ОКБ «ГП»

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

ОКБ «ГП»

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

- 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 контаймента, 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

Содержание

Реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов

- Схема охлаждения реактора
- Топливный цикл
- Эффективность органов СУЗ, коэффициенты реактивности и воспроизводства

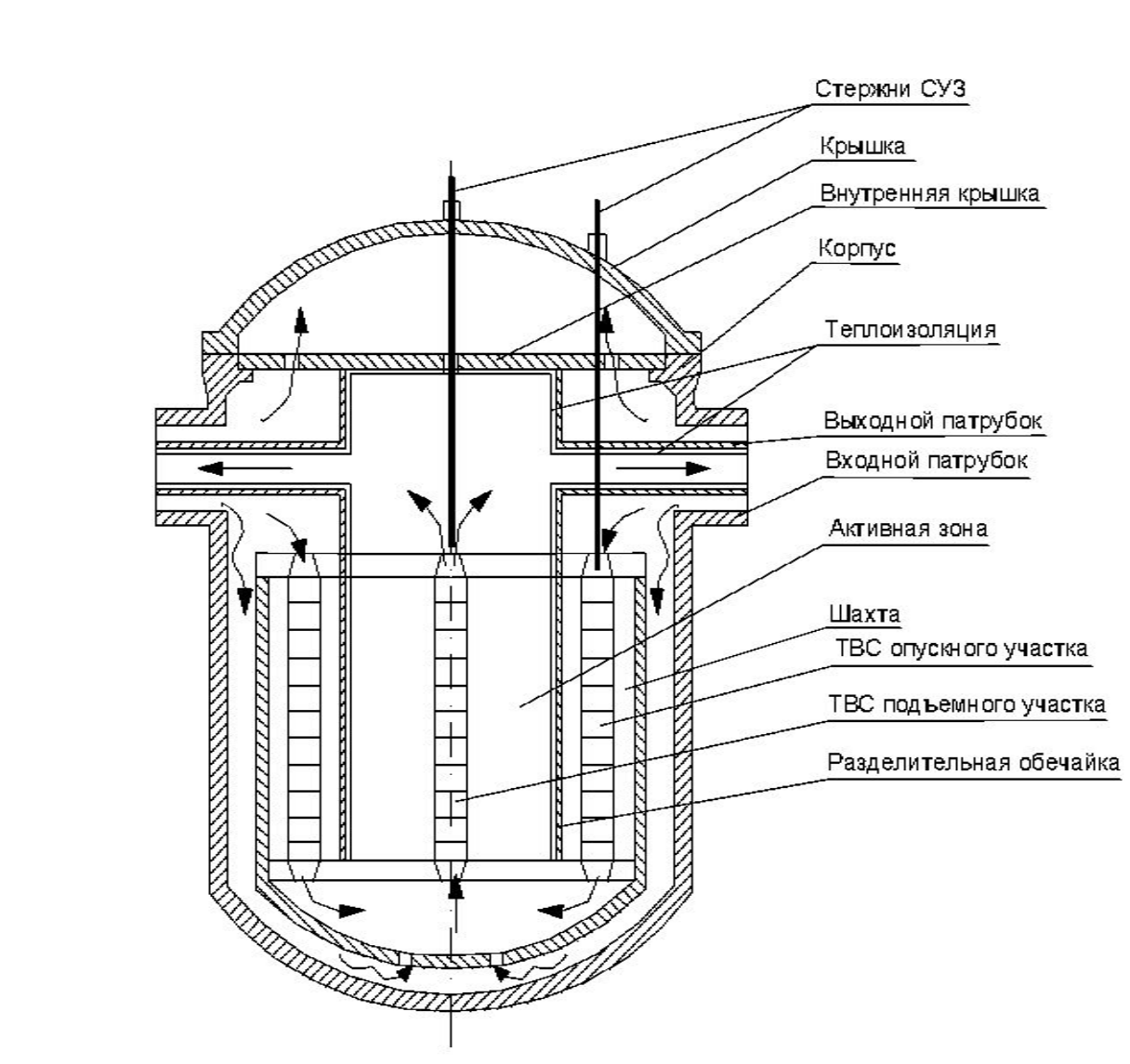
Реактор с тепловым спектром нейтронов

- Схема охлаждения реактора и конструкция ТВС
- Расчеты топливного цикла
- Расчеты эффективности СУЗ, коэффициентов реактивности и воспроизводства

Заключение

Схема охлаждения реактора

ОКБ «ГП»



