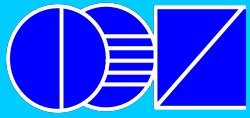


Реакторы, охлаждаемые водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя

**Ю.Д. Баранаев, А.П. Глебов, А.В. Клушин, В.Я. Козлов
ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, Россия**

**В.М. Махин, С.Н. Кобелев, С.В. Семиглазов, В.В. Вьялицин
ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия**



Основные преимущества реакторов с СКД по сравнению с существующими PWR, ВВЭР

ОКБ «ГП»

- Простая тепловая схема
- Исключение арматуры второго контура - парогенераторы, насосы, трубопроводы
- высокие параметры пара (давление ~ 25 МПа и температура до $535 \div 545$ °С) и одноконтурная схема
- КПД установки ~ 44 %
- сокращение количества теплоносителя в активной зоне (~ 8 раз раз по сравнению в ВВЭР) позволяет сократить габариты агрегатов - насосов, турбин, трубопроводов и др. размеров контейнента, использовать тесные решетки расположения ТВЭЛов и реакторы с быстрым спектром нейтронов с КВ ~ 1
- идентичность тепловых схем и параметров СКД теплоносителя, АЭС и ТЭС могут сделать структуру энергетики будущего однородной и привести к значительной экономии



Реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов

Схема охлаждения реактора

Топливный цикл

Эффективность органов СУЗ, коэффициенты реактивности и воспроизводства

Реактор с тепловым спектром нейтронов

Схема охлаждения реактора и конструкция ТВС

Расчеты топливного цикла

Расчеты эффективности СУЗ, коэффициентов реактивности и воспроизводства

Заключение

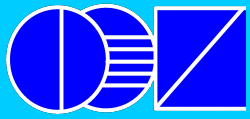
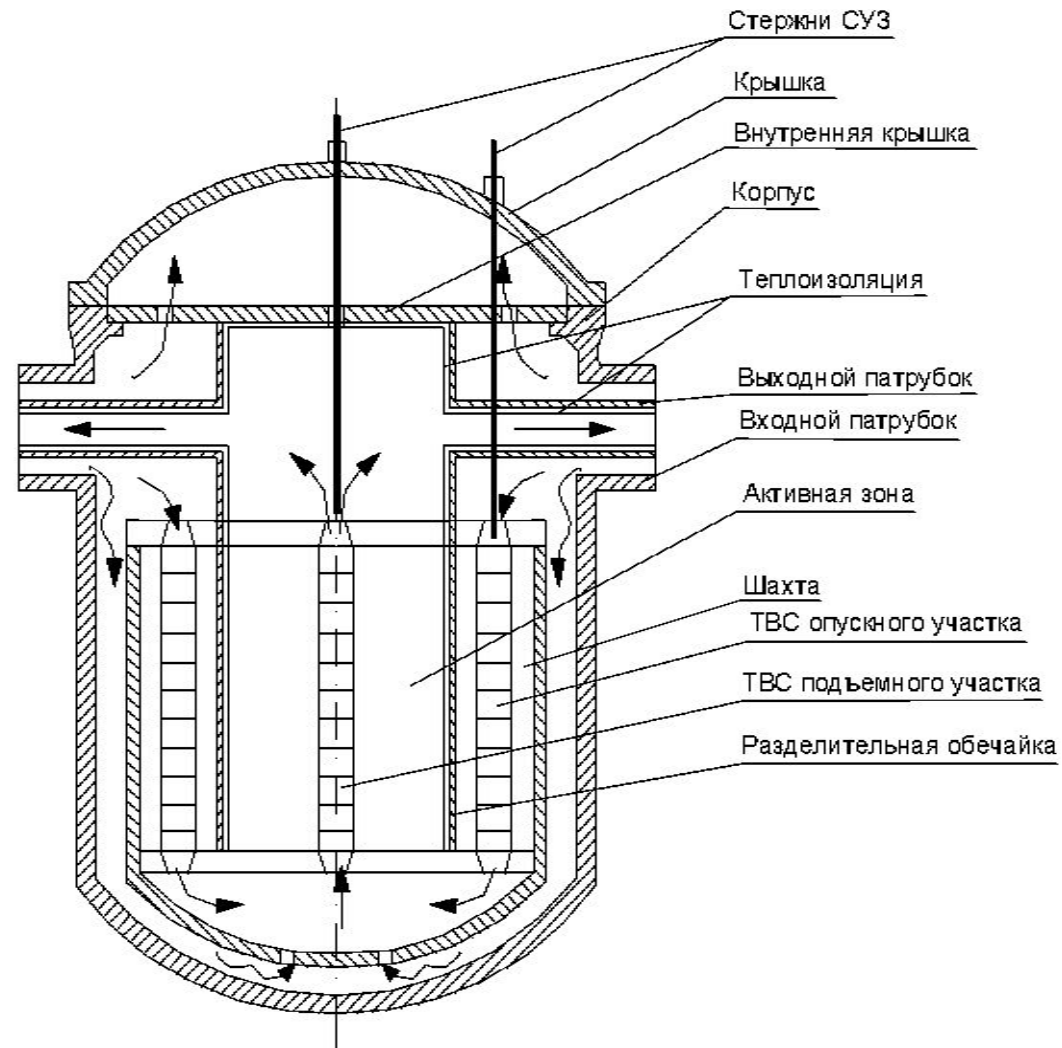


