

# Перспективы повышения эффективности использования топлива в рамках проекта АЭС-2006

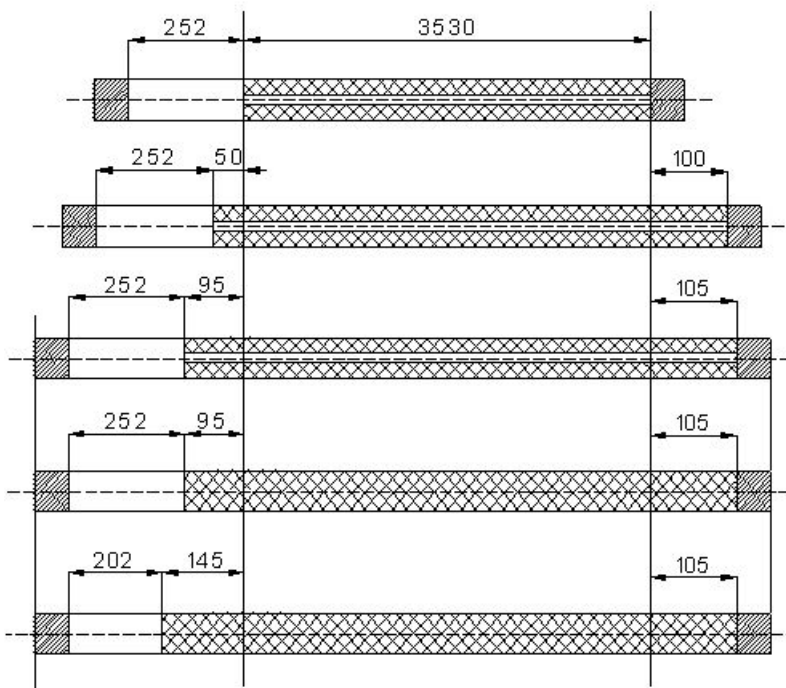
К.Ю. Куракин, Ю.А. Ананьев, А.К. Горохов,  
И.Н. Васильченко, С.Н. Кобелев, В.В. Вьялицин,  
Б.Г. Козак, О.А. Тимофеева, А.Н. Устинов  
ОКБ «Гидропресс»

# 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

<b>Наименование параметра</b>	<b>Значение</b>
<b>Количество ТВС в активной зоне, шт</b>	<b>163</b>
<b>Мощность реактора тепловая (номинальная), МВт</b>	<b>3200</b>
<b>Расход теплоносителя через реактор (номинальный), м<sup>3</sup>/ч</b>	<b>86000</b>
<b>Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, абсолютное (номинальное), МПа</b>	<b>16,2</b>
<b>Температура теплоносителя на входе в реактор при работе на 100 % номинальной мощности, °С</b>	<b>298,2</b>
<b>Шаг размещения ТВС в активной зоне, см</b>	<b>23,6</b>
<b>Количество ТВС с ОР СУЗ, шт</b>	<b>121</b>
<b>Количество ПЭЛ в ПС СУЗ</b>	<b>18</b>