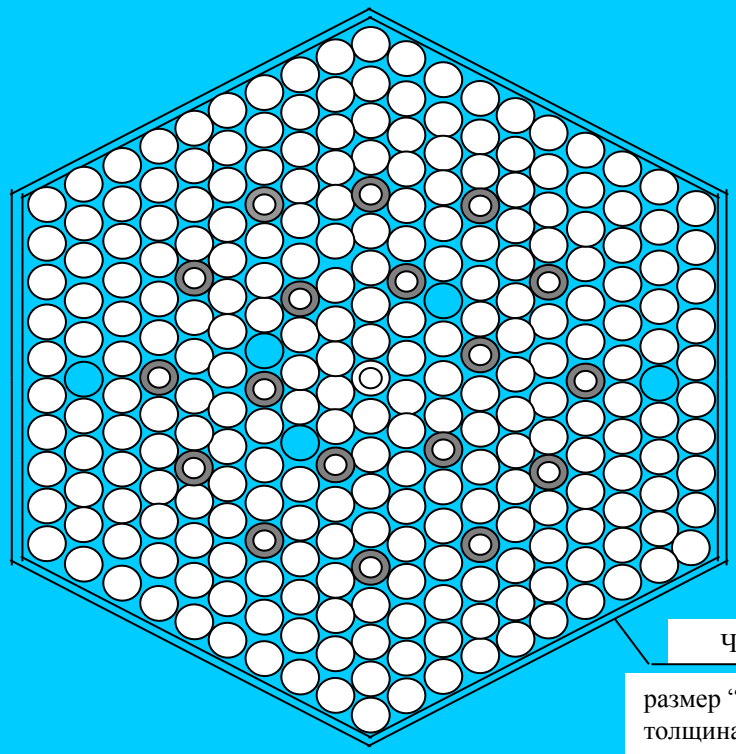
Основные технические характеристики реактора

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^3	114,2
Тепловой поток с поверхности твэл, Вт/см^2	49,9
Линейная нагрузка на твэл, Вт/см	167,7

Поперечное сечение ТВС

ОКБ «ГП»



Чехол

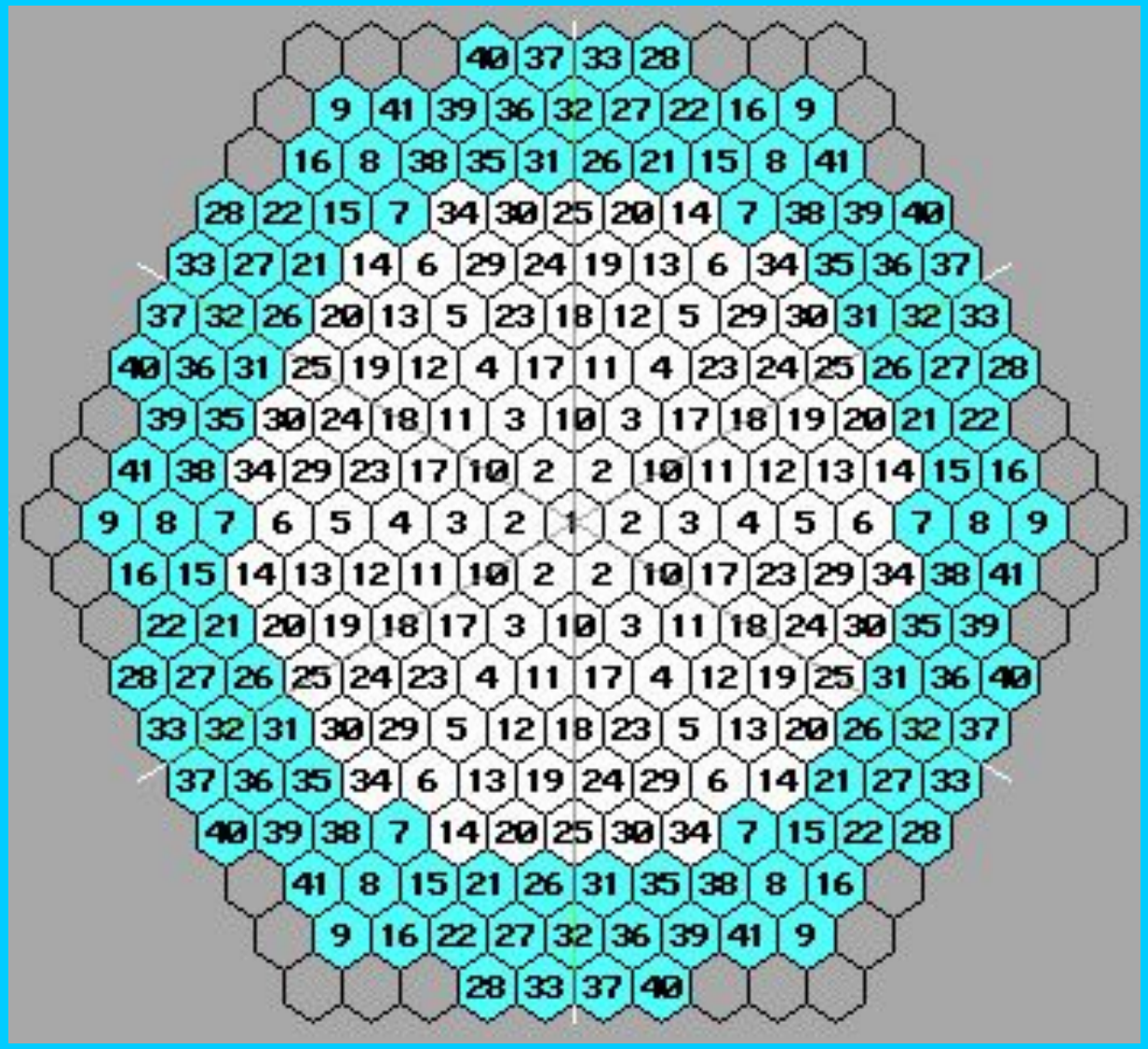
размер “под ключ” 205 мм
толщина 2,25 мм