Схема охлаждения реактора

ОКБ «ГП»





Основные технические характеристики реактора

ОКБ «ГП»

Мощность, МВт:

электрическая

1700

тепловая

3830

Теплоноситель:

давление, МПа

25

температура на входе/выходе, °С

280/530

Высота/эквивалентный диаметр

активной зоны, м

3,76/3,37

Число ТВС в активной зоне, шт

241

Энергонапряженность а.з., Вт/см³

114,2

Тепловой поток с поверхности твэл, Вт/см²

49,9

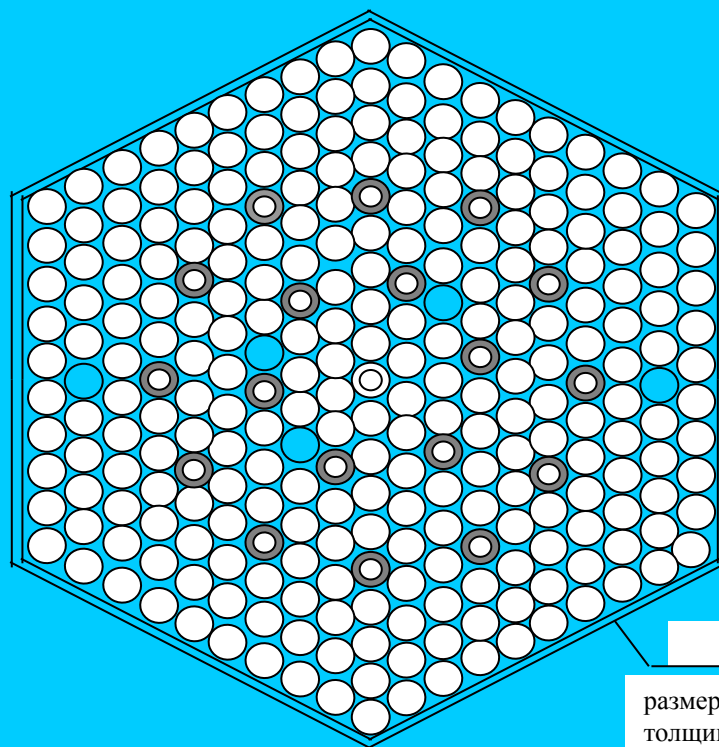
Линейная нагрузка на твэл, Вт/см

167,7



Поперечное сечение ТВС

ОКБ «ГП»

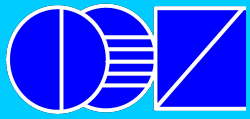


Чехол

размер “под ключ” 205 мм
толщина 2,25 мм

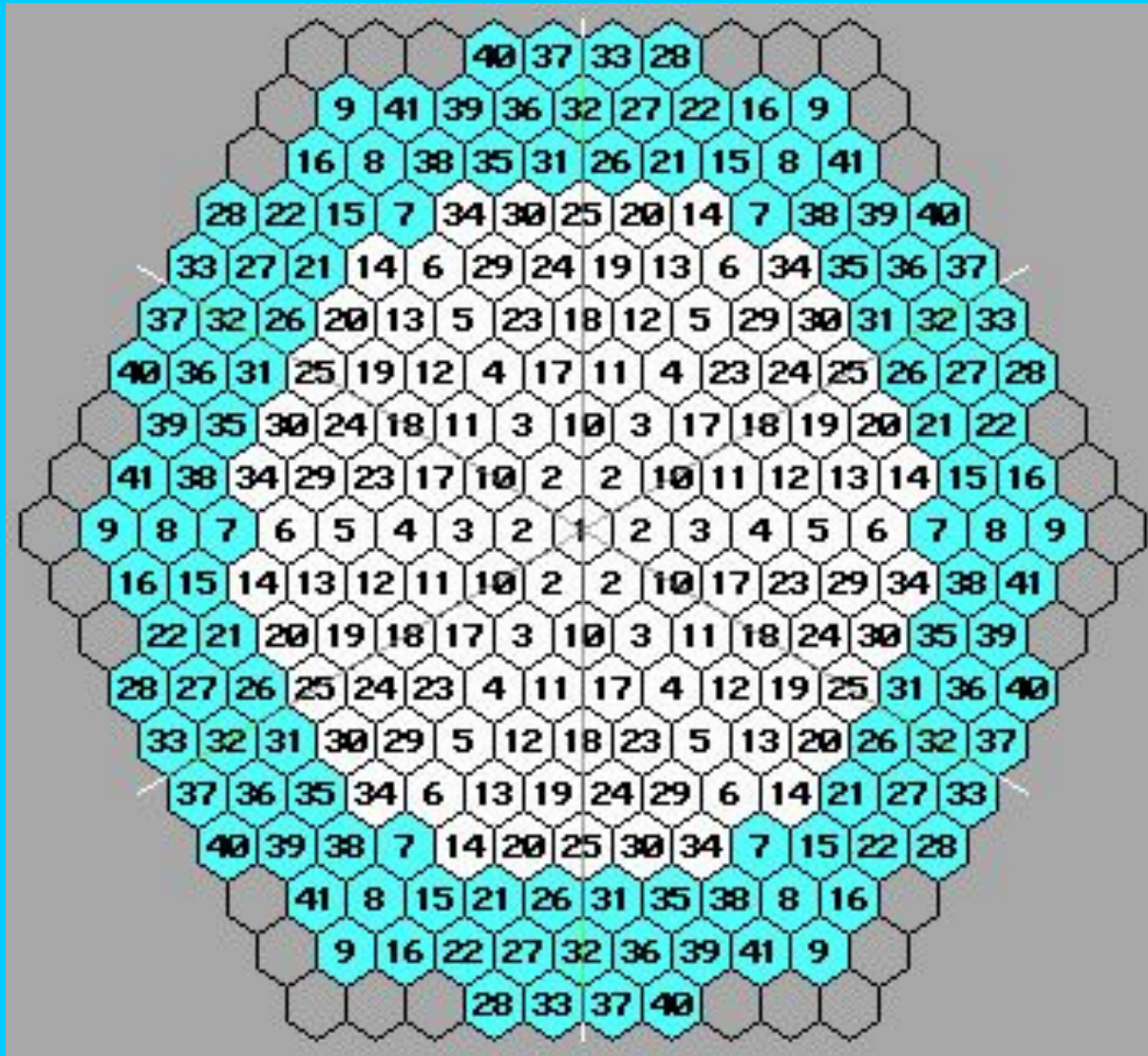
- ⊙ - Центральная труба, $\varnothing 10,7 \times 1,0$
- ⊙ - Направляющий канал под ПЭЛ, $\varnothing 10,7 \times 0,55$, 18 шт.
- - Твэл, 252 шт., оболочка $\varnothing 10,7 \times 0,55$, шаг 12,0 мм