# Стационарные топливные загрузки\* ВВЭР-1200

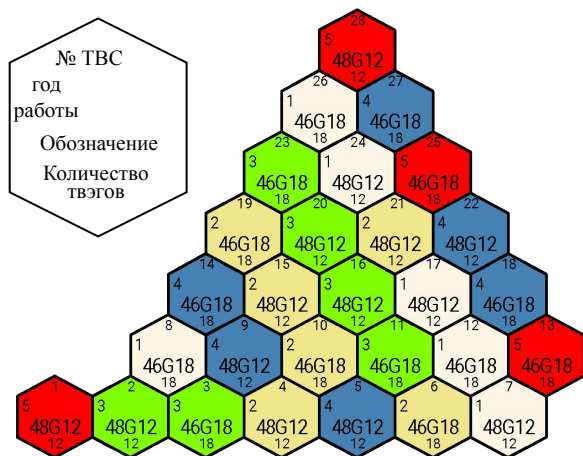


Рис. – Картограмма топливной загрузки с ежегодной подпиткой 36 ТВС

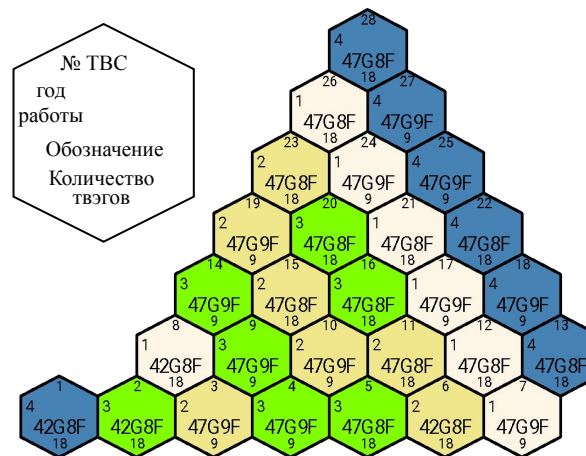


Рис. – Картограмма топливной загрузки с ежегодной подпиткой 42 ТВС

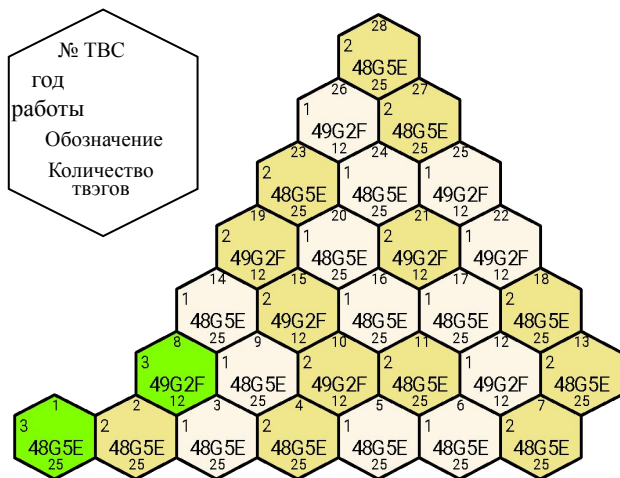


Рис. – Картограмма топливной загрузки с подпиткой 78 ТВС

\*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 $^{235}\text{U}$ , 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 <sup>3</sup> ):	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]

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

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

# 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
<b>Итого для начальной стадии</b>	<b>3,77</b>	<b>2,85 ÷ 8,35</b>
Транспортировка и промежуточное хранение отработавшего топлива	0,66	0,17 ÷ 0,83
Инкапсулирование и захоронение	1,74	0,40 ÷ 1,92
<b>Итого для конечной стадии</b>	<b>2,40</b>	<b>0,57 ÷ 2,74</b>
<b>Общая стоимость</b>	<b>6,17</b>	<b>3,40 ÷ 11,02</b>

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)

<b>Общая стоимость</b>	<b>6,36</b>	<b>3,41 ÷ 11,2</b>
------------------------	-------------	--------------------

# Оценка эффективности использования топлива

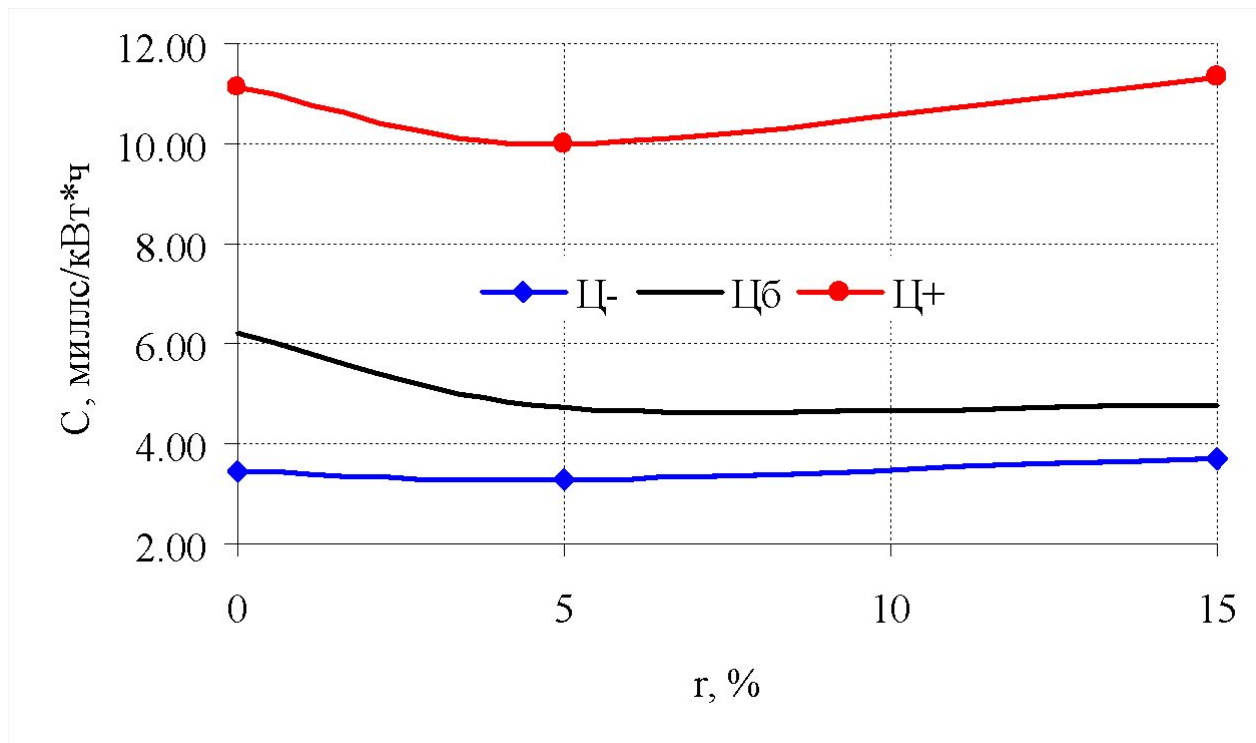


Рис. – Влияние нормы дисконтирования ( $r$ ) на стоимость топливного цикла при ценовых характеристиках, соответствующих нижней (Ц-), базовой (Цб) и верхней (Ц+) границе цен на единицу продукции

# 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 15	-2,5 -2,5	-2,6 -2,6	-2,5 -2,6	
III	Да	0	-2,6	-2,9	-2,8	
		5 15	-2,6 -3,2	-2,7 -3,2	-2,7 -3,2	
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 ~ 22 ÷ 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