

**Хашламун Таха Мохд Рабах Солейман**

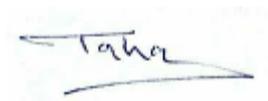
**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УДЛИНЕННЫХ ТОПЛИВНЫХ  
ЗАГРУЗОК ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000(1200) С ЦЕЛЬЮ  
МИНИМИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ НА АЭС**

05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:

Handwritten signature of the author, Taha, in blue ink on a light blue background.

Москва – 2018

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете

«МИФИ»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Выговский Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика» НИЯУ МИФИ, г. Москва

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Гольцев Александр Олегович, доктор технических наук, начальник лаборатории федерального государственного бюджетного учреждения Национальный Исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

Попыкин Александр Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории Федерального Бюджетного Учреждения «Научно-исследовательский Центр Ядерной и Радиационной Безопасности», г. Москва

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций. ОАО «ВНИИАЭС»

Защита состоится « 14 » ноября 2018 г. в 16 час.00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУМИФИ.

Автореферат разослан «    » сентября 2018 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н., профессор



И.И.Чернов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Одними из важнейших факторов экономичности энергоустановок является их годовой коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) и стоимость топлива за весь период эксплуатации реакторного оборудования. Для АЭС с водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) с разовым (периодическим) характером загрузок ядерного топлива в активную зону понятие КИУМ усредняют по годам полного топливного цикла (ТЦ), состоящего из работы частичных загрузок. В сумме число замененных топливных сборок (ТВС) за весь ТЦ должно соответствовать полному их числу, размещаемому в зоне. Чем длительнее работа реактора на каждой из частичных загрузок, тем длиннее совокупный ТЦ, меньше относительное время перегрузок топлива и ремонтных кампаний, совмещаемых с перегрузками топлива, тем выше усредненный за годы полного топливного цикла КИУМ.

Наряду с усредненным значением за годы полного топливного цикла КИУМ можно пользоваться усредненным значением КИУМ на интервале времени между перегрузками топлива за весь период эксплуатации. Этот КИУМ определяется по отношению числа эффективных суток за кампанию реактора к числу календарных суток за тот же интервал времени. К этому показателю необходимо добавить и другую эксплуатационную характеристику в оценке экономичности, которая составляет топливную составляющую затрат при эксплуатации, которая равна стоимости всех ТВС, используемых за время жизни корпусного оборудования. Таким образом, полная оценка затрат на эксплуатацию включает в себя затраты на саму эксплуатацию за время жизни корпусного оборудования и топливную составляющую, а именно стоимость топлива, включая затраты на добычу, переработку, транспортировку и хранение топлива. Только по совокупной оценке самих эксплуатационных и топливных затрат можно судить об экономичности эксплуатации в целом. В данной работе при рассмотрении вопросов экономичности акцент сделан именно на оценке совокупных затрат. Дело в том, что не всегда увеличение КИУМ является фактором повышения экономичности эксплуатации, например при снижении количества поставляемого топлива за жизненный срок корпуса реактора. При этом не надо забывать о таких факторах, как обеспечение или даже повышения уровня безопасности оборудования АЭС. При рассмотрении вопросов повышения экономичности всегда об этом встает вопрос, ответ на который требует компромиссного решения. В этом и заключается основная цель представленной диссертационной работы: найти это компромиссное решение, или можно назвать его оптимальным решением.

**Цель работы.** Определить топливные загрузки и схемы перегрузок топлива в ВВЭР-1000(1200) с минимальным количеством загружаемых ТВС при реализации 18-и и 20-22-месячных топливных загрузок для снижения топливных затрат с учетом общих эксплуатационных затрат на АЭС и флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- Выполнен обзор по предмету исследования и отмечена его актуальность.
- Выбрано и освоено программное обеспечение: программный комплекс ПРОСТОР,- и проверены его точностные характеристики по экспериментальным данным отдельных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 и по данным штатных программ сопровождения (программа БИПР-7А и программа ИР) при моделировании нейтронно-физических характеристик активных зон ВВЭР-1000(1200).
- Разработана упрощенная методика оценки эксплуатационных затрат с учетом топливной компоненты для ВВЭР-1000 и проведены по ней расчеты полных эксплуатационных затрат для различных вариантов реализации топливных загрузок.
- Рассмотрены проектные решения по топливной загрузке и схемам перегрузок для 12-ой, 18-ой и 20-месячной топливной загрузки на предмет сопоставления результатов расчетов по штатным программам сопровождения эксплуатации ВВЭР с результатами, полученными по программному комплексу ПРОСТОР, и для анализа теплотехнической надежности активной зоны.
- Сформированы основные критерии оптимизации параметров удлиненных топливных циклов с целью минимизации загружаемого топлива и выбрана методология проведения оптимизации.
- Определены топливные загрузки и схемы перегрузок топлива в ВВЭР-1000/1040/1200 с минимальным количеством загружаемых ТВС при реализации 18-ой и 20-22-месячных топливных загрузок и проведено их расчетное обоснование на предмет выполнения всех требований по теплотехнической надежности активной зоны.
- Проведены оценки относительного изменения флюенса быстрых нейтронов в наиболее уязвимых местах корпуса реактора для выбранных вариантов загрузок и схем перегрузок топлива по сравнению с проектными решениями.

### **Научная новизна работы**

1) На основе обобщения литературных данных по теме экономике использования ядерного топлива на АЭС предложена упрощенная методика оценки экономической эффективности использования топлива с учетом общих эксплуатационных затрат для экспресс-анализа различных вариантов реализации топливных кампаний.

2) Разработаны критерии оптимизации параметров удлиненных топливных кампаний с целью снижения совокупных эксплуатационных затрат АЭС и флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора.

3) Впервые с использованием разработанных критериев оптимизации найдены оптимальные топливные загрузки и схемы перегрузок топлива для ВВЭР-1000(1100, 1200) для 18-ти месячной кампании.

4) Впервые с использованием разработанных критериев оптимизации предложена топливная загрузка и схема перегрузок топлива для ВВЭР-1200 при максимальном удлинении кампании реактора до 22 месяцев на базе новой конструкции ТВС – ТВС-4А и ТВС-4М с удлинением топливного до 3730 мм.

5) Предложено наилучшее профилирование ТВЭГ в торцевых частях активной зоны до 36 см как сверху, так внизу зоны без использования в топливных таблетках гадолиния и обязательное погружение рабочей группы органов управления до 79 – 81% извлечения в последней трети кампании с целью выполнения требований по обеспечению теплотехнической безопасности активной зоны.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработанная упрощенная методика оценки эксплуатационных затрат АЭС с учетом топливной составляющей позволяет наглядно и быстро проводить сравнительный анализ экономической эффективности различных вариантов реализации удлиненных топливных загрузок по сравнению с имеющимися вариантами для действующих и вновь строящихся АЭС.

Найденные схемы перегрузок топлива с учетом сформулированных критериев оптимизации могут использоваться в ВВЭР-1000 на действующих АЭС и в новых проектах АЭС с ВВЭР-1000(1200) для повышения эффективности использования ядерного топлива с учетом общих эксплуатационных затрат и возможного увеличения срока службы реакторного оборудования АЭС за счет снижения флюенса быстрых нейтронов.

Сформулированные критерии оптимизации параметров удлиненных топливных кампаний, использованные в данной работе, могут быть применены и при рассмотрении новых проектов ВВЭР, таких как ВВЭР-ТОИ и т.д.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- Результаты сопоставления различных вариантов реализации топливных загрузок с использованием разных схем перегрузок топлива по основным нейтронно-физическим и эксплуатационным характеристикам реактора.
- Разработанная упрощенная методика оценки экономической эффективности использования топлива на АЭС с учетом общих эксплуатационных затрат.
- Критерии оптимизации параметров топливной кампании и определенные по ним схемы перегрузок топлива при минимизации полных эксплуатационных затрат для 18-ой и 22-месячных топливных загрузок реакторов ВВЭР-1000(1200) с использованием новых конструкций ТВС с применением высотного профилирования в верхних и нижних торцевых частях ТВС для топливных элементов с гадолинием.