Конструкционный материал всех элементов – сплав на основе Ni
Размер ячейки ТВС “под ключ” с учетом водяного зазора – 207 мм



Картограмма активной зоны

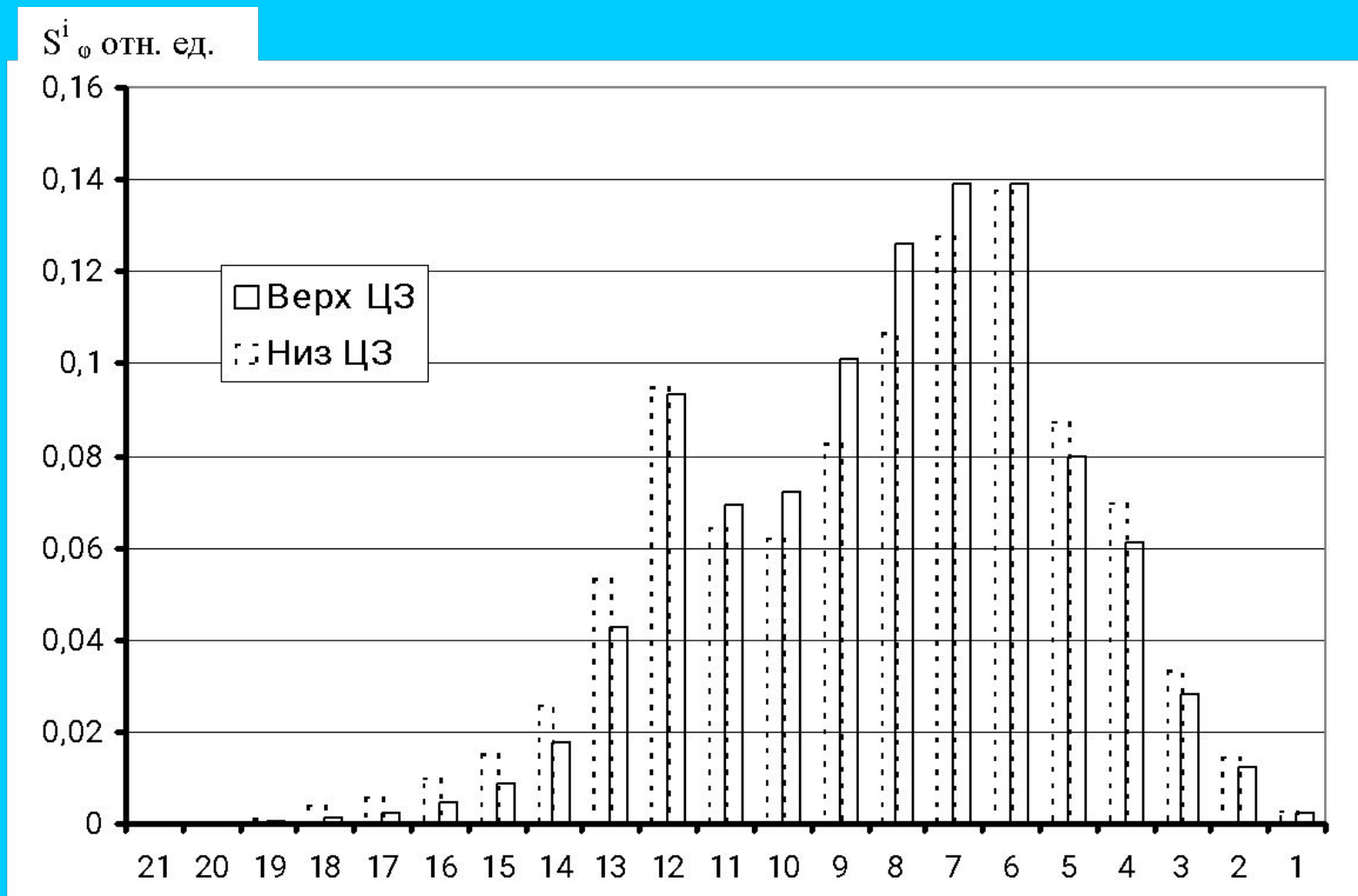
ОКБ «ГП»

