

Перспективы повышения эффективности использования топлива в рамках проекта АЭС-2006

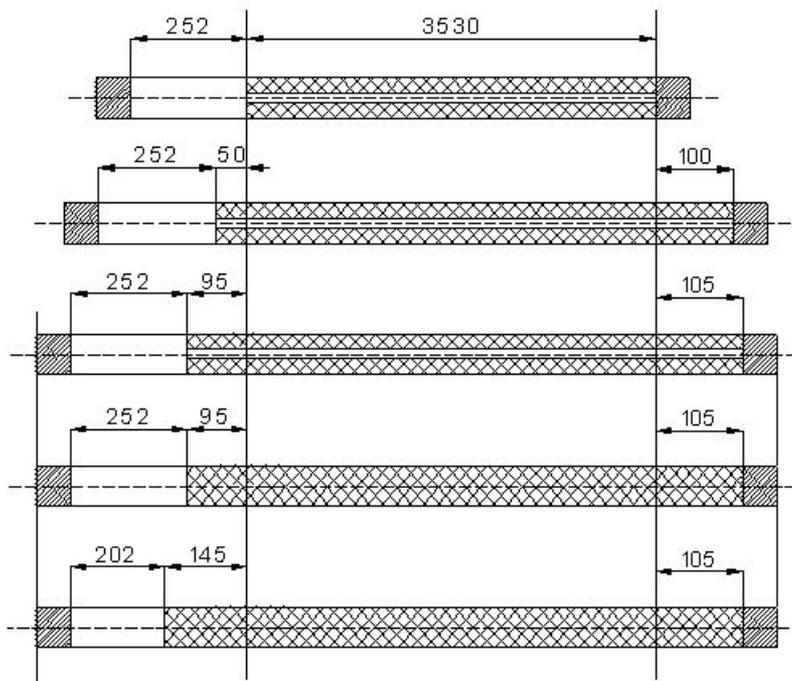
К.Ю. Куракин, Ю.А. Ананьев, А.К. Горохов,
И.Н. Васильченко, С.Н. Кобелев, В.В. Вьялицин,
Б.Г. Козак, О.А. Тимофеева, А.Н. Устинов
ОКБ «Гидропресс»

Требования к топливным циклам в проекте РУ АЭС-2006

- По проектной стратегии использования топлива: применяются четырех- пятигодичные топливные циклы с одной перегрузкой в 12 (18) месяцев. РУ и активная зона должны обеспечивать возможность работы с межперегрузочным периодом до 24 месяцев;
- По коэффициенту готовности: средний за весь срок службы АЭС коэффициент готовности блока при работе в базовом режиме – не менее 92 %, что определяет требования к продолжительности работы на номинальной мощности:
 - в 12-ти месячном топливном цикле – не менее 336 эфф. сут.;
 - в 18-ти месячном топливном цикле – не менее 504 эфф. сут.;
 - в 24-х месячном топливном цикле – не менее 672 эфф. сут.;
- По выгоранию: предел среднего выгорания топлива ТВС с учетом инженерного коэффициента запаса – 70 МВт*сут/кгU;
- По снижению флюенса на корпус и ВКУ: используются схемы перегрузки, уменьшающие утечки нейтронов из активной зоны;
- По коэффициентам реактивности: обратные связи должны обеспечивать свойство внутренней самозащищенности активной зоны в соответствии с требованиями нормативных документов;
- По ограничению распределения энерговыделения: на стадии формирования ПООБ устанавливаются следующие ограничения, обоснованные анализом безопасности проекта:
 $K_q \leq 1,40$, $K_r \leq 1,57$, $Q_{lmax} \leq 420^* \text{ Вт/см}$

* с учетом инженерного коэффициента запаса и коэффициента неточности знания и поддержания мощности реактора

