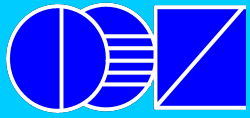


# **Реакторы, охлаждаемые водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя**

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

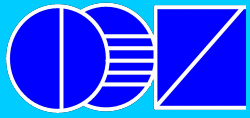
**В.М. Махин, С.Н. Кобелев, С.В. Семиглазов, В.В. Вьялицин  
ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия**



## **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 ÷ 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 контеймента, 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**

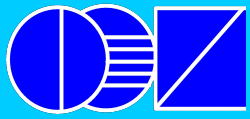
## **Реактор с тепловым спектром нейтронов**

**Схема охлаждения реактора и конструкция ТВС**

**Расчеты топливного цикла**

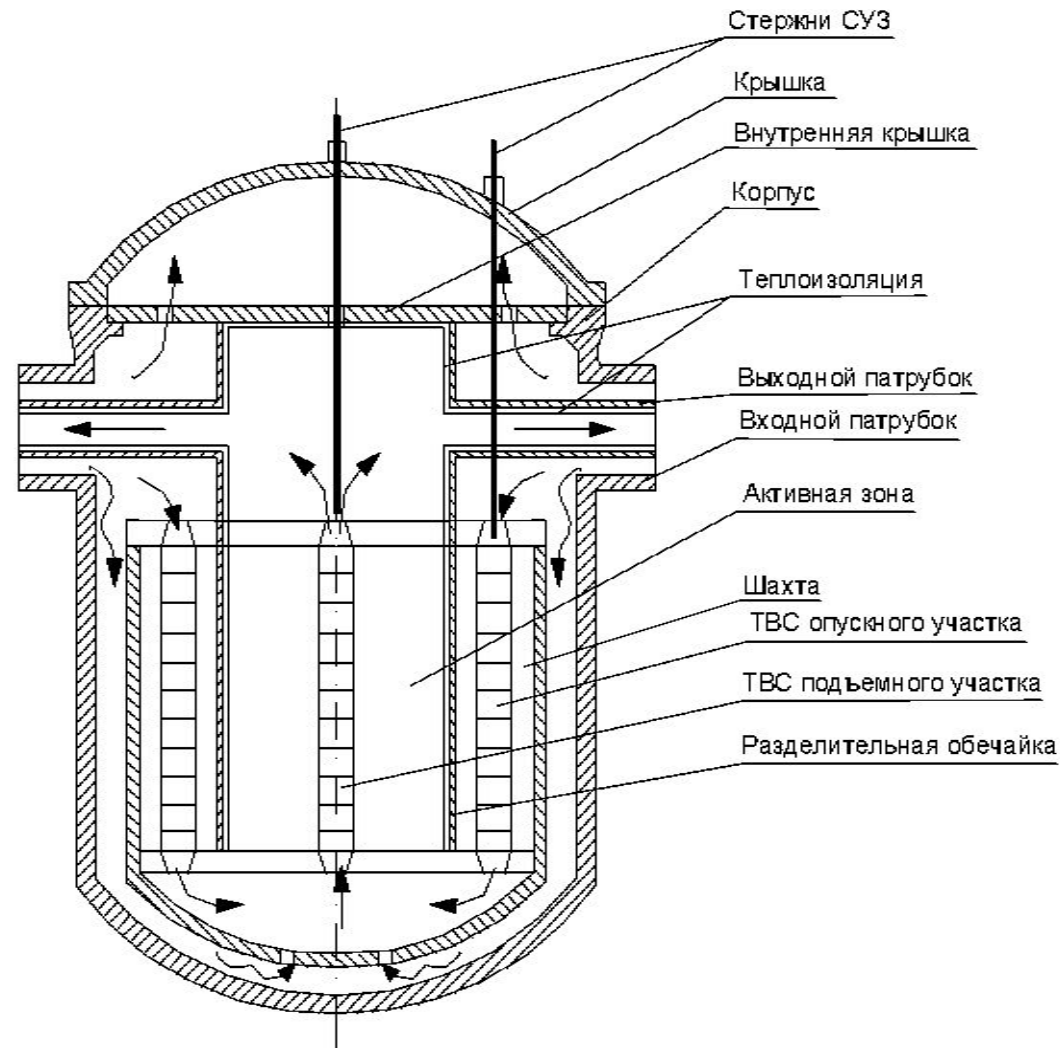
**Расчеты эффективности СУЗ, коэффициентов реактивности и воспроизводства**