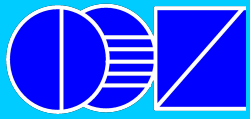




Доли групповых потоков нейтронов в центре активной зоны

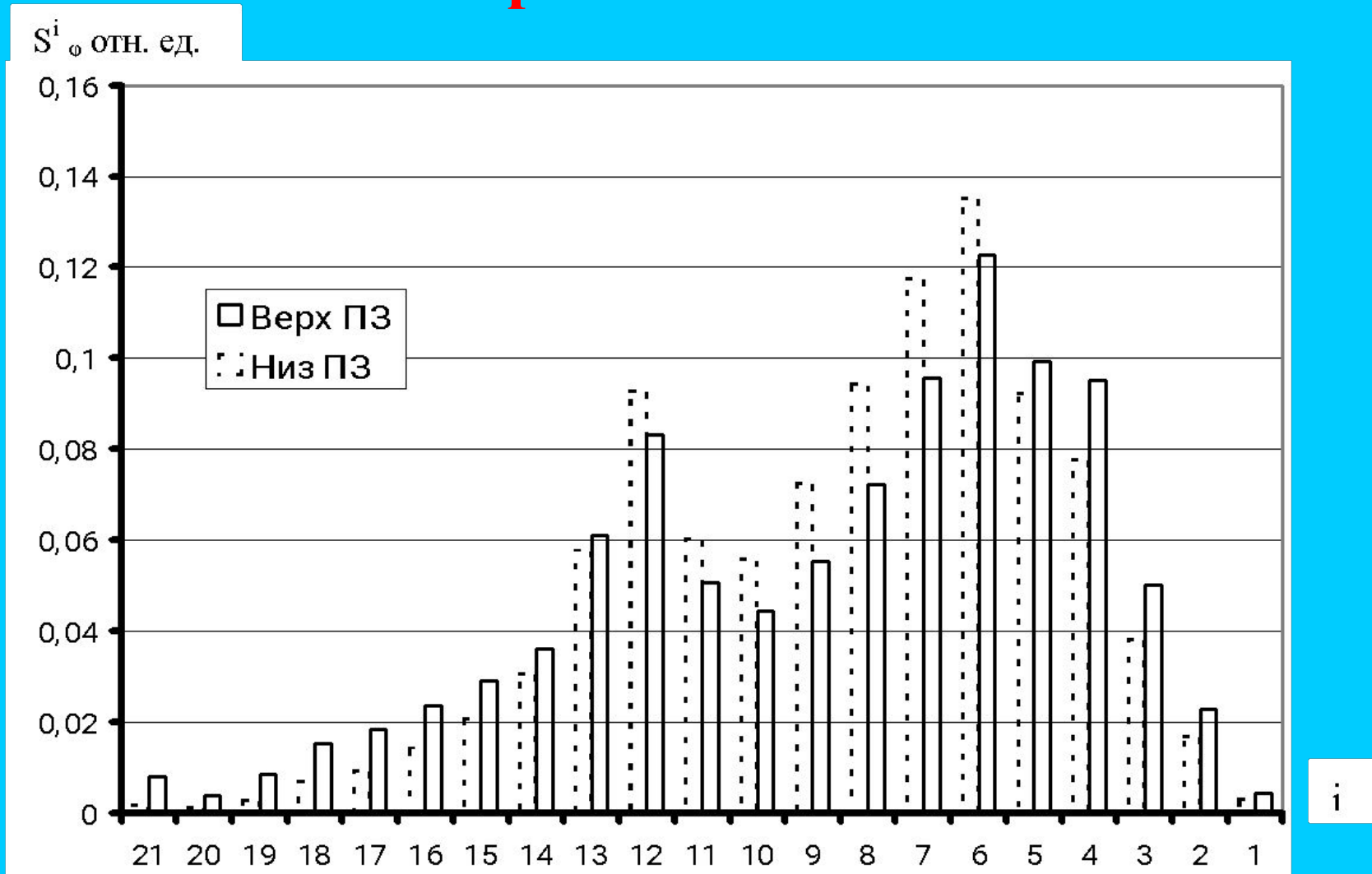
ОКБ «ГП»