Увеличение загрузки топлива в активной зоне ВВЭР-1200



Реактор	ТВС	∅ таблетки, мм/ ∅ отверстия, мм	Высота топливного столба, мм	Масса топлива, кг в твэле/ в ТВС/ в активной зоне/	Процент увеличения, %
ВВЭР-100 0	ТВС-2	7,57 1,4	3530	1,575 491,4 80098	-
	ТВС-2М	7,6 1,2	3680	1,671 521,3 84973	6,1
ВВЭР-1200 0	ТВС-120 0 I этап	7,6 1,2	3730	1,694 528,4 86128	7,5
	ТВС-120 0 II этап	7,8 0,0	3730	1,829 570,8 93 040	16,2
	ТВС-120 0 III этап	7,8 0,0	3780	1,854 578,5 94 287	17,7

Основные параметры активной зоны ВВЭР-1200

Наименование параметра	Значение
Количество ТВС в активной зоне, шт	163
Мощность реактора тепловая (номинальная), МВт	3200
Расход теплоносителя через реактор (номинальный), м³/ч	86000
Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, абсолютное (номинальное), МПа	16,2
Температура теплоносителя на входе в реактор при работе на 100 % номинальной мощности, °С	298,2
Шаг размещения ТВС в активной зоне, см	23,6
Количество ТВС с ОР СУЗ, шт	121
Количество ПЭЛ в ПС СУЗ	18

Стационарные топливные загрузки* ВВЭР-1200

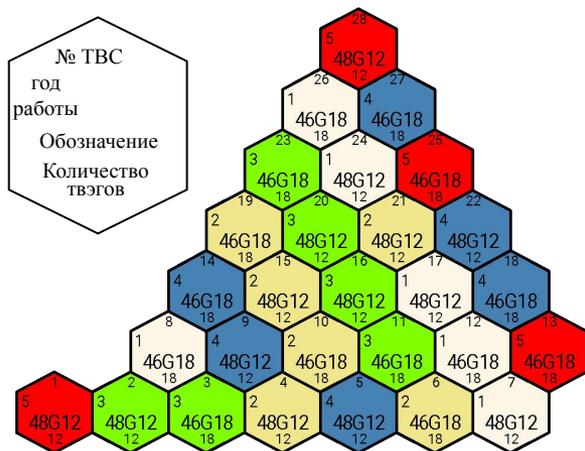


Рис. – Картограмма топливной загрузки с ежегодной подпиткой 36 ТВС

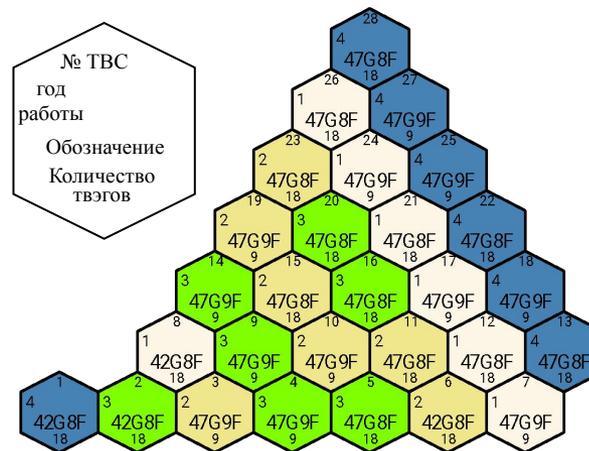


Рис. – Картограмма топливной загрузки с ежегодной подпиткой 42 ТВС

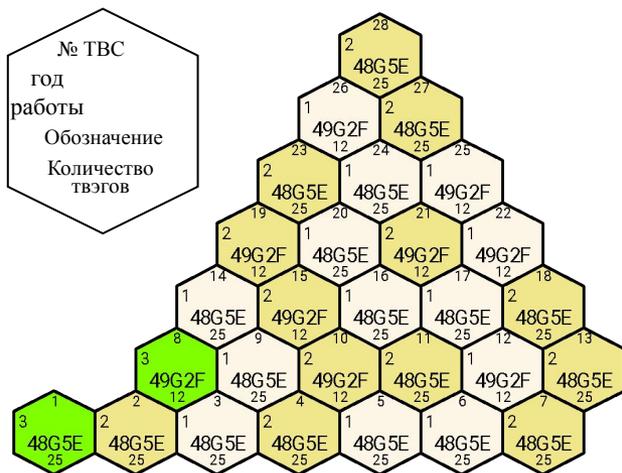


Рис. – Картограмма топливной загрузки с подпиткой 78 ТВС

*Представленные топливные загрузки описывают возможные варианты по реализации трех различных стратегий использования топлива в активной зоне ВВЭР-1200 и требуют последующей оптимизации в отношении всей совокупности нейтронно-физических характеристик