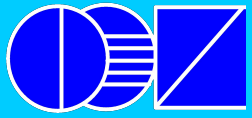
**Заключение**



# 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/см<sup>3</sup>**

**114,2**

**Тепловой поток с поверхности твэл, Вт/см<sup>2</sup>**

**49,9**

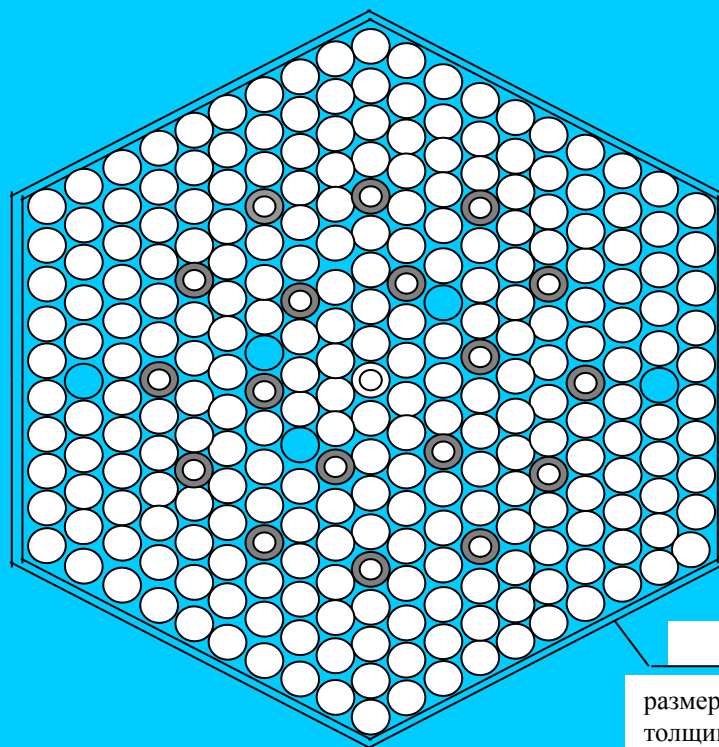
**Линейная нагрузка на твэл, Вт/см**

**167,7**



# Поперечное сечение ТВС

ОКБ «ГП»

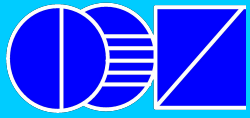


Чехол

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

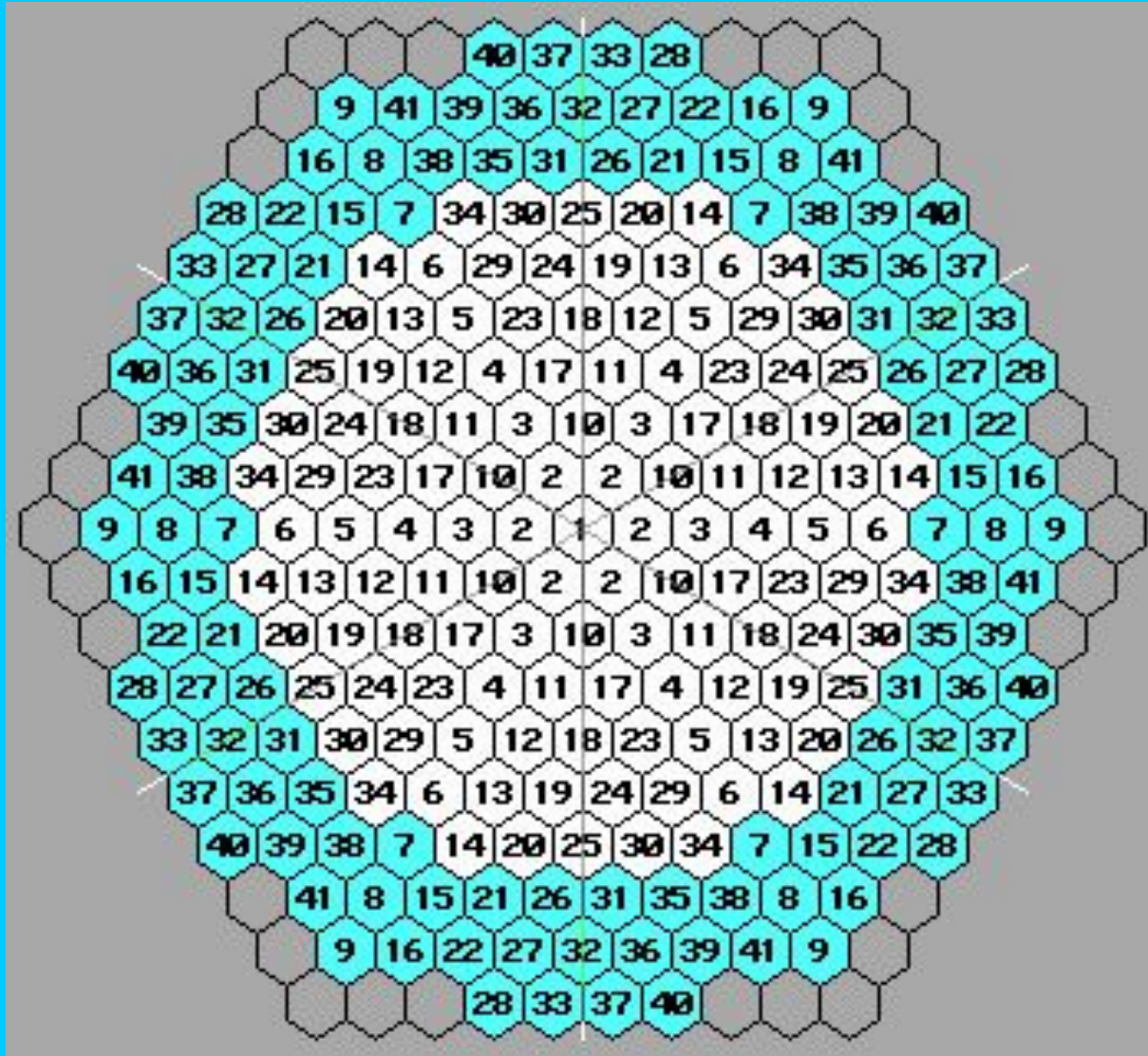
- ⊙ - Центральная труба,  $\varnothing 10,7 \times 1,0$
- ⊙ - Направляющий канал под ПЭЛ,  $\varnothing 10,7 \times 0,55$ , 18 шт.
- - Твэл, 252 шт., оболочка  $\varnothing 10,7 \times 0,55$ , шаг 12,0 мм