### **Достоверность полученных результатов и выводов**

Результаты расчетов основных нейтронно-физических характеристик активной зоны, полученные по программному комплексу ПРОСТОР, подтверждаются сопоставимостью с расчетными данными по штатным программам расчетного сопровождения эксплуатации ВВЭР, в частности, по программе БИПР-7А. Достоверность подтверждается сопоставимостью расчетных результатов с экспериментальными данными различных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 в течение десятков лет эксплуатации.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 167 страницах, содержит 21 таблицу, 67 рисунков и список цитируемой литературы из 71 наименования.

## **Апробация и реализация результатов исследования**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на VII Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий», г. Москва, 2018 г.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 3 работы в научных журналах и сборниках трудов конференций, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, включая 1 статью, входящую в базу данных *Web of Science* и *Scopus*, 1 статью в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследований, раскрыта новизна работы и её практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** содержится описание инструментальных и программных средств для проведения расчетных исследований, общее описание программного комплекса «ПРОСТОР» и функциональные возможности комплекса, состав программного комплекса «ПРОСТОР».

Приведено описание моделей в составе «ПРОСТОР» и их константного сопровождения, моделей нейтронной кинетики HARD\_NUT/N, моделей тепло гидравлики активной зоны «HARD\_NUT/T», тепло-гидравлического моделей реакторной установки «HARD\_NUT/PS», программного модулей GIW, описание константного сопровождения программного комплекса «ПРОСТОР» и результаты верификации программного комплекса «ПРОСТОР».

Приведены результаты верификации п/к ПРОСТОР по расчету выгорания топлива, которые убедительно доказывают возможность использования п/к ПРОСТОР для решения поставленных задач.

**Во второй главе** приведены основные результаты расчетов выгорания топлива для топливных загрузок реактора ВВЭР-1200 в соответствие с проектными данными для 12-ой и 18-ой месячной топливных кампаний при выходе в стационарный режим перегрузок ТВС. Картограммы указанных топливных загрузок показаны на рис. 1. В этой же главе проведена дополнительная проверка достоверности получаемых результатов по программному комплексу ПРОСТОР по данным штатной программы сопровождения эксплуатации БИПР-7А. Также данные расчеты проведены и для анализа значений параметров, отвечающих за теплотехническую безопасность активной зоны, которые не



Таблица 1. Основные нейтронно-физические параметры активной зоны стационарной загрузки 18-месячной топливной загрузки

Эфф., сут.	Высота извлечения рабочей группы ОР СУЗ, см.		Температура теплоносителя на входе в зону, °С		Тепловая мощность реактора, МВт		Критическая концентрация борной кислоты, г/кг		Максимальный коэффициент неравномерности мощности ТВС, о.е.		Максимальный коэффициент неравномерности энерговывделений по зоне, о.е.	
	БИПР-7А	ПРОСТОР	БИПР-7А	ПРОСТОР	БИПР-7А	ПРОСТОР	БИПР-7А	ПРОСТОР	БИПР-7А	ПРОСТОР	БИПР-7А	ПРОСТОР
0	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	7,13	7,23	1,26	1,26	1,55	1,56
40	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	6,20	6,34	1,25	1,26	1,49	1,51
80	336,6	355,3	289,2	289,2	3200	3200	5,58	5,93	1,24	1,24	1,45	1,46
120	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	5,01	5,53	1,22	1,24	1,45	1,46
140	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	4,74	5,34	1,22	1,25	1,45	1,48
160	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	4,50	5,17	1,33	1,26	1,48	1,51
180	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	4,28	5,02	1,25	1,28	1,51	1,56
200	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	4,08	4,89	1,27	1,31	1,55	1,60
220	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	3,92	4,79	1,29	1,34	1,61	1,66
260	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	3,67	4,51	1,35	1,37	1,73	1,65
280	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	3,55	4,28	1,37	1,37	1,74	1,61
320	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	3,16	3,63	1,37	1,34	1,58	1,54
340	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	2,87	3,24	1,36	1,33	1,56	1,54
380	336,6	355,3	298,2	298,2	3200	3200	2,16	2,40	1,34	1,31	1,58	1,55
400	336,6	336,6	298,2	298,2	3200	3200	1,74	1,92	1,33	1,30	1,60	1,57
420	336,6	336,6	298,2	298,2	3200	3200	1,31	1,48	1,32	1,30	1,62	1,56
440	336,6	329,1	298,2	298,2	3200	3200	0,85	1,03	1,31	1,29	1,60	1,56
460	336,6	321,6	298,2	298,2	3200	3200	0,39	0,58	1,30	1,28	1,57	1,57
500	336,6	325,4	295,5	295,2	2720	2560	0,00	0,40	1,28	1,28	1,61	1,61
520	336,6	344,1	293,4	294,1	2347	2400	0,00	0,20	1,28	1,28	1,65	1,68
529	336,6	355,3	292,4	293,7	2179	2400	0,00	0,04	1,28	1,28	1,67	1,71
539	336,6	355,3	291,6	292,5	2048	2240	0,00	0,04	1,28	1,28	1,69	1,71

распределение потока тепловых нейтронов. По нашему мнению скорость выгорания гадолиния в соответствие с библиотекой нейтронных сечений для БИПР-7А не соответствует реальной скорости выгорания гадолиния. Это доказывается многочисленными экспериментальными данными по многим энергоблокам АЭС с ВВЭР-1000. В программном комплексе ПРОСТОР этого дефекта нет, так как была проведена детальная пространственная дискретизация таблетки ТВЭГ, что позволяет существенно повысить точность выгорания гадолиния.

К примеру, на рис. 2 показаны результаты расчетов по программному комплексу ПРОСТОР, БИПР-7А и результаты экспериментальных измерений критической концентрации борной кислоты для 6-ой и 7-ой кампаний 3 энергоблока Калининской АЭС. Из них отчетливо виден дефект моделирования выгорания гадолиния в программе БИПР-7А, указанный выше.

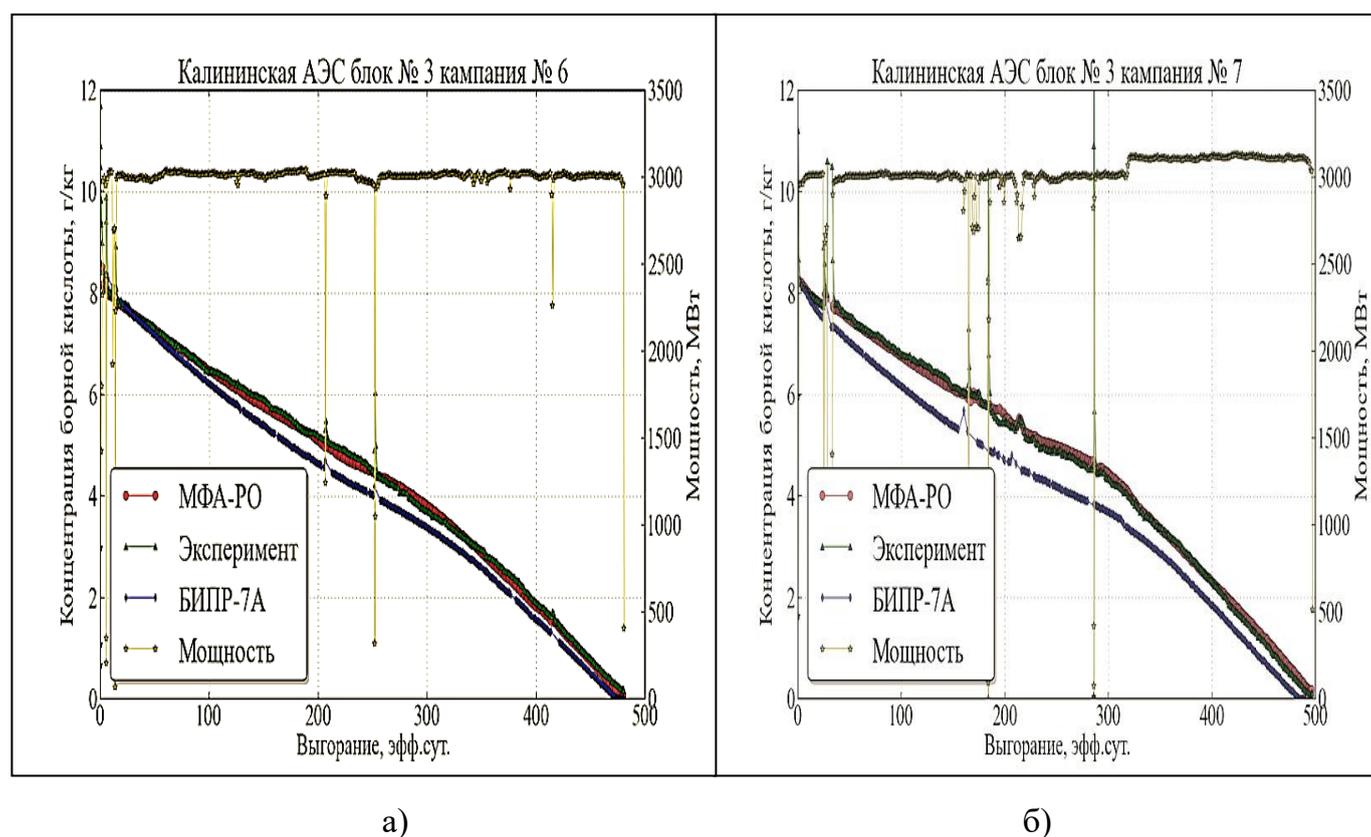


Рис. 2. Зависимость концентрации борной кислоты от времени: а) 6-ая кампания 3 блока Калининской АЭС; б) 7-ая кампания 3 блока Калининской АЭС.