- Центральная труба, ⌀10,7×1,0
- Направляющий канал под ПЭЛ, ⌀10,7×0,55, 18 шт.
- Твэл, 252 шт., оболочка ⌀10,7×0,55, шаг 12,0 мм

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

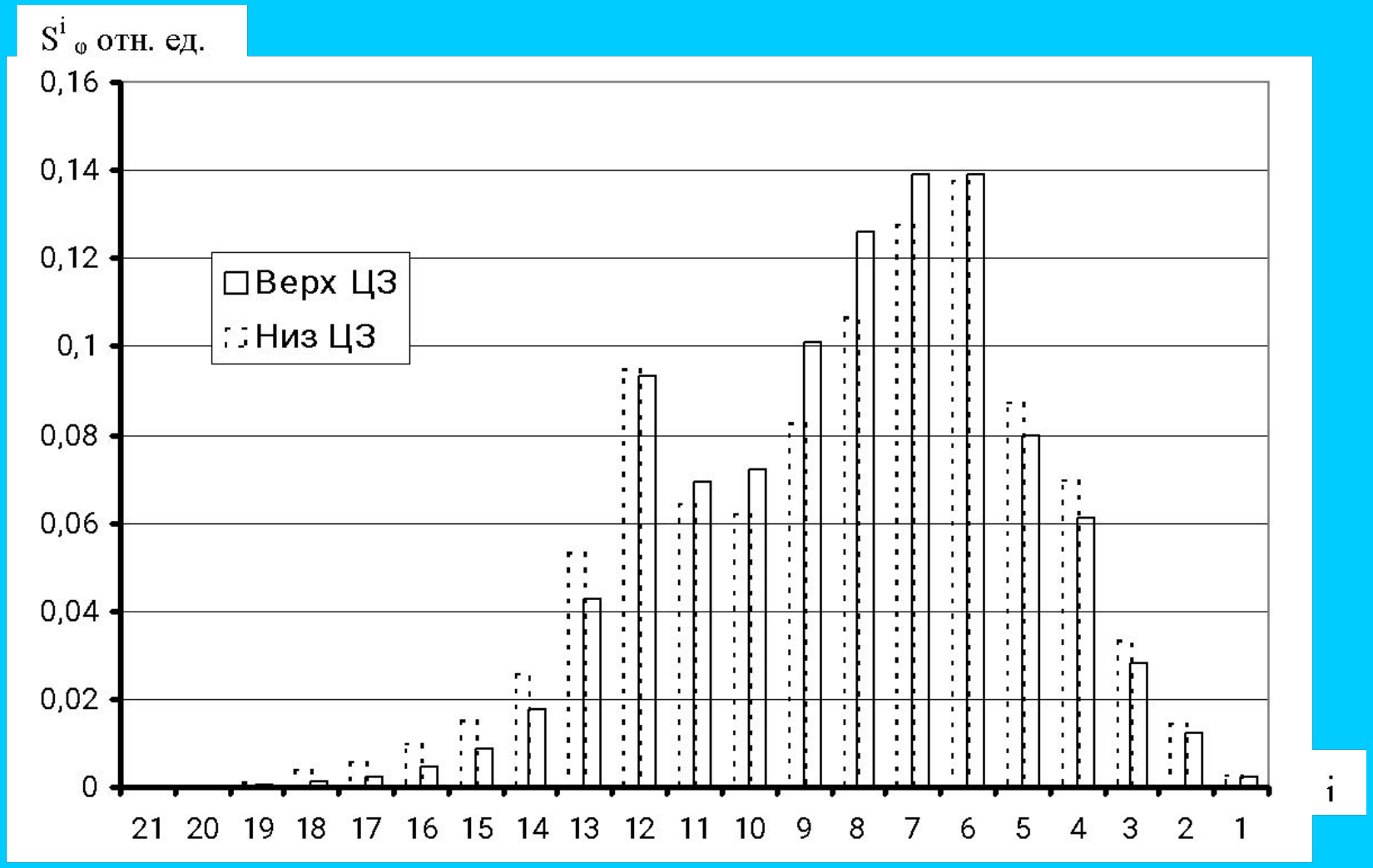
Картограмма активной зоны

ОКБ «ГП»