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



# Картограмма активной зоны

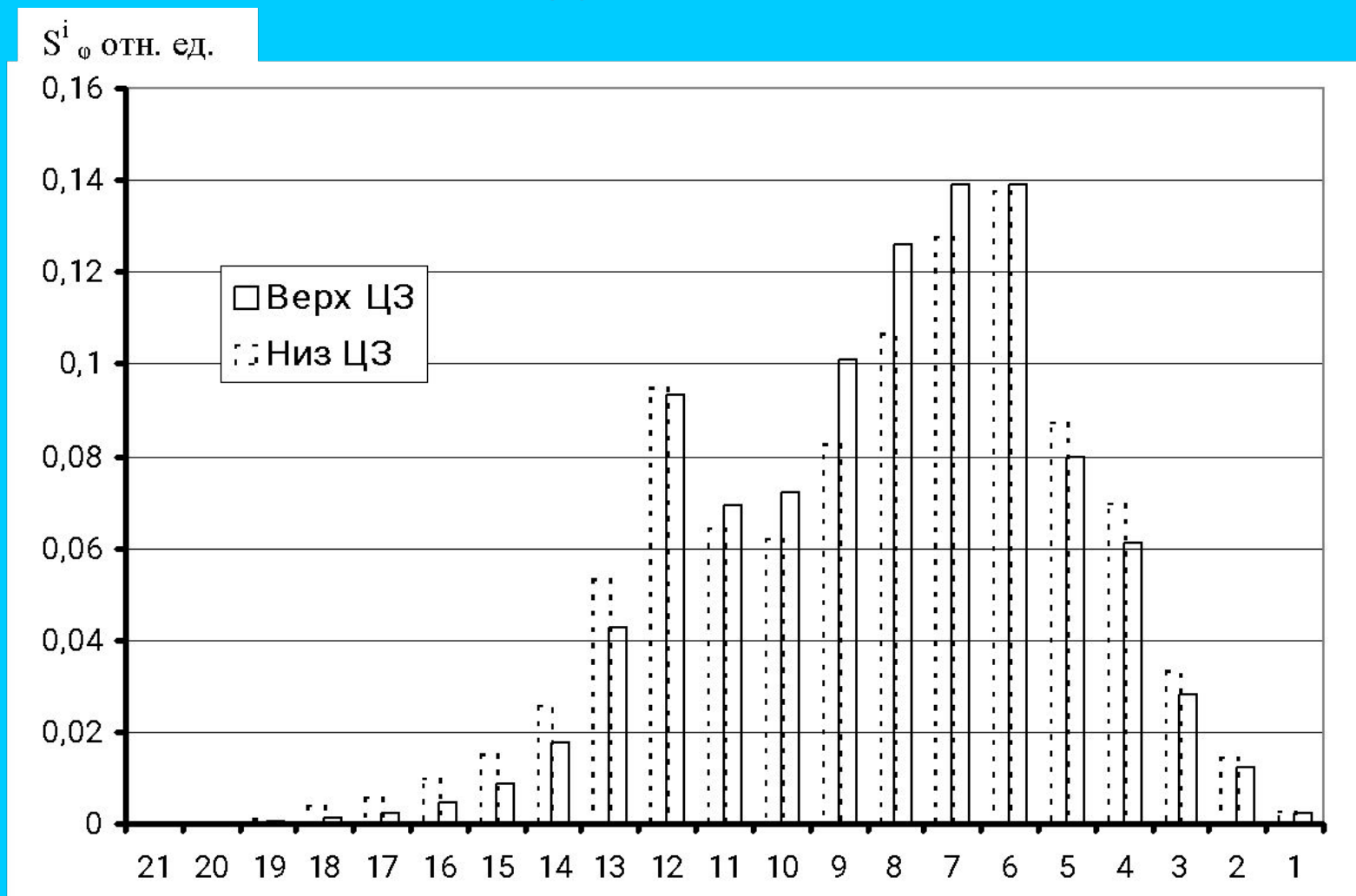
ОКБ «ГП»