Из рис. 2 наблюдается очень хорошая согласованность расчета по п/к ПРОСТОР с экспериментом. При более аккуратном моделировании выгорания гадолиния наблюдается более высокая скорость его выжигания, что приводит к улучшению размножающих свойств ТВС в более ранние моменты времени по сравнению с результатом расчета по программе БИПР-7А. Следствием сказанного становится увеличение критической концентрации борной кислоты и коэффициентов неравномерности по объему активной зоны в более ранние моменты времени, чем по расчету БИПР-7А. Конечно, это возможно не единственное объяснение, но наиболее вероятное.

Проведенный анализ и полученные результаты показывают пригодность выбранного инструментария и программного обеспечения для проведения дальнейших исследований.

**В третьей главе** приведена упрощенная методика оценки экономической эффективности использования топлива на АЭС с учетом общих эксплуатационных затрат. Данная методика основана не на осредненном за весь топливный цикл КИУМ, а на оценке КИУМ за интервал времени между перегрузками и стоимости всех ТВС, используемых за все время жизни корпусного оборудования. Такая оценка затрат для проведения экспресс-анализа представляется более удобной и прозрачной. Она, конечно, не учитывает изменений в стоимости топлива в зависимости от времени жизни корпуса реактора и от инфляционных процессов в стране, но зато даёт быструю и качественно верную оценку.

Из литературных источников были определены соотношения между различными компонентами эксплуатационных затрат, включая топливные. Это позволило построить упрощенное выражение для коэффициента приведенных эксплуатационных затрат по отношению к затратам для 12-месячной топливной загрузки.

Выражение имеет следующий вид:

$$K_{зп} = \frac{\frac{T_{кал} + \alpha \Delta T_{рем}}{T_{эфф}} + \beta_0 \frac{T_{эфф0} N_{ТВС} M_{топ}}{T_{эфф} N_{ТВС0} M_{топ0}} (0,7 + 0,3 \frac{p\%}{p_0\%})}{\frac{T_{кал0} + \alpha \Delta T_{рем}}{T_{эфф0}} + \beta_0}, \quad (1)$$

Где  $\alpha$  – доля эксплуатационных затрат во время профилактического ремонта при перегрузке топлива к затратам при эксплуатации блока на мощности,  $\alpha > 1$ ;  $\beta_0$  – относительный коэффициент затрат на топливо при добыче, изготовлении, транспортировке и хранении ядерного топлива для ТВС;  $\Delta T_{рем}$  – время на профилактический ремонт,  $\Delta T_{рем} = 32$  сутки;  $T_{эфф}$  – календарное длительность работы реактора между перегрузками, умноженное на отношение средней реальной мощности за кампанию реактора к базовой мощности  $W_0$ , эфф. сутки;  $T_{эфф0}$  – длительность кампании реактора на базовой мощности при параметрах 12-месячной топливной загрузки для действующего оборудования АЭС с ВВЭР-1200;  $M_{топ}$  – проектируемая масса топлива в одной ТВС;  $M_{топ0}$  – масса топлива в одной ТВС для действующих АЭС с ВВЭР-1000(1200);  $p\%$  – обогащение урана для выбранного варианта топливной загрузки;  $p_0\%$  – среднее обогащение топлива по урану-235, используемое на действующих АЭС;  $T_{кал}$  – календарная длительность работы реактора между перегрузками при параметрах исследуемой топливной загрузки для АЭС с ВВЭР-1000(1200);  $\Delta T_{кал0}$  – календарная длительность работы реактора между перегрузками при параметрах 12-месячной топливной загрузки для действующего оборудования АЭС с ВВЭР-1000(1200).

Построение удлиненных топливных кампаний реактора возможно при переходе на 20-22-месячный и до 24-месячного только на основе новой конструкции ТВС. И поэтому все дальнейшие исследования по оптимизации проводились на базе новых конструкций.

С целью поддержания высокой конкурентоспособности проекта ВВЭР-1000 проводятся постоянные работы по усовершенствованию топлива с целью обеспечения

современных требований ядерной безопасности и экономичности топливных загрузок (рис. 3).

## Ядерное топливо ВВЭР-1000

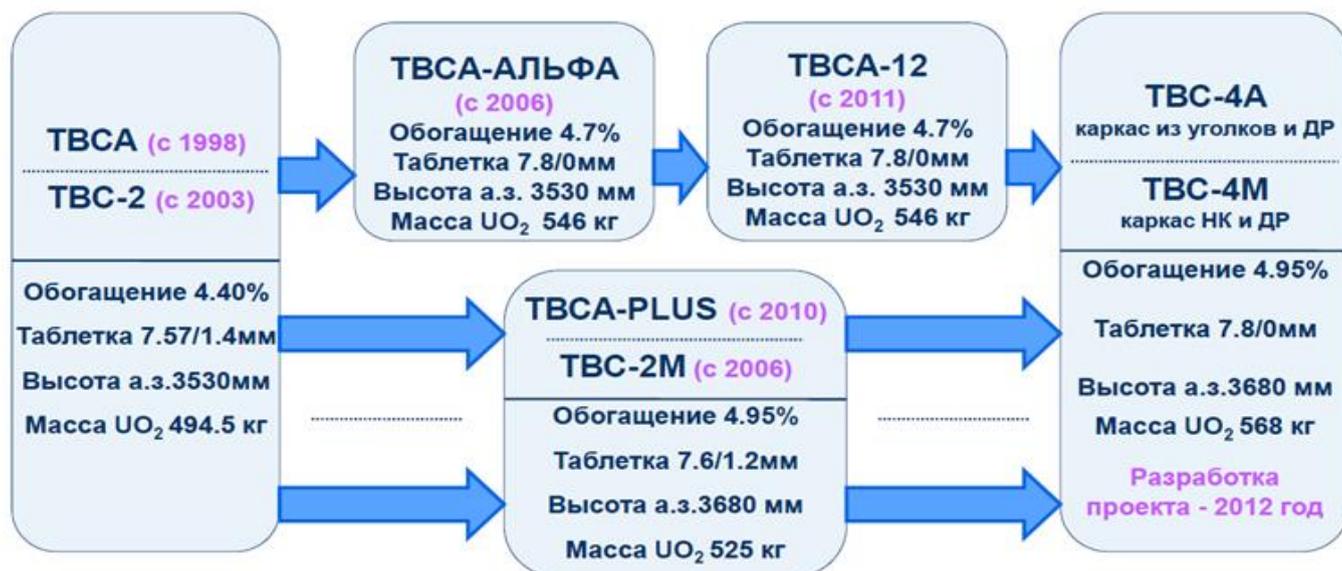


Рис. 3. Ядерное топливо ВВЭР-1000.

Увеличение массы ядерного топлива в тепловыделяющей сборке обеспечивается за счет:

- отказа от центрального отверстия в топливной таблетке;
- увеличения ее диаметра до 7,80 мм;
- уменьшения толщины оболочечных трубок тепловыделяющих элемент до 0,57 мм;
- увеличения высоты топливного столба на 150 мм.

Для реакторов типа ВВЭР–1000(1200) возможно использовать топливные таблетки двух видов:

- с внешним диаметром 7,6 мм и центральным отверстием диаметром 1,2 мм (ТВСА, ТВС-2, ТВСА-ПЛЮС, ТВС-2М);
- без центрального отверстия с внешним диаметром 7,8 мм (ТВСА-АЛЬФА, ТВСА-12, ТВС-4А, ТВС-4М).

