scheme, 18-month fuel cycle, effective days, natural days, fuel enrichment, burn-up, operating costs, reactor vessel.

#### REFERENCES

1. Vygovsky S.B., Ryabov N.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek L.N. *Physical and structural features of nuclear power plants with VVER*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2013. 304 p. (in Russian).
2. Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I. *Physical features and design of the VVER-1000 reactor*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2011. 116 p. (in Russian).
3. Malygin V.B. *Fuel cycle of power reactors and problems of increasing the resource of fuel elements*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2001. 84 p. (in Russian).
4. Yanovskiy S.E., Yeremenko M.L., Ovdienko Yu.N. Development of approaches to sensitivity analysis of the neutron fluence calculation model for VVER reactors on the basis of DOORS code complex. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2011, no. 3(51), pp. 38-43 (in Russian).
5. Vygovsky S.B., Ryabov N.O., Chernov E.V. *Safety and tasks of engineering support for the operation of NPPs with VVER*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2011. 376 p. (in Russian).
6. Allowance for the fluence of fast neutrons on VVER shells and test specimens for the subsequent prediction of the radiation resource of the hulls (RB-007-99). *Vestnik Gosatomnadzora Rossii*, 1999, no. 1 (5), pp. 2-14 (in Russian).
7. Method of neutron control on the external surface of the hulls of water-power power reactors of nuclear power plants (RB-018-01), approved on 17.12.2001. *Vestnik Gosatomnadzora Rossii*, 2001, no. 6 (19), pp. 32-47 (in Russian).
8. Dementiev B.A. *Nuclear Power Reactors*. Training manual for universities. Moscow. Energiozdat Publ., 1990. 352 p. (in Russian).
9. Molchanov V.L. Nuclear Fuel for NPPs with WWER: Current State and Prospects. Proc. of the VI-th International Conference «Ensuring the Safety of NPPs with WWER» May 26-29, 2009. Podolsk. JSC «OKB «Gidropress» Publ., 2009 (in Russian).
10. Hashlamoun T.M., Vygovskiy S.B. Study the possibility of increasing the economy of usage nuclear fuel at NPP with reactor VVER-1000 for 18-month fuel cycle. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2018 (in Russian).
11. Kharitonov V.V. *Power Engineering. Technical and Economic Fundamentals*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2007, 256 p. (in Russian).

12. Tomas S. Nuclear Energy: Myth and Reality. *Ekonomika Yadernoy Energetiki*. 2005, no. 5, p. 47 (in Russian).
13. OECD. *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*. Moscow. Energoizdat Publ., 1999, 141 p. (in Russian).
14. Semchenkov Yu., Pavlovich A., Chibinyaev A. Proximity to the scenario. Prospects for evolutionary development of VVER fuel. *Atomnaya energetika Rossii*. 2011, no.10, pp. 25-29 (in Russian).
15. Baturin D.M., Vygovsky S.B.. Accounting for the spectral history of burnup in the preparation of neutron-physical constants of TVS VVER-1000. *Atomnaya energiya*, 2001, v. 90, no. 4, pp. 256-260 (in Russian).
16. Mastepanov A.M. *The Fuel and Energy Complex of Russia at the Turn of the Century: the State of the Problem and the Prospects for Development*. Vol. 1. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2009. 477 p.
17. Zhimerin D.G. *Problems of the Development of Energy*. Moscow. Energia Publ., 1978. 288 p. (in Russian)
18. Vygovskiy S.B., Zimin V.G., Chernov Ye.V., Korikovskiy K.P., Krayushkin Yu.A., Mischerin S.A., Osadchy M.A., Semyonov A.A., Strashnykh V.P., Chernov E.V., Chernakov V.A. *PROSTOR Software Complex (Ver. 1)*. The Appendix to the Certification Passport № 182 from October 28, 2004 (in Russian).
19. Anokhin A.Yu., Tsibulsky V.F., Davidenko V.D. *The UNK program complex for detailed calculation of the neutron spectrum in nuclear reactors*. Moscow. Report of NRC «Kurchatov Institute». Inventory no. 35-410-4/81, May 18, 2001 (in Russian).
20. Rhoades W.A., Childs R.L. The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code. *Nucl.Sci. & Eng.*, 1988, v. 99, no. 1, pp. 88-89.

#### Authors

Hashlamoun Taha Mohd, PhD Student

E-mail: tahashlamoon@yahoo.com

Vygovskiy Sergey Borisovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: vigovskii@mail.ru

Leskin Sergey Terentyevich, Head of Department, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: LSST@yandex.ru

Duman A. Safa, Student

E-mail: safaduman@gmail.com