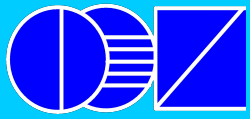


# Доли групповых потоков нейтронов в центре активной зоны

ОКБ «ГП»

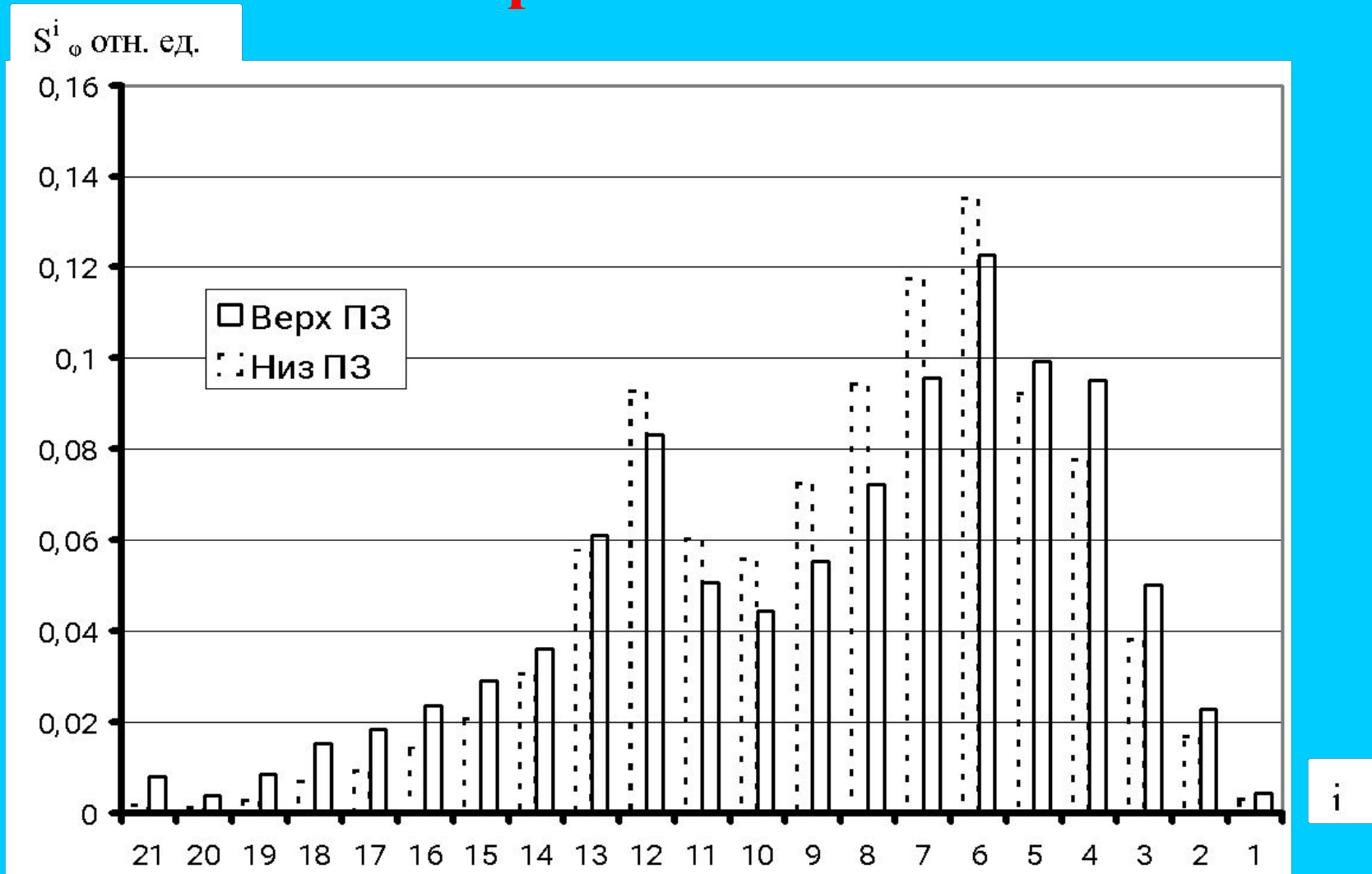






# Доли групповых потоков нейтронов в ПЗ

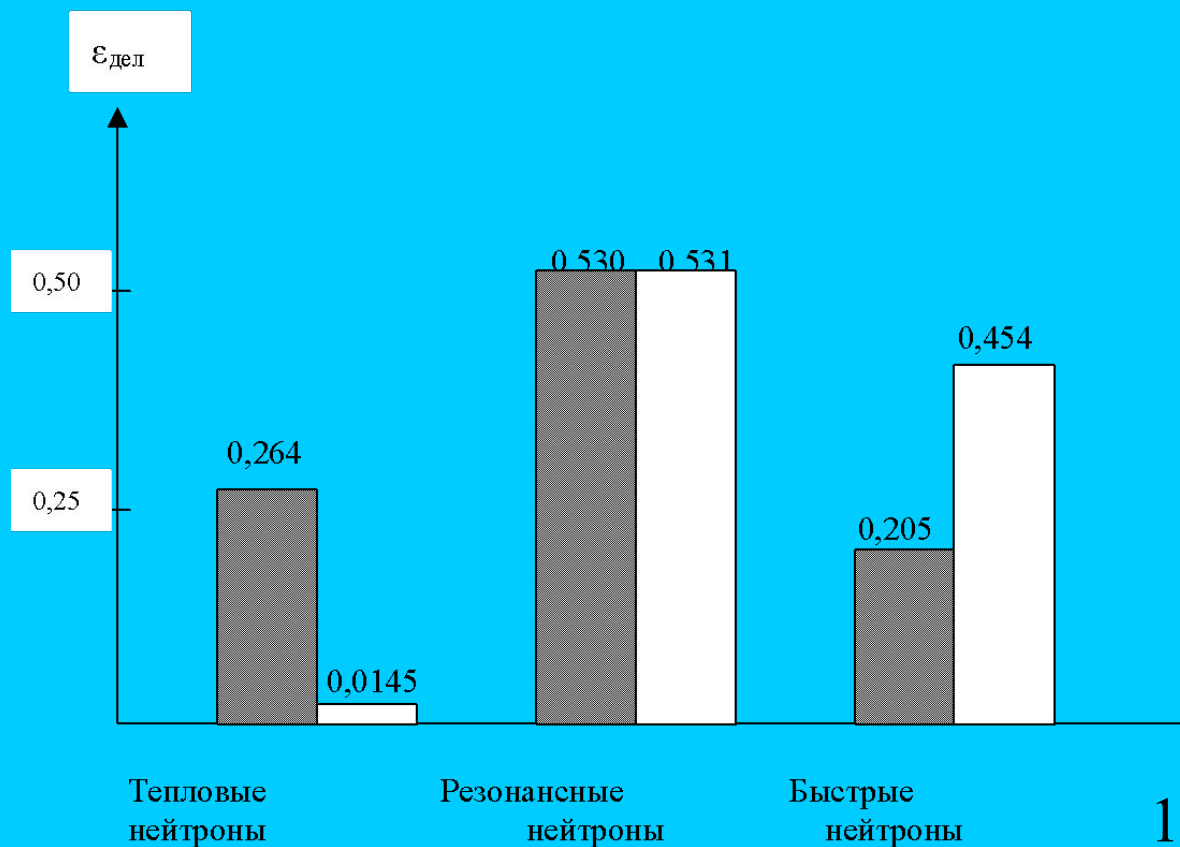
ОКБ «ГП»