В данной главе представлены способы оптимизации параметров различных топливных загрузок, которые сводятся к следующим.

1. Размещение на периферии топлива последнего и предыдущего срока пребывания в активной зоне для увеличения средней глубины выгорания выгружаемого топлива;

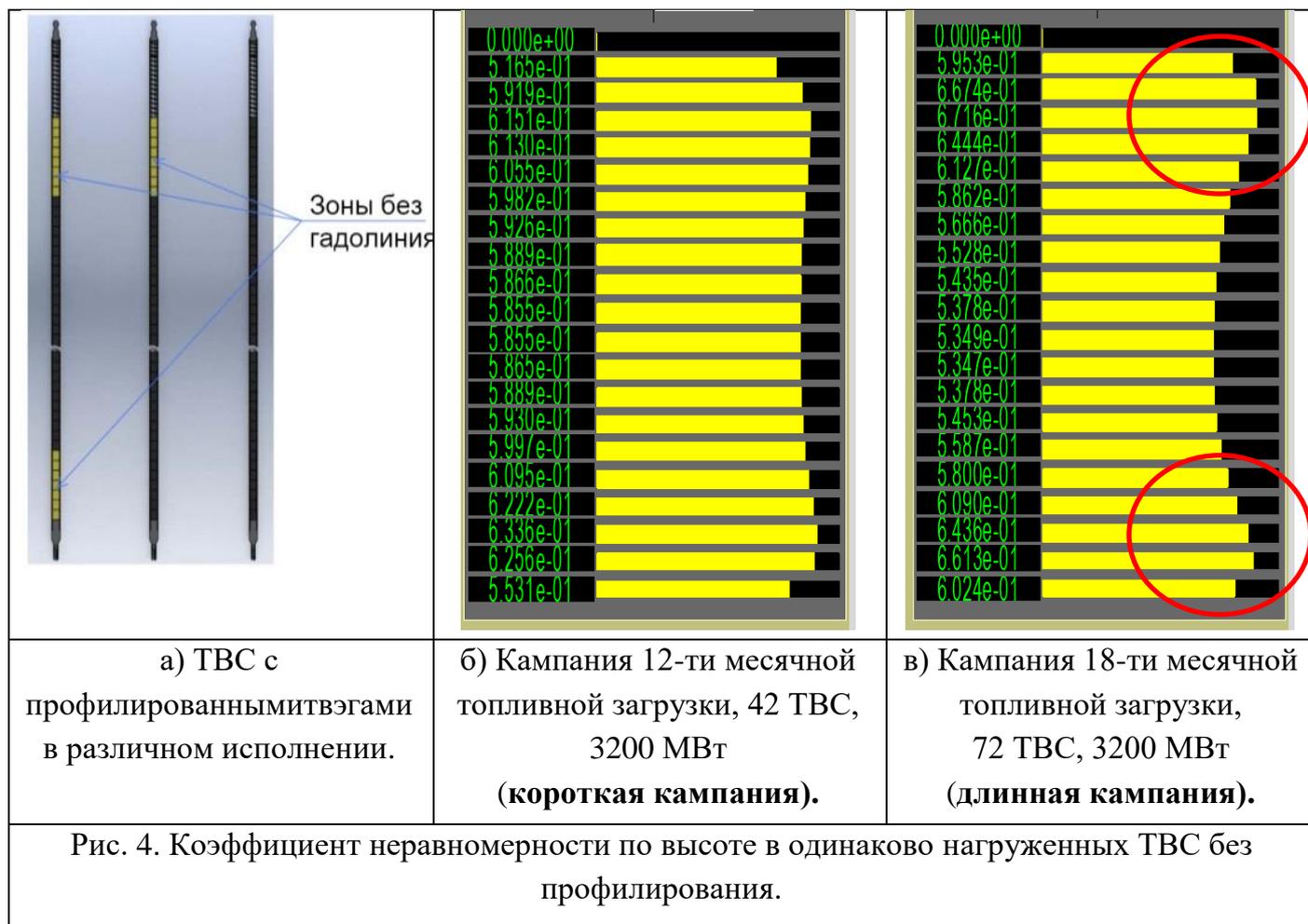
2. Специальное азимутальное распределение ТВС с выгоревшим топливом на периферии активной зоны с целью снижения максимального значения флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора;

3. Расстановка ТВС первого и последующего срока пребывания ТВС в центральной части активной зоны для обеспечения требований по не превышению максимальному значению относительной мощности ТВС в зоне ( $KQ_{\max} < 1,45$ );

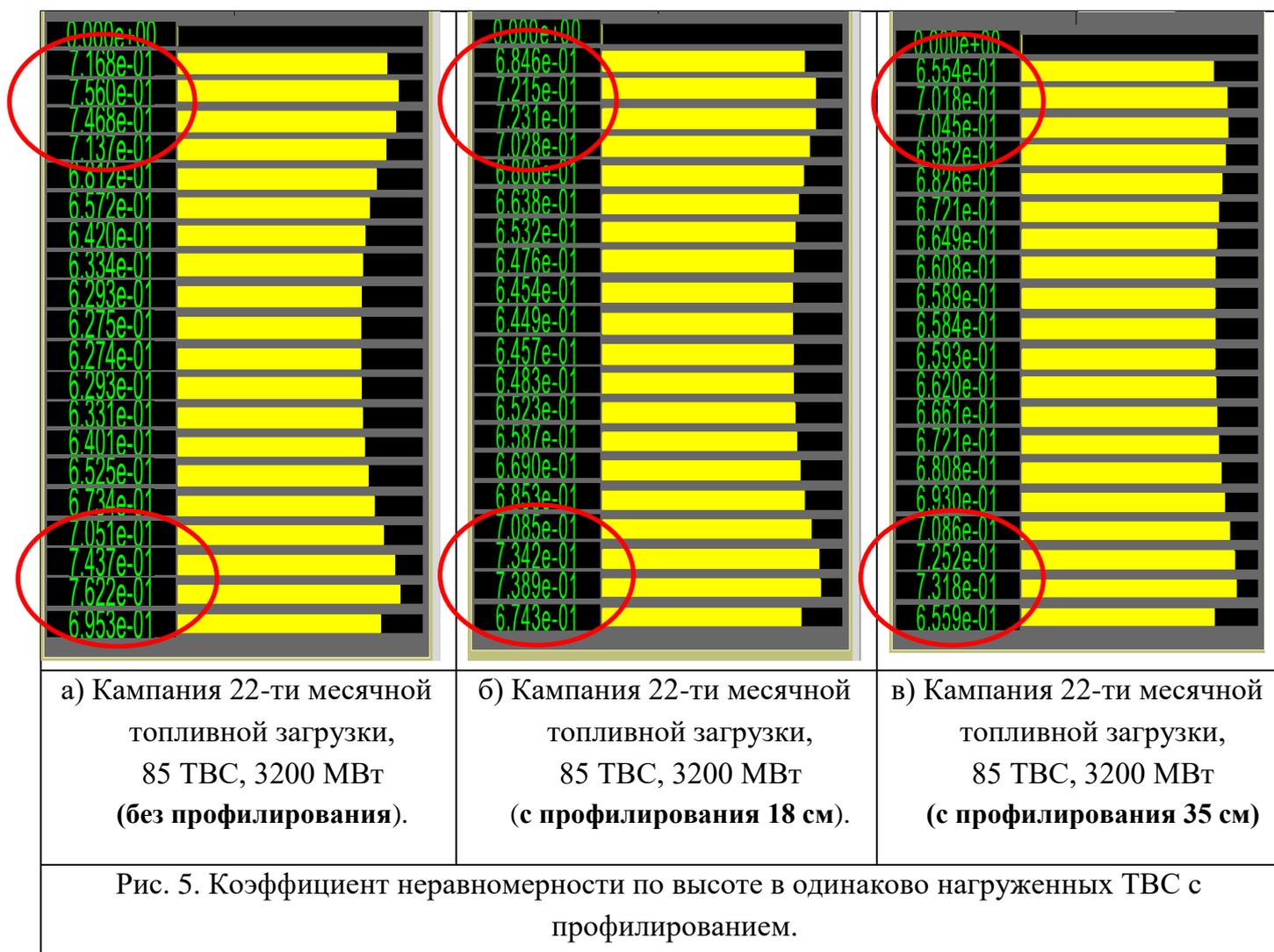
4. Обеспечение теплотехнической надежности активной зоны с использованием специальной стратегии перемещения рабочей управляющей группы ОР СУЗ в последней трети кампании;

5. Профилирование ТВЭГ по высоте (устранение гадолия в торцевых участках топливных элементов на длине порядка 17–36 см) для обеспечения не превышения полевых ограничений локальной мощности по объему активной зоны.