Доли групповых потоков нейтронов в ПЗ

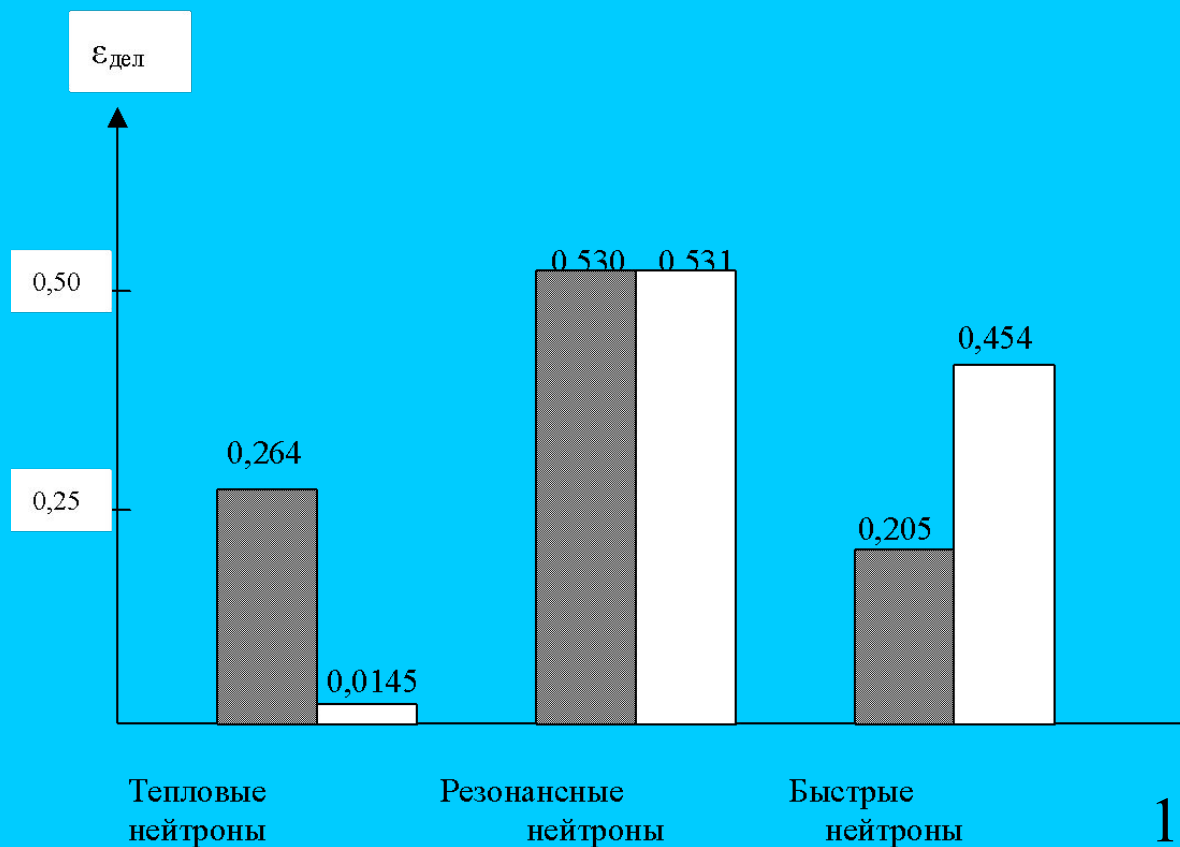
ОКБ «ГП»





**Относительный вклад ($\epsilon_{\text{дел}}$) нейтронов
различных энергетических групп в
суммарное количество делений на
входном (■) и выходном (□) участках
активной зоны для реактора с быстро-
резонансным спектром нейтронов с СКД**

ОКБ «ГП»





Рассмотрены следующие состояния реактора:

- работа на номинальной мощности $N = N_H$;
- «МКУ», при котором вся активная зона заполнена питательной водой с $t_T = 280$ °С и $P = 25$ МПа;
- «обезвоживание», при котором в активной зоне (а так же в отражателях) есть только пар с $\gamma_T = 0,095$ г/см³;
- залив всего реактора холодной водой при $t_T = 20$ °С и $P = 10^{-5}$ МПа.

Расчетное состояние	N_H	МКУ	Обезвоживание	Холодный
Δ (абс.)	1,26	7,265	-2,26	13,679
$K_{\text{НТВС СУЗ}}^{\%}$	12	120	-	216



Итоговые физические характеристики топливного цикла активной зоны с бланкетом и усовершенствованной схемой теплоотвода

ОКБ «ГП»

Характеристики	Схема теплоотвода	
	Одноходовая	Двухходовая
Начальная загрузка OP_{Pu} а.з. (при всех "свежих" в	15,68	9,47
Загрузка топлива (TBC) в $(U + Pu)$	598	560,6
Загрузка OP_{Pu} в одну TBC / расход OP_{Pu}	67,88/3260	39,3/1864
Запас реактивности на кампанию, % в год, кг	1,5	1,21
Длительность межперезгрузочного интервала, эфф. сут.	250	300
Количество типов TBC/топлива в активной зоне	4/16	1/1
Средняя энерговыработка выгружаемых TBC, МВт*сут/кг т.а.	33,3	39,79
Максимальные значения коэффициентов неравномерности энерговыделения Kq/Kv	1,22/2,20	1,46/2,40
КВ	0,936	0,933
Пустотный эффект реактивности в начале/конце кампании, %	-0,20/0,09	-5,88/-3,64
Максимальные за 4,5 года на оболочке ТВЭЛ:		
ат	39,9	40
предельная доза нейтронов, n/cm^2	$8,2 \cdot 10^{22}$	$8,4 \cdot 10^{22}$
Максимальные $t_r/t_{об}/t_{топ}$, см	558/662/1560	518/572/1140