В качестве вариантов стационарных топливных циклов на рисунках представлены картограммы загрузок, разработанные в ОКБ «Гидропресс» с использованием аттестованного программного комплекса САПФИР_95&RC_ВВЭР

Основные характеристики топливных загрузок

Наименование характеристики	Значение			
Количество ТВС, загружаемых при перегрузке, шт:	36	36	42	78
Этап увеличения объема топлива	I	III	I	I
Среднее обогащение топлива подпитки по ^{235}U , массовый %	4,77	4,77	4,71	4,85
Длительность топливной загрузки, эфф. сут:				
- при работе на номинальной мощности	297	324	335,5	521
- с учетом работы на мощностном эффекте	315	345,5	357,4	–
Выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кгU:				
- среднее по всем ТВС	56,2	56,5	54,5	45,6
- максимальное по ТВС	63,9	63,9	57,1	64,0
Максимальная в ходе работы топливной загрузки относительная мощность ТВС (K_q):	1,41	1,39	1,35	1,37
Максимальная в ходе работы топливной загрузки относительная мощность твэла (K_r):	1,56	1,55	1,56	1,56
Максимальная линейная мощность твэла (Ql), Вт/см:	376	365	375	384
Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя на МКУ мощности в начале кампании $(\partial\rho/\partial t)(\partial\gamma)\cdot 10^5$, 1/С:	-9,6	-10,0	-4,7	-3,4
Коэффициент реактивности по плотности теплоносителя на МКУ мощности в начале кампании $(\partial\rho/\partial\gamma)\cdot 10^2$, 1/(г/см ³):	5,5	5,8	2,7	1,9
Коэффициент реактивности по температуре топлива на МКУ мощности в начале кампании $(\partial\rho/\partial t_r)\cdot 10^5$, 1/С:	-3,2	-3,3	-3,2	-3,1

Оценка эффективности использования топлива

Топливная составляющая стоимости единицы вырабатываемой электроэнергии:

$$C = \frac{\sum_{\text{этапы}} F_i}{\sum_{\text{время}} E(t)}$$

где:

- F_i - стоимость i -ой составляющей производства (утилизации) партии топлива, загружаемой в ходе перегрузки;
- $E(t)$ - количество электроэнергии (нетто), произведенной за период времени t от начала до конца работы топливной загрузки (в соответствии с ТЗ на проектирование АЭС-2006 принимаем номинальную электрическую мощность турбоустановки 1160 МВт, учитывая затраты на собственные нужды, 7 %, электрическая мощность (нетто) составляет 1078,8 МВт).

Оценка эффективности использования топлива.

Исходные данные [1, 2]

Составляющая топливного цикла	Базовая цена единицы продукции	Диапазон значений для анализа чувствительности
Закупка урана, \$/кгU	50	40 ÷ 234
Конверсия, \$/кгU	8	6 ÷ 11
Обогащение, \$/ЕРР	110	80 ÷ 120
Изготовление, \$/кгU	275	200 ÷ 350
Транспортировка и промежуточное хранение отработавшего топлива, \$/кгU	290	76 ÷ 365
Инкапсулирование и захоронение, \$/кгU	768	176 ÷ 844

1 «Экономика ядерного топливного цикла». ОЭСР (АЯЭ), 1994. Перевод Информ-Атом, 1998.

2 J.M. McMurray «The relationship between the uranium market price and supply-demand relationships» Proceedings of a technical meeting organized by the IAEA in cooperation with the OECD Nuclear Energy Agency and DIAMO State Owned Enterprise held in Straz, Czech Republic, 6–8 September 2004, pp. 63 – 72.

Оценка эффективности использования топлива.