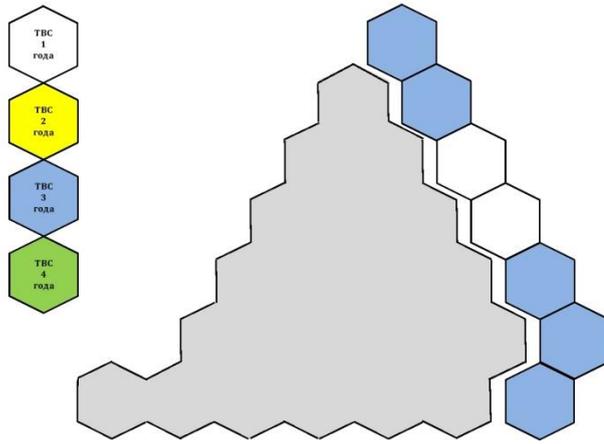
Для выбранных картограмм размещения топлива в активной зоне были проверены два вида профилирования ТВЭГ по высоте реактора в торцевых частях зоны. Выбрано наилучшее, а именно профилирование в торцевых частях протяженностью 35-36 см. На рис. 4 приведено высотное распределение для проектной стационарной топливной загрузки в конце кампании для 12-ти и 18-ти месячной кампании реактора ВВЭР-1200, из которых видно существенное увеличение локальной мощности в торцевых частях активной зоны для удлиненных кампаний.



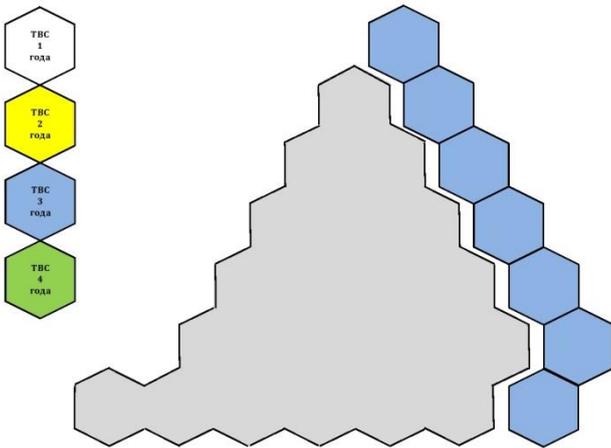
На рис. 5 показаны для сравнения результаты расчетов высотного распределения энерговыделений при разном высотном профилировании для 22-месячной кампании реактора, где видно, что высотное профилирование с протяженностью 36 см. заметно эффективней 18 см.



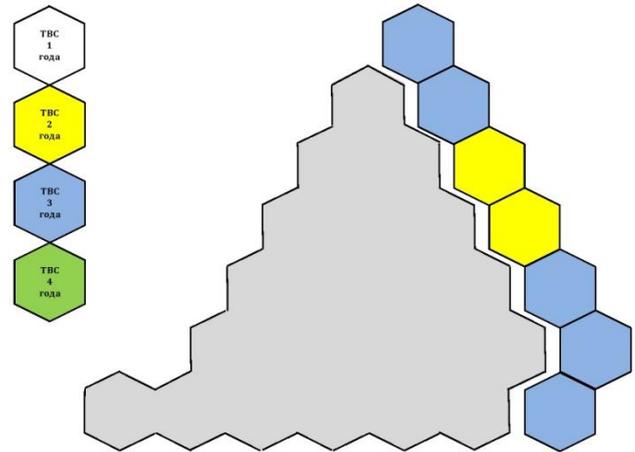
На рис.6 приведены все возможные схемы расстановок ТВС на периферии активной зоны для 18-ти месячной топливной загрузки. Для сравнительного анализа используется проектная топливная загрузка для ВВЭР-1000(1200) на действующих АЭС, показанная на рис. 6,а. Из этих вариантов выбирался наилучший по сформулированным критериям оптимизации.



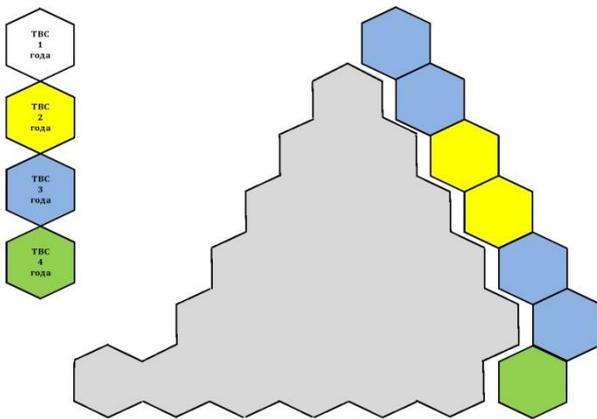
а) 67 ТВС, Действующая расстановка.



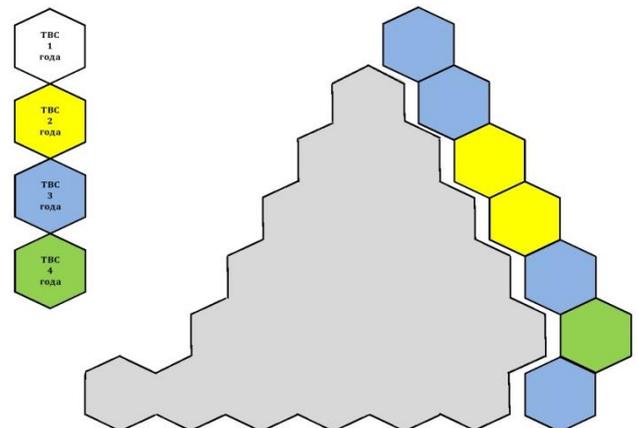
б) 60 ТВС, Все максимально выгоревшие ТВС на периферии, Вариант (1).



в) 60 ТВС, ТВС 2-го срока и 3-го срока на периферии, Вариант (2).



г) 61 ТВС, ТВС 2-го срока, 3-го срока и 4-го срока на периферии, Вариант (3).



д) 61 ТВС, ТВС 2-го срока, 3-го срока и 4-го срока на периферии, Вариант (4).

Рис. 6. Возможные варианты размещения ТВС с выгоревшим топливом на периферии активной зоны реактора с мощностью 3000(3120) МВт. а) Проектный вариант. б) Вариант (1). в) Вариант (2). г) Вариант (3). д) Вариант (4).

Для поиска оптимальной загрузки с меньшим числом ТВС по сравнению с проектным вариантом для 20-22 месячной кампании, преимущественно, с двумя сроками пребывания ТВС в активной зоне, в первую очередь, также определяются возможные конфигурации расстановки ТВС на периферии активной зоны. Их немного с учетом 60-ти градусной симметрии расстановки: всего три альтернативные расстановки ТВС. На рис. 7 приведены все возможные схемы расстановок ТВС на периферии активной зоны для 20-22-месячной топливной загрузки. Данная загрузка предусматривает, преимущественно, две перегрузки топлива за всю топливную кампанию. Для сравнительного анализа используется проектная топливная загрузка для ВВЭР-1200, показанная на этом же рисунке.