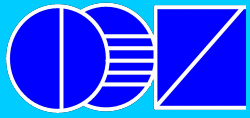




**Относительный вклад ( $\epsilon_{\text{дел}}$ ) нейтронов различных энергетических групп в суммарное количество делений на входном (■) и выходном (□) участках активной зоны для реактора с быстро-резонансным спектром нейтронов с СКД**

**ОКБ «ГП»**

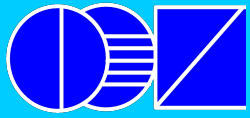




Рассмотрены следующие состояния реактора:

- 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/см<sup>3</sup>;
- залив всего реактора холодной водой при  $t_T = 20$  °С и  $P = 10^{-5}$  МПа.

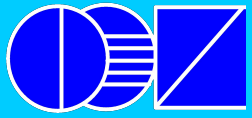
Расчетное состояние	$N_H$	МКУ	Обезвоживание	Холодный
$\Delta$ (абс.)	1,26	7,265	-2,26	13,679
$K_{\text{ТВС СУЗ}}^{\text{эф}}$	12	120	-	216



# 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

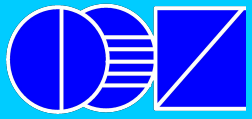
**Энергонапряженность ЦЗ/ПЗ, Вт/см<sup>3</sup>**