Реактор с тепловым спектром

ОКБ «ГП»

Мощность, МВт:

электрическая

1200

тепловая

2700

Теплоноситель:

давление, МПа

25

температура на входе/выходе, °С

280/510

расход, т/час

5440

Высота/эквивалентный диаметр

активной зоны, м

3,55/3,16

Число ТВС, шт

163

Энергонапряженность ЦЗ/ПЗ, Вт/см³

153/80

Тепловой поток с поверхности твэл

ЦЗ/ПЗ, Вт/см²

51/47

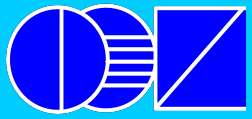
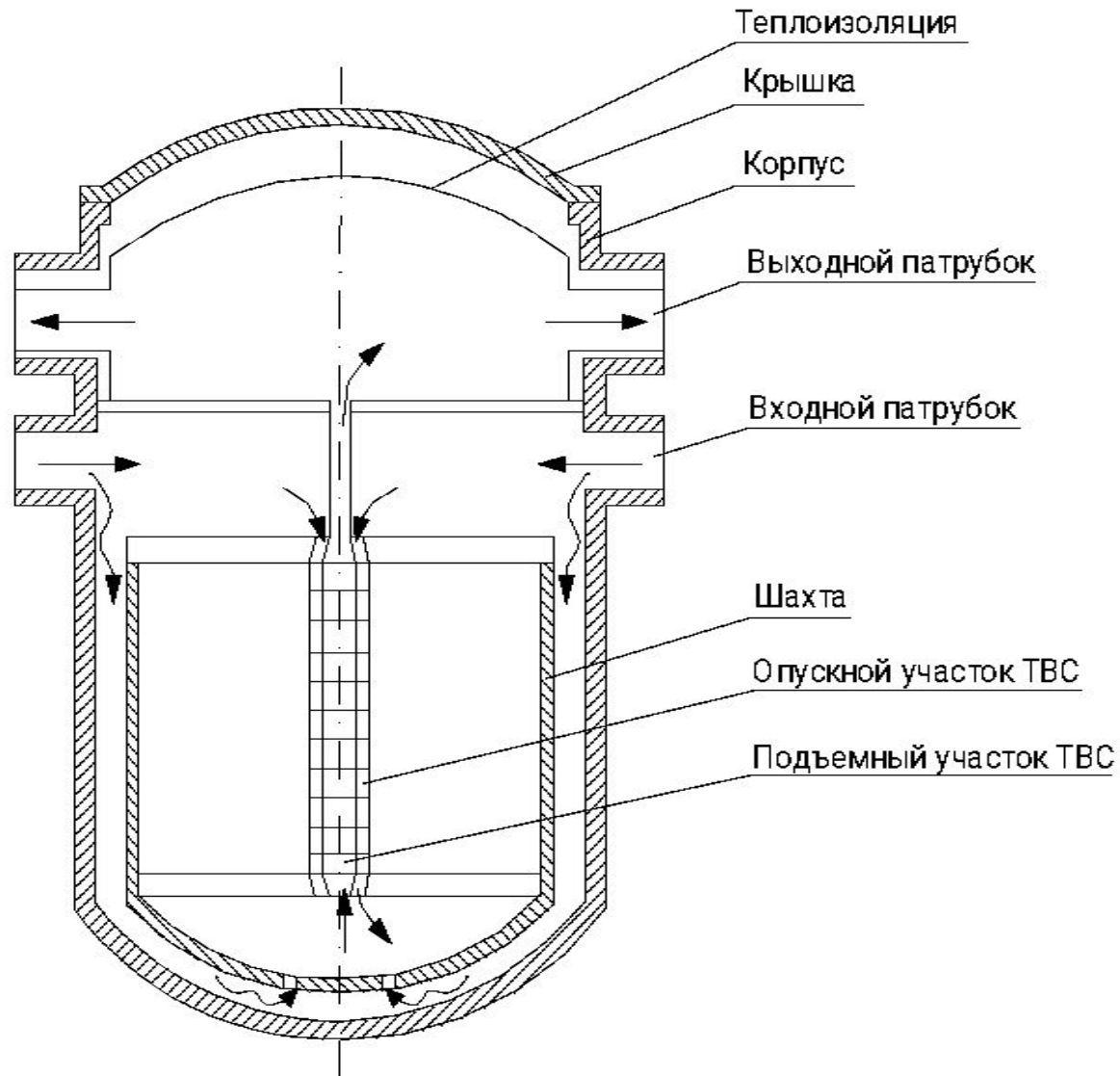