Исходные данные [1, 2]

Наименование	Значения
Концентрация урана в отвалах обогащения, %	0,25
Время, предваряющее реакторный цикл (до даты загрузки реактора), мес.:	24
- закупка урана	18
- конверсия	12
- обогащение	6
- изготовление топлива	
Время запаздывания (после даты выгрузки отработавшего топлива), лет:	10
- транспортировка отработавшего топлива	40
- инкапсулирование и захоронение отработавшего топлива	
Коэффициент потерь, %:	0,5
- при конверсии	1,0
- при изготовлении топлива	0
- при других операциях	
Норма дисконтирования для базового случая / для анализа чувствительности, %	0 / 0 ÷ 15

Оценка эффективности использования топлива. Стационарная загрузка ВВЭР-1200 с ежегодной подпиткой 42 ТВС

Составляющая топливного цикла	Стоимость топливного цикла, миллс/кВт·ч	
	Для базовой цены единицы продукции (Цб)	Для заданного диапазона цен (Ц- ÷ Ц+)
Закупка урана	1,11	0,89 ÷ 5,22
Конверсия	0,18	0,13 ÷ 0,25
Обогащение	1,84	1,34 ÷ 2,01
Изготовление	0,63	0,46 ÷ 0,80
Итого для начальной стадии	3,77	2,85 ÷ 8,35
Транспортировка и промежуточное хранение отработавшего топлива	0,66	0,17 ÷ 0,83
Инкапсулирование и захоронение	1,74	0,40 ÷ 1,92
Итого для конечной стадии	2,40	0,57 ÷ 2,74
Общая стоимость	6,17	3,40 ÷ 11,02

Загрузка ВВЭР-1000 с ежегодной подпиткой 42 ТВС с увеличенной массой топлива (внешний диаметр топливной таблетки 7,6 мм, диаметр центрального отверстия 1,2 мм, высота топливного столба 368 см)

Общая стоимость	6,36	3,41 ÷ 11,2
------------------------	-------------	--------------------