153/80

**Тепловой поток с поверхности твэл**

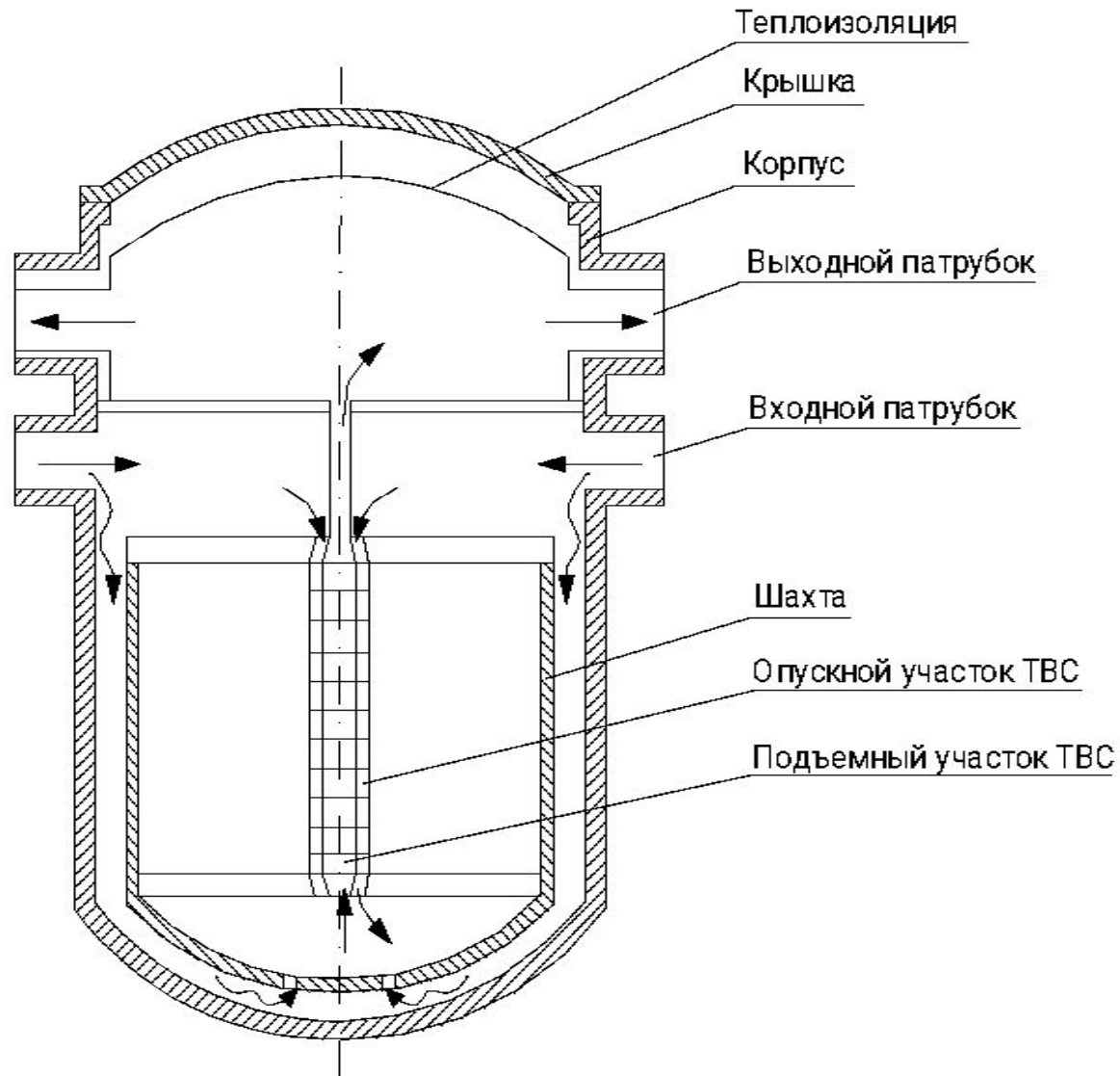
ЦЗ/ПЗ, Вт/см<sup>2</sup>

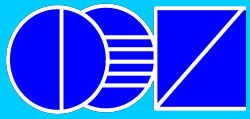
51/47



# Схема охлаждения реактора

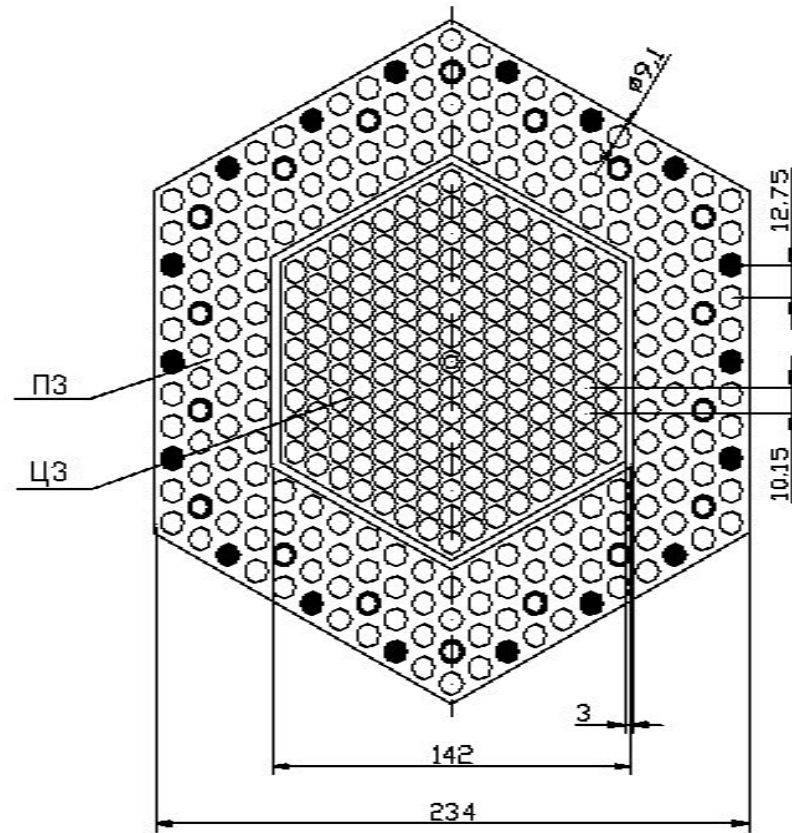
ОКБ «ГП»



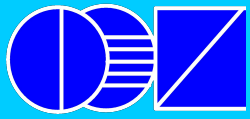


# Поперечное сечение ТВС

ОКБ «ГП»