Схема охлаждения реактора

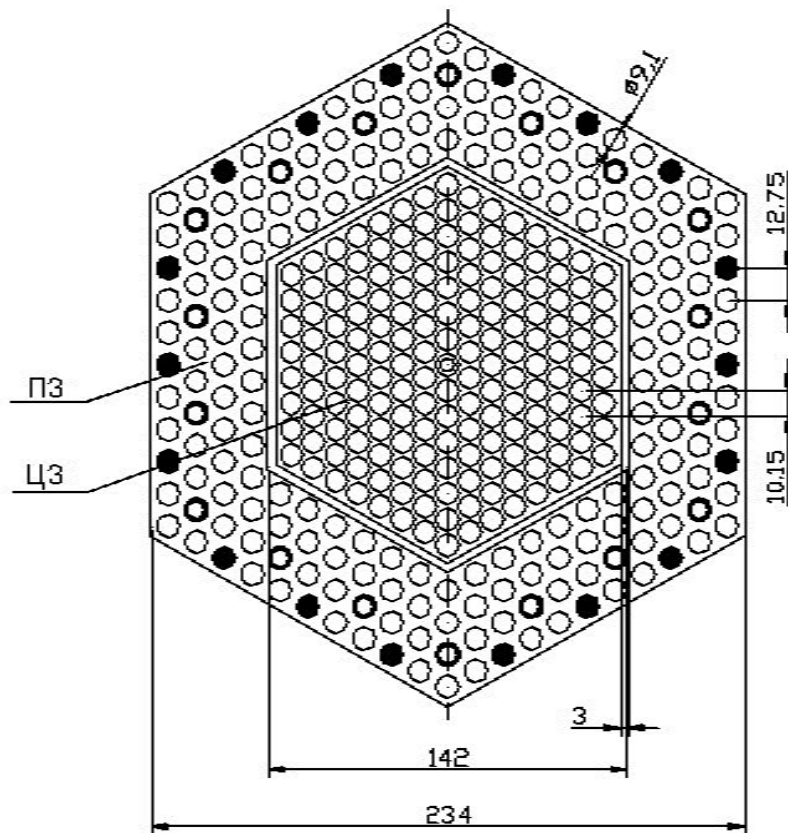
ОКБ «ГП»



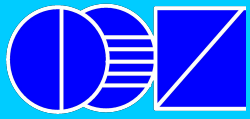


Поперечное сечение ТВС

ОКБ «ГП»