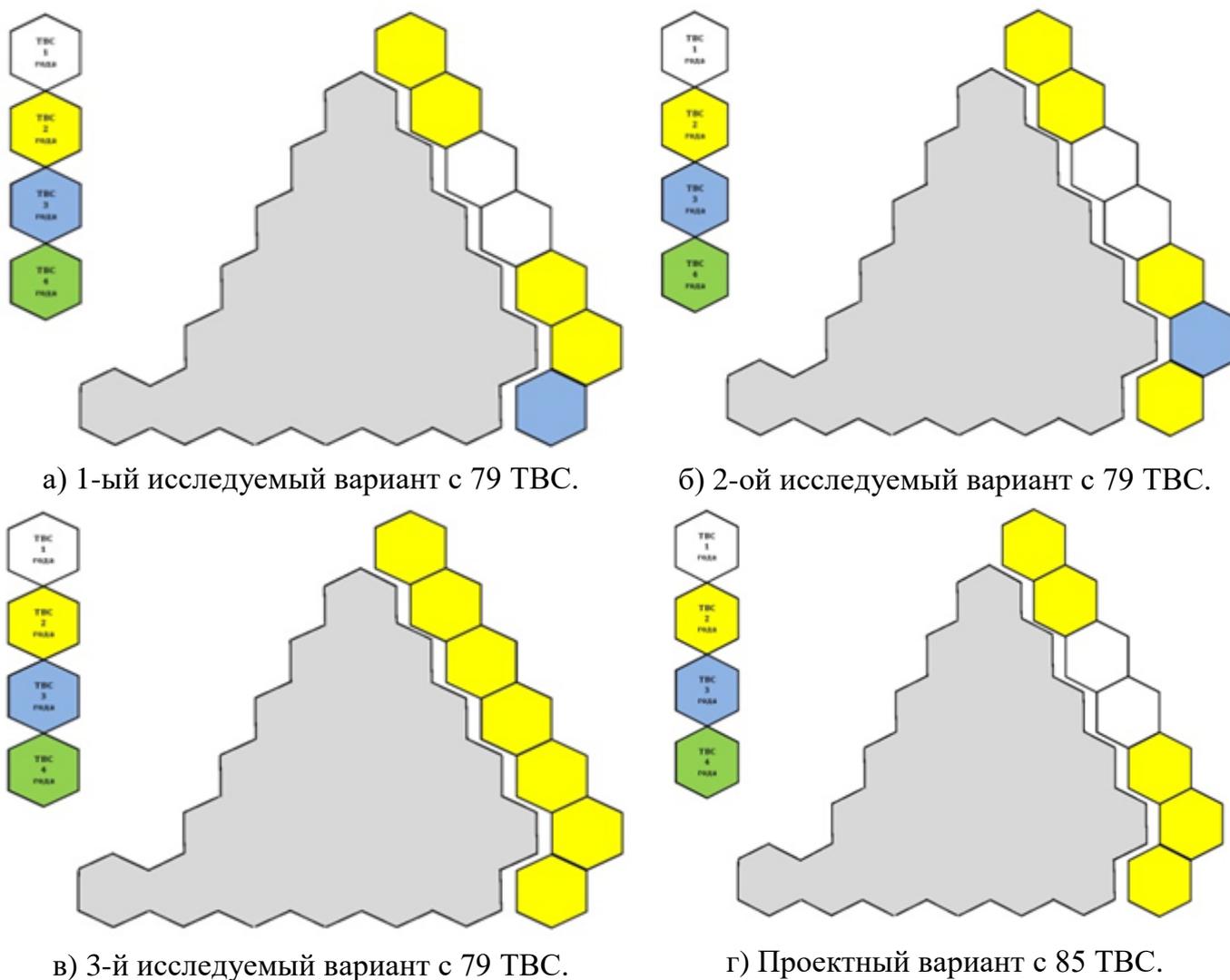
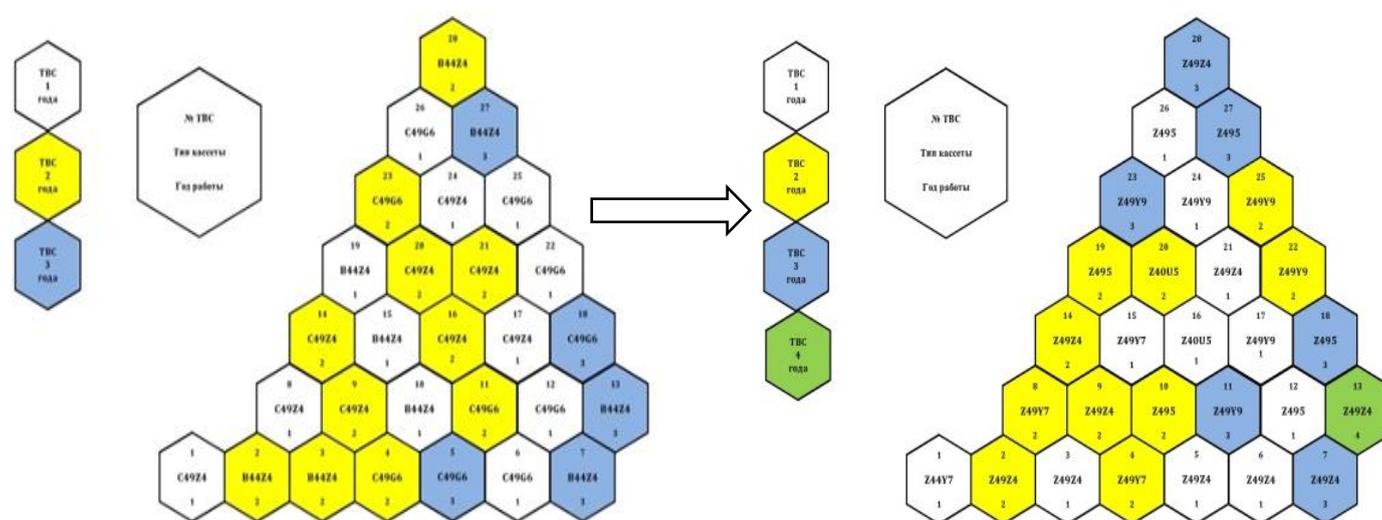


Рис. 7. Все возможные схемы расстановок ТВС на периферии активной зоны для 20-22 месячной топливной загрузки.

Что касается необходимости в специальной стратегии перемещения рабочей группы ОР СУЗ в конце кампании, то это объясняется следующими обстоятельствами. Выгорание топлива на базовой мощности к моменту кампании 350 эфф. суток приводит к высотному распределению нейтронного поля, показанному на рис. 4 и 5, и соответственно к

превышению локальной мощности полевых ограничений по объёму активной зоны при неизменном положении управляющих групп ОР СУЗ. Для обеспечения полевых ограничений локальной мощности нужно погрузить 12 группу ОР СУЗ в границах, разрешенных Техническим Регламентом при работе энергоблока на базовой мощности. Группа погружалась до 80%извлечения по высоте активной зоны. Необходимость этого погружения связано с тем локальная мощность в верхней части активной зоны превышает полевые ограничения к концу кампании.

В данной главе представлены результаты расчета основных параметров пяти исследуемых вариантов 18-месячной топливной загрузки для реакторов ВВЭР с номинальной тепловой мощностью 3000(3120) МВт. Из них была выбрана топливная загрузка в соответствии с разработанными принципами оптимизации (рис. 8).



а) Проектная загрузка, 67 ТВС,  
18-месячная загрузка, 3000(3120) МВт.

б) Оптимальная загрузка, 61 ТВС,  
18-месячная загрузка, 3000(3120) МВт.

Рис. 8. Картограмм стационарной загрузки 18-месячной топливной загрузки.

В таблицах 3–6 приведены тип ТВС, длительность кампании, среднее обогащение, коэффициент приведенных затрат и глубина выгорания топлива в 12 и 18-месячной топливной загрузке, характеризующих флюенс нейтронов на корпус и безопасность использования топлива на АЭС.

В таблицах 3 и 5 приведены основные результаты диссертационной работы для мощности реактора 3000 МВт и 3120 МВт соответственно. Из таблиц для выбранного варианта видно, что для удлиненной топливной загрузки средняя глубина выгорания заметно выше, что в свою очередь уменьшает стоимость топлива и уменьшается коэффициент приведенных затрат. Максимальное выгорание ниже, чем для удлиненной проектной и короткой проектной загрузки. Из этого следует, что равномерность выгружаемого топлива лучше.

Таблица 3. Показатели: тип ТВС, длительность компании, среднее обогащение, коэффициент приведенных затрат и глубина выгорания топлива в 12 и 18-месячной топливной загрузке, 3000 МВт.

Число ТВС	42 ТВС	61 ТВС	67 ТВС
Тип ТВС	ТВСА-АЛЬФА/ ТВСА-12		
Высота а.з. мм	3530	3530	3530
Масса UO <sub>2</sub> , кг	546	546	546
T <sub>эфф</sub> (сутки)	405	537	564
T <sub>кал</sub> (сутки)	417	549	576
n %	4,77%	4,78%	4,68%
K <sub>зп</sub> *(±0,001)**	1,000	0,988	0,993
Среднее выгорание выгружаемого топлива Вп, МВт·сут/кг U	61,49	54,96	52,36
Максимальное (среднее по ТВС) выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кг U	64,72	61,13	64,37
Максимальное выгорание топлива ТВЭЛ в выгружаемом топливе, МВт·сут/кг U	68,62	65,33	68,52

\* цифры взяты из наиболее достоверной области.