Оценка эффективности использования топлива

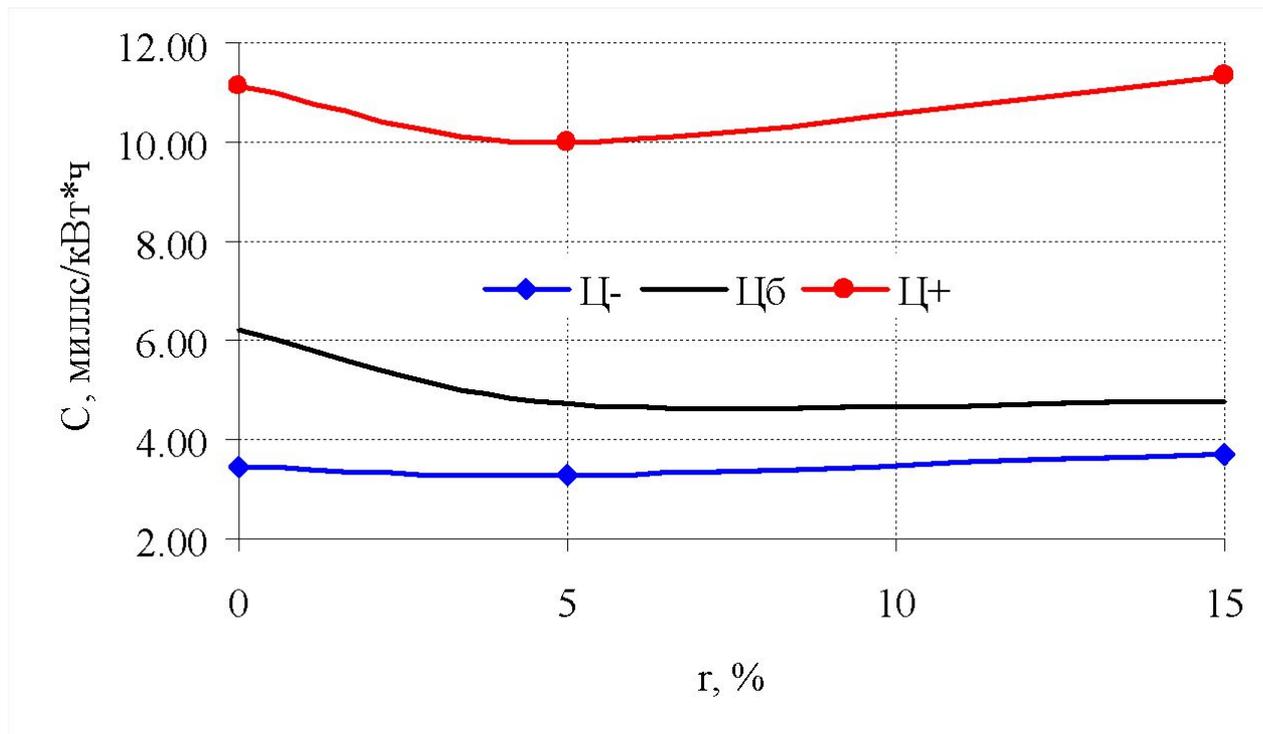


Рис. – Влияние нормы дисконтирования (r) на стоимость топливного цикла при ценовых характеристиках, соответствующих нижней (Ц-), базовой (Цб) и верхней (Ц+) границе цен на единицу продукции

Оценка эффективности использования топлива

Описание топливной загрузки			г, %	Изменение стоимости топливной составляющей относительно базовой загрузки при заданных ценовых характеристиках, %		
Количество загружаемых ТВС, шт.	Этап увеличения объема топлива	Продление кампании за счет мощностного эффекта (да / нет)		Ц-	Цб	Ц+
36	I	Нет	0	-2,1	-2,4	-2,3
			5	-2,2	-2,3	-2,2
			15	-2,6	-2,6	-2,6
	II	Да	0	-1,7	-2,0	-1,8
			5	-1,8	-1,9	-1,9
			15	-2,7	-2,7	-2,7
III	Нет	0	-2,5	-2,8	-2,7	
		5	-2,5	-2,6	-2,5	
15	-2,5	-2,6	-2,6			
78	I	Нет	0	22,6	21,8	22,3
			5	24,5	23,9	24,3
			15	27,5	27,2	27,4

Заключение ч.1

- Для реализации установленных в ТЗ на разработку РУ АЭС-2006 целевых показателей по характеристикам топливных циклов в проекте активной зоны предусмотрено поэтапное увеличение объема топлива в ТВС за счет следующих основных решений:

- удлинения топливного столба;

- увеличения наружного диаметра топливной таблетки и уменьшения или исключения центрального отверстия.

Необходимость поэтапного проведения работ определяется объемом целого ряда НИОКР, необходимым для столь существенного изменения ТВЭЛ.

- На первом этапе разработки ТВС для ВВЭР-1200 в качестве базовой принимается 4-х годовичная топливная кампания с ежегодной загрузкой 42 ТВС. Возможность реализации базовой кампании, удовлетворяющей всем установленным требованиям подтверждена проектными нейтронно-физическими расчетами

- Последующее (за базовым) развитие топливных циклов направлено на повышение эффективности использования топлива и повышение коэффициента технического использования АЭС

Заключение ч.2

- При выполнении оценки эффективности топливоиспользования в активной зоне ВВЭР-1200 на основании расчетов постоянной приведенной стоимости топливной составляющей на единицу вырабатываемой электроэнергии получены следующие результаты:
 - общая стоимость топливной составляющей (без дисконтирования потока платежей) при работе базовой стационарной загрузки в зависимости от цен на услуги в открытом топливном цикле находится в диапазоне от 3,4 до 11,0 миллс/квт*ч (стоимость подобного топливного цикла ВВЭР-1000 находится примерно в таком же диапазоне);
 - переход на эксплуатацию энергоблока с базовой четырехгодичной кампании на кампанию с ежегодной перегрузкой 36 ТВС позволяет экономить до 3 % топливной составляющей стоимости;
 - эксплуатация энергоблока с полуторагодовым циклом перегрузок приводит к повышению топливной составляющей стоимости относительно «базовой», на $\sim 22 \div 27$ %. При этом вне зависимости от ценового диапазона наблюдается рост относительного проигрыша с увеличением нормы дисконтирования, что объясняется значительным вкладом в формирование стоимости издержек начального этапа топливного цикла.
- Для реализации длительных топливных циклов, следует рассмотреть возможность и целесообразность повышения обогащения топлива до 6,5 % по U-235.

Спасибо за внимание

Thank you for attention