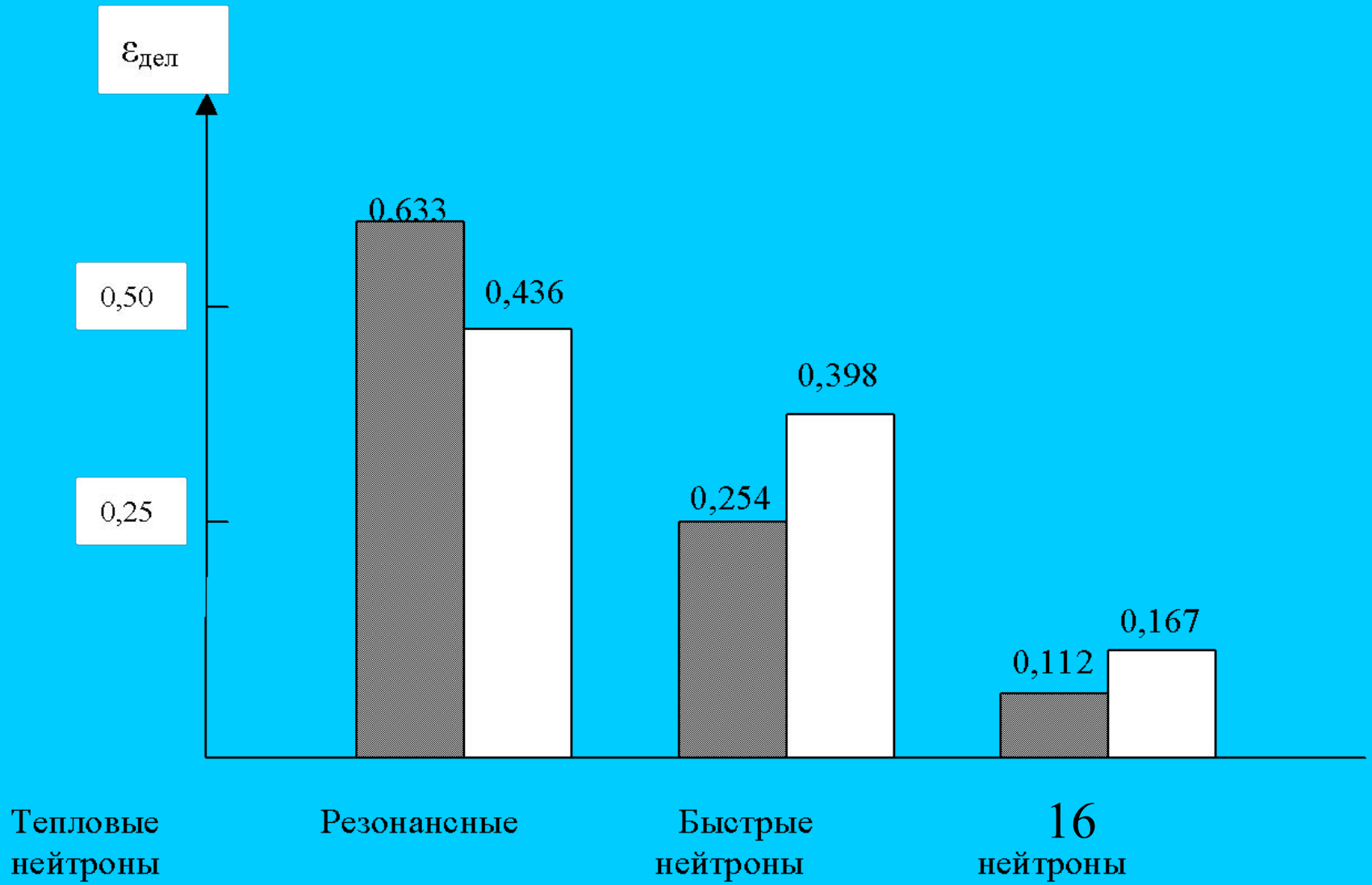


- ⊙ - центральная трубка
- - твэл ЦЗ (168 шт., шаг 10,15 мм)
- - твэл ПЗ (168 шт., шаг 12,75 мм)
- - твэл (18 шт.)
- ⊙ - ПССУЗ (18 шт.)

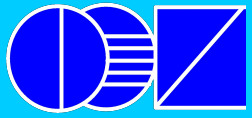


**Относительный вклад ( $\epsilon_{\text{дел}}$ ) нейтронов  
различных энергетических групп в  
суммарное количество делений в верхнем  
( ) и нижнем ( ) участках ТВС**

**ОКБ «ГП»**

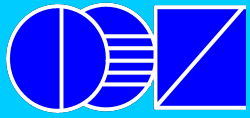






**Величины реактивности и  
требуемое количество СУЗ при  
различных состояниях  
реактора**

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

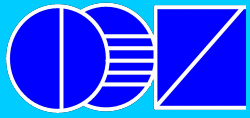


# Итоговые физические характеристики топливного цикла активной зоны с двухзаходной схемой теплоотвода ТВС

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 <sub>5</sub> , Pu <sub>9</sub> , Pu <sub>41</sub> , т/год	1,886
Выгрузка делящихся изотопов, т/год	1,32
КВ, ЦЗ/ПЗ	0,85/0,57
Коэффициенты реактивности при N = N <sub>n</sub> 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

18



## 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.