\*\* погрешность оценки K<sub>зп</sub>, получена через коэффициент чувствительности  $\partial K_{зп}/\partial T_{эфф}$  и среднеквадратичное отклонение по всем данным АЭС расчетной длительности топливной загрузки, которая составляет величину 4 эфф. сут.

Таблица 4. Азимутальное распределение флюенса нейтронов на корпус, построенное на основе азимутального распределения потока нейтронов с энергией ( $\times 10^{10}$  нейтрон/см<sup>2</sup>·сек) больше 0,5 МэВ на внутренней поверхности корпуса серийного ВВЭР-1000 на уровне 60 см ниже середины активной зоны.

$\theta_i$ , град.	0	7,5	15	22,5	37,5	45	52,5
Проектная схема, 3000 МВт (42 ТВС)	4,20	4,60	2,80	2,00	2,80	4,60	4,20
Проектная схема, 3000 МВт (67 ТВС)	3,75	4,15	2,80	1,78	2,50	4,81	5,20
Оптимальная схема, 3000 МВт (61 ТВС)	3,94	4,17	2,63	1,21	1,67	4,24	4,13

Таблица 5. Показатели: тип ТВС, длительность компании, среднее обогащение, коэффициент приведенных затрат и глубина выгорания топлива в 12 и 18-месячной топливной загрузке, 3120 МВт.

Число ТВС	42 ТВС	61 ТВС	67 ТВС
Тип ТВС	ТВС-4А/ ТВС-4М		
Высота а.з. мм	3680	3680	3680
Масса UO <sub>2</sub> , кг	568,4	568,4	568,4
T <sub>эфф</sub> (сутки)	401	538	562
T <sub>кал</sub> (сутки)	413	551	575
n %	4,77%	4,78%	4,68%
K <sub>эл</sub> *(±0,001)**	1,000	0,986	0,991
Среднее выгорание выгружаемого топлива Вп, МВт·сут/кг U	61,37	55,04	52,37
Максимальное (среднее по ТВС) выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кг U	64,38	61,21	64,40
Максимальное выгорание топлива твэла в выгружаемом топливе, МВт·сут/кг U	68,23	65,29	68,48

\* цифры взяты из наиболее достоверной области.

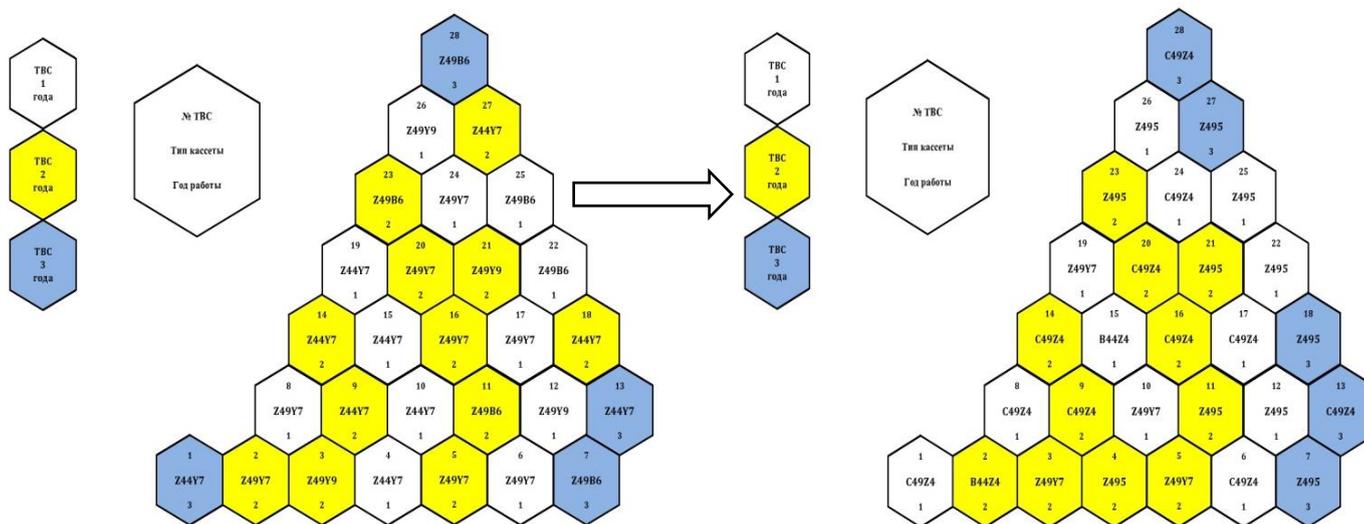
\*\* погрешность оценки K<sub>эл</sub>, получена через коэффициент чувствительности  $\partial K_{эл}/\partial T_{эфф}$  и среднеквадратичное отклонение по всем данным АЭС расчетной длительности топливной загрузки, которая составляет величину 4 эфф. сут.

Таблица 6. Азимутальное распределение флюенса нейтронов на корпус, построенное на основе азимутального распределения потока нейтронов с энергией ( $\times 10^{10}$  нейтрон/см<sup>2</sup>·сек) больше 0,5 МэВ на внутренней поверхности корпуса серийного ВВЭР-1000 на уровне 60 см ниже середины активной зоны.

$\theta_i$ ,град.	0	7,5	15	22,5	37,5	45	52,5
Проектная схема, 3000 МВт (42 ТВС)	4,20	4,60	2,80	2,00	2,80	4,60	4,20
Проектная схема, 3000 МВт (67 ТВС)	3,71	4,07	2,74	1,77	2,46	4,72	5,10
Оптимальная схема, 3000 МВт (61 ТВС)	3,88	4,10	2,57	1,21	1,65	4,14	3,98

Из таблиц 4 и 6 следует, что максимальное значение флюенса потока быстрых нейтронов на корпус минимально для выбранного варианта, это приводит к увеличению срока службы корпусного оборудования и приводит к повышению экономической эффективности.

В данной главе также представлены результаты расчета основных параметров пяти исследуемых вариантов 18-месячной топливной загрузки для реакторов ВВЭР с номинальной тепловой мощностью 3200 МВт. Из них была выбрана топливная загрузка в соответствии с разработанными способами оптимизации (рис. 9).



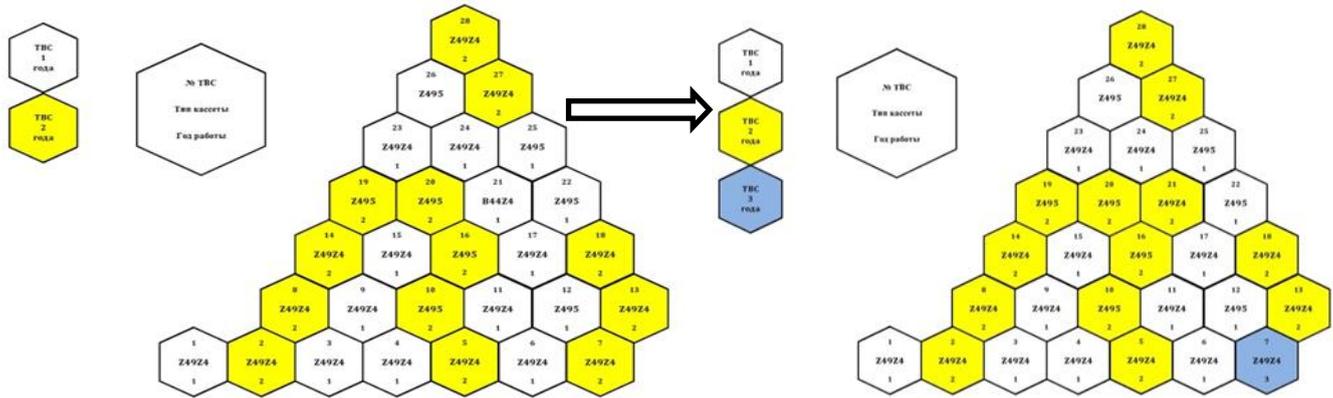
а) Проектная загрузка, 72 ТВС  
3200 МВт, 18-месячная загрузка.