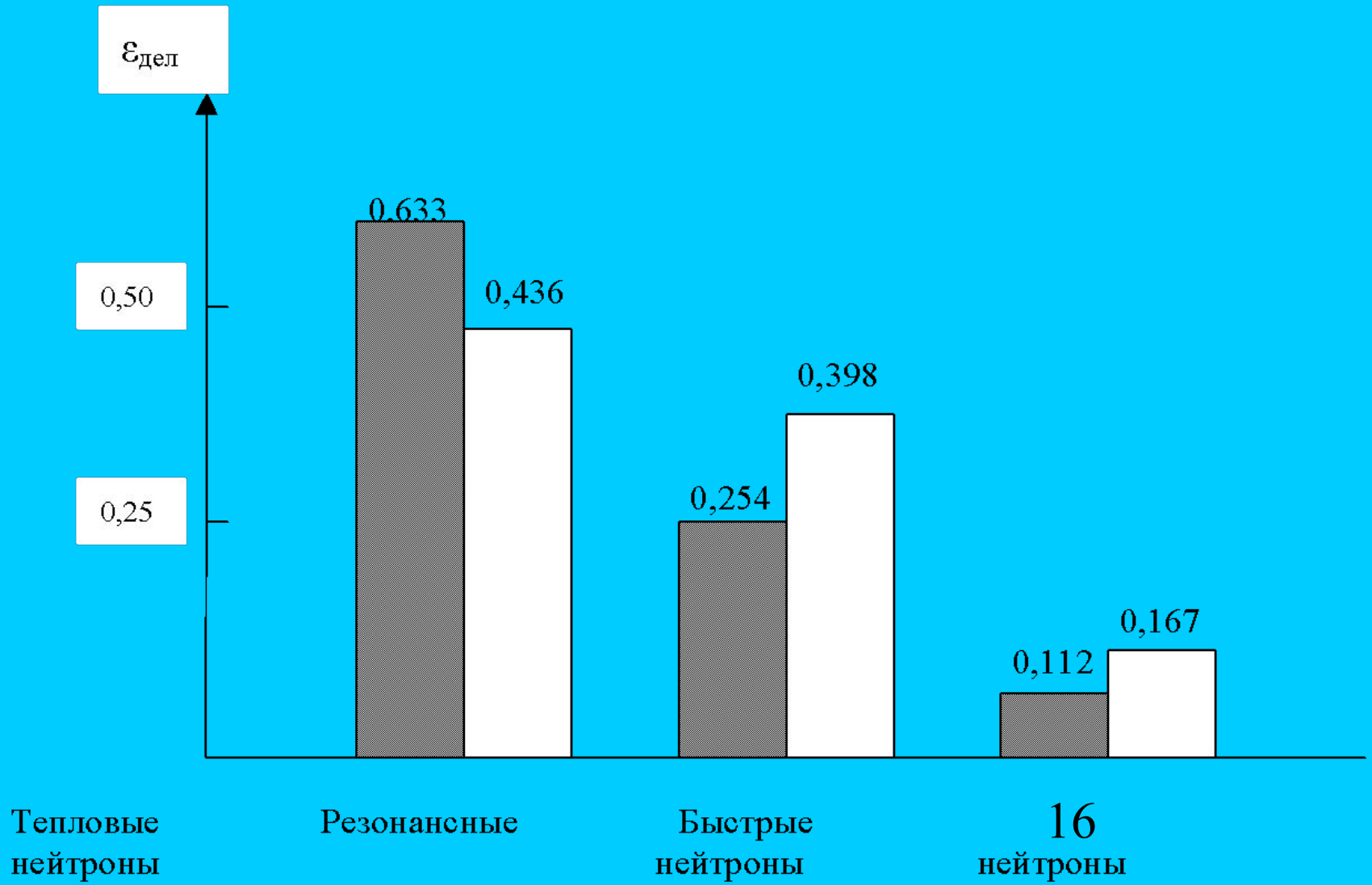


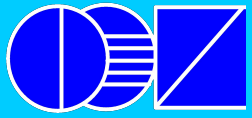
- ⊙ - центральная трубка
- - твэл ЦЗ (168 шт., шаг 10,15 мм)
- - твэл ПЗ (168 шт., шаг 12,75 мм)
- - твэл (18 шт.)
- - ПССУЗ (18 шт.)



**Относительный вклад ($\epsilon_{\text{дел}}$) нейтронов
различных энергетических групп в
суммарное количество делений в верхнем
() и нижнем () участках ТВС**

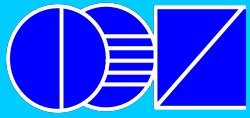
ОКБ «ГП»





**Величины реактивности и
требуемое количество СУЗ при
различных состояниях
реактора**

Расчетное состояние	МКУ	Обезвоживание	Холодный
Δ (абс.)	9,8	-25,6	13,5
$K_{\text{н}}^{\text{СУЗ}}$	66	—	120



Итоговые физические характеристики топливного цикла активной зоны с двухзаходной схемой теплоотвода ТВС

ОКБ «ГП»

Характеристики	Величина
Начальная загрузка делящихся изотопов Pu/U ("свежих" в а.з.	3,47/2,22
Выгрузка делящихся изотопов (U + Pu) в одну ТВС, кг	34,92
Кратность перегрузок ТВС	3
Запас реактивности на кампанию %	5,17
Длительность межперегрузочного материала, эфф. сут.	285
Количество типов ТВС/топлива в активной зоне	1/4
Энерговыработка выгружаемых ТВС, МВт·сут/кг т.а. средняя по ТВС	27,8
максимальная по ТВС	30,6
максимальная по объему а.з.	41,2
Максимальные значения коэффициентов неравномерности энерговыделения Kq/Kv	1,46/2,50
Загрузка делящихся изотопов U ₅ , Pu ₉ , Pu ₄₁ , т/год	1,886
Выгрузка делящихся изотопов, т/год	1,32
КВ, ЦЗ/ПЗ	0,85/0,57
Коэффициенты реактивности при N = N _n межперегрузочного интервала: на начало	
$\rho_{\text{св}} \cdot 10^{-4}, 1\%$	34,3
$\rho_{\text{св}} \cdot 10^{-4}, 1\%$	-9,8
$\rho_{\text{св}} \cdot 10^{-4}, 1\%$	-1,9
$\rho_{\text{св}} \cdot 10^{-4}, 1\%$	-17,8
Расход природного урана, кг/МВт (т)·сут	0,102



Преимущества предлагаемых схем теплоотвода:

- в 2 раза снижается перепад температуры, при которой находятся конструктивные элементы ТВС;
- в 2 раза увеличивается скорость движения теплоносителя, но вследствие небольших расходов, связанных с использованием среды со сверхкритическим давлением, скорость еще ниже, чем в ВВЭР, при этом будет увеличиваться коэффициент теплоотдачи и снижаться температура оболочек твэлов;
- обеспечивается требуемая неравномерность распределения энерговыделения по объему активной зоны без сложного профилирования по обогащению топлива;
- в 2 раза снижается подогрев теплоносителя по высоте в подъемном участке, расположенном в центре активной зоны или ТВС, что будет приводить к уменьшению неравномерности в распределении температуры теплоносителя на выходе из ТВС;
- обеспечиваются отрицательные обратные связи по основным параметрам: температуре и плотности теплоносителя, температуре топлива, пустотному эффекту (без применения дополнительных мер – введение blankets, твердого замедлителя для реактора с быстрым спектром нейтронов);
- требуется небольшой запас реактивности на выгорание и наиболее сложные режимы эксплуатации – залив холодной водой, могут быть обеспечены штатными средствами – расположением поглощающих органов СУЗ в 2/3 ТВС.

Для реактора с тепловым спектром нейтронов вместе со штатными твэлами реакторов ВВЭР может использоваться МОХ-топливо, что позволит повысить КВ и уменьшить годовой расход природного урана, а также отработать технологию для перехода к быстрым реакторам с МОХ-топливом с КВ 1.