б) Оптимальная загрузка, 67 ТВС  
3200 МВт, 18-месячная загрузка.

Рис. 9 Картограмм стационарной загрузки 18-месячной топливной загрузки.

Помимо расчетов, выполненных на базе новых конструкций ТВС, были проведены расчеты для указанного выше оптимального варианта топливной загрузки и схемы перегрузок на базе используемых на действующих АЭС конструкций ТВС. Результаты этих расчетов подтвердили те же преимущества выбранного варианта по сравнению с проектным вариантом топливной загрузки.

Здесь же представлены результаты расчета основных параметров четырех исследуемых вариантов 20-22-месячной топливной загрузки для реакторов ВВЭР с номинальной тепловой мощностью 3200 МВт. Из них также была выбрана оптимальная топливная загрузка в соответствии с разработанными принципами оптимизации (рис. 10).



а) Проектная загрузка, 85 ТВС, 3200 МВт,  
22-месячная загрузка.

б) Оптимальная загрузка, 79 ТВС,  
3200 МВт, 22-месячная загрузка.

Рис. 10. Картограмм стационарной загрузки 22-месячной топливной загрузки.

В таблицах 7–9 приведены тип ТВС, длительность компании, среднее обогащение, коэффициент приведенных затрат и глубина выгорания топлива в 12, 18 и 21-22-месячной топливной загрузке, характеризующих флюкс нейтронов на корпус и безопасность использования топлива на АЭС.

Таблица 7. Показатели: длительность компании, среднее обогащение, коэффициент приведенных затрат и глубина выгорания топлива в 12, 18 и 21-22-месячной топливной загрузке, 3200 МВт.

	42 ТВС	18-месячная топливная загрузка		22-месячная топливная загрузка	
		67 ТВС	72 ТВС	79 ТВС	85 ТВС
Число ТВС	42 ТВС	67 ТВС	72 ТВС	79 ТВС	85 ТВС
Тип ТВС	ТВС-4А / ТВС-4М				
Высота а.з. мм	3730	3730	3730	3730	3730
Масса UO <sub>2</sub> , кг	580	580	580	580	580
T <sub>эфф</sub> (сутки)	394	562	578	640	662
T <sub>кал</sub> (сутки)	405	576	592	652	673
n %	4,77%	4,72%	4,78%	4,88%	4,82%
K <sub>зп</sub> * (±0,001)**	1,000	0,995	1,004	0,991	1,000
Среднее выгорание выгружаемого топлива Вп, МВт·сут/кг U	60,62	52,32	50,84	50,83	48,83
Максимальное (среднее по ТВС) выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кг U	63,60	60,78	65,88	56,48	57,03
Максимальное выгорание топлива ТВЭЛ в выгружаемом топливе, МВт·сут/кг U	67,61	64,87	69,78	60,10	60,83

\* цифры взяты из наиболее достоверной области.

\*\* погрешность оценки K<sub>зп</sub>, получена через коэффициент чувствительности  $\partial K_{зп} / \partial T_{эфф}$  и среднеквадратичное отклонение по всем данным АЭС расчетной длительности топливной загрузки, которая составляет величину 4 эфф. сут.

Таблица 8. Азимутальное распределение флюенса нейтронов на корпус, построенное на основе азимутального распределения потока нейтронов с энергией ( $\times 10^{10}$  нейтрон/см<sup>2</sup>·сек) больше 0,5 МэВ на внутренней поверхности корпуса серийного ВВЭР-1000 на уровне 60 см ниже середины активной зоны.

$\theta_i$ , град.	0	7,5	15	22,5	37,5	45	52,5
Проектная схема, 3200 МВт (72 ТВС)	4,19	4,71	3,16	1,79	2,45	5,10	4,70
Оптимальная схема, 3200 МВт (67 ТВС)	4,10	4,32	2,75	1,78	2,49	4,44	3,95

Таблица 9. Азимутальное распределение флюенса нейтронов на корпус, построенное на основе азимутального распределения потока нейтронов с энергией ( $\times 10^{10}$  нейтрон/см<sup>2</sup>·сек) больше 0,5 МэВ на внутренней поверхности корпуса серийного ВВЭР-1000 на уровне 60 см ниже середины активной зоны.

$\theta_i$ , град.	0	7,5	15	22,5	37,5	45	52,5
Проектная схема, 3200 МВт (85 ТВС)	4,99	5,67	3,29	1,77	2,47	5,29	5,19
Оптимальная схема, 3200 МВт (79 ТВС)	4,44	5,59	3,19	1,65	2,31	5,14	5,10

В таблице 7 приведены основные результаты диссертационной работы для мощности реактора 3200 МВт. Для выбранного варианта из таблицы видно, что для удлиненной топливной загрузки средняя глубина выгорания заметно выше, что в свою очередь уменьшает стоимость топлива и уменьшается коэффициент приведенных затрат. Максимальное выгорание ниже, чем для удлиненной проектной и короткой проектной загрузки. Из этого следует, что равномерность выгружаемого топлива лучше.

Из таблиц 8 и 9 следует, что максимальное значение распределение потока нейтронов (флюенс) минимально для выбранного варианта, это приводит к увеличению срока службы корпусного оборудования и приводит к повышению экономической эффективности.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная методика расчета эксплуатационных затрат, включая топливную составляющую затрат, с целью быстрой и наглядной оценки экономических показателей эксплуатации на АЭС для проведения сравнительного анализа различных вариантов реализации топливных загрузок;
2. С помощью разработанных критериев оптимизации параметров топливной кампании с целью снижения совокупных эксплуатационных затрат АЭС определена

оптимальная загрузка и схема перегрузки топлива для 18-ти месячной кампании. Это позволило снизить число загружаемых ТВС с 67 до 61 и снизить максимальное значение флюенса нейтронов на корпус от 6% до 33% при соблюдении всех требований по безопасности активной зоны.

3. С помощью разработанных критериев оптимизации параметров топливной кампании с целью снижения совокупных эксплуатационных затрат АЭС определена оптимальная загрузка и схема перегрузки топлива для 20-22-месячной кампании. Это позволило снизить число загружаемых ТВС с 85 до 79 и снизить максимальное значение флюенса нейтронов на корпус от 1,5% до 16% при соблюдении всех требований по безопасности активной зоны.

4. Определена оптимальная топливная загрузка и соответствующая схема перегрузок топлива для ВВЭР-1200 для 22-ти месячной длительности работы между перегрузками с использованием новых конструкций ТВС: ТВС-4А и ТВС-4М с удлинением топливного столба до 3730 мм.

5. На основе многочисленных расчетов различных вариантов удлиненных топливных кампаний доказано необходимость профилирования ТВЭГ в торцевых частях активной зоны и обязательное погружение рабочей группы органов управления до 79–81% извлечения в последней трети кампании с целью выполнения требований по обеспечению теплотехнической безопасности активной зоны. Наилучшее профилирование составляет до 36 см как сверху, так внизу активной зоны, и является обязательным, как и погружение органов управления, для проектных и исследованных вариантов топливных загрузок.

Для найденных оптимальных схем перегрузок топлива показано их преимущество по сравнению с проектным 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 оптимальных 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.

Необходимо отметить, что полученные результаты на базе новой конструкции (ТВСА-АЛЬФА, ТВСА-12, ТВС-4А, ТВС-4М) справедливы и для используемых в настоящее время конструкций ТВС и могут быть применены уже сейчас на действующих АЭС для 18-месячной кампании реактора.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хашламун Т.М., Выговский С.Б. Исследование возможности повышения экономичности использования топлива на АЭС с ВВЭР-1000 для 18-ти месячного топливного цикла. – Ядерная физика и инжиниринг, 2017, т. 8, № 6, с. 1–10.
2. Хашламун Т.М., Выговский С.Б., Лескин С.Т., Думан А.С. Определение 18-ти месячного топливного цикла при минимизации топливных затрат на базе эксплуатируемых конструкций ТВС в реакторах ВВЭР-1200. – Известия вузов. Сер.: Ядерная энергетика, 2018, № 3, с. 113–124.
3. Хашламун Таха. М.Р., Выговский С.Б. Расчетное исследование возможности снижения топливных затрат на АЭС при реализации удлиненных топливных циклов реакторов ВВЭР 1000(1200). – В сб.: Докл. VII Междунар. молодежной научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий», ч. 2 – М.: НИЯУ МИФИ, 2018, с. 319–320.