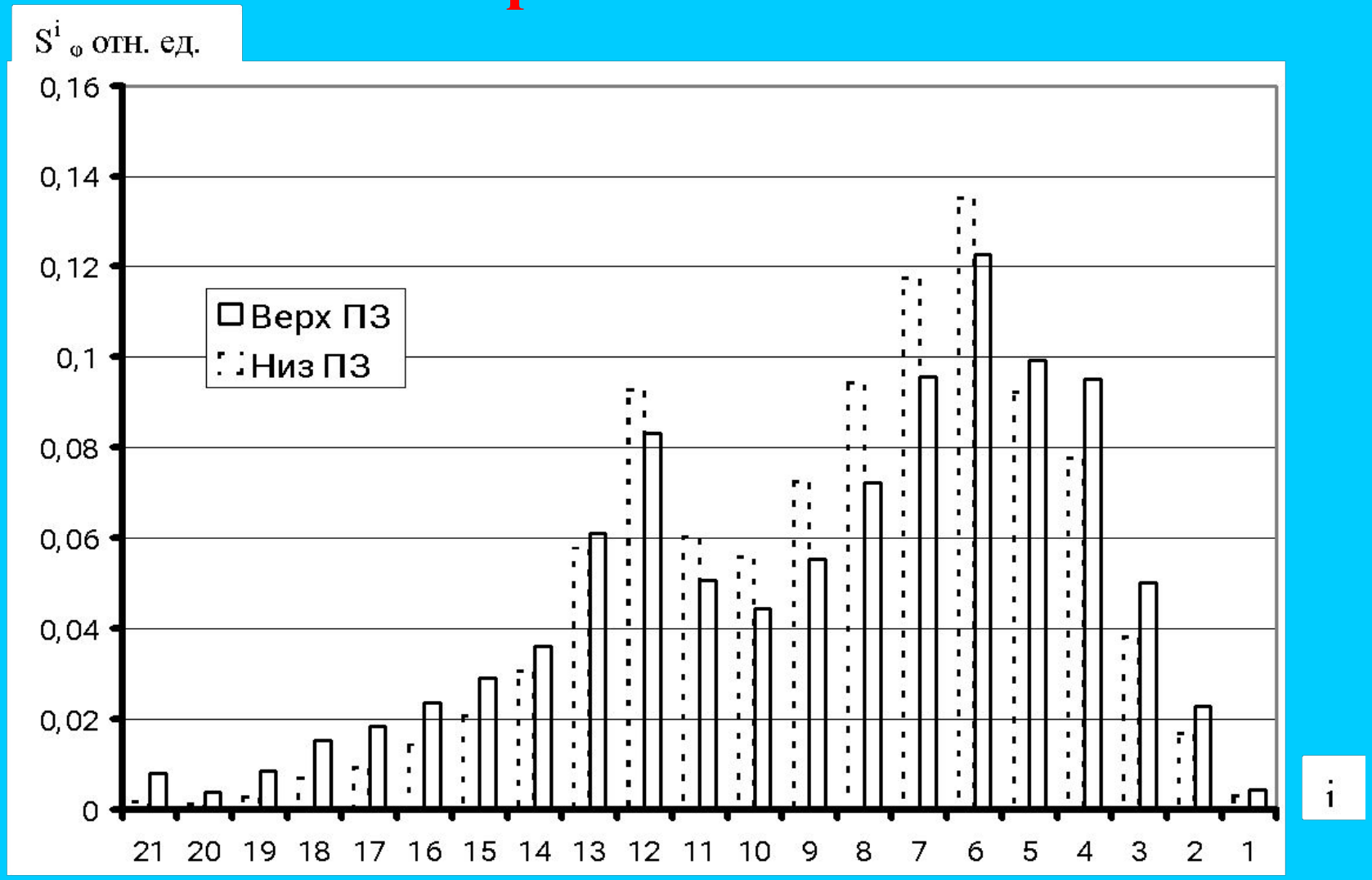
Доли групповых потоков нейтронов в центре активной зоны

ОКБ «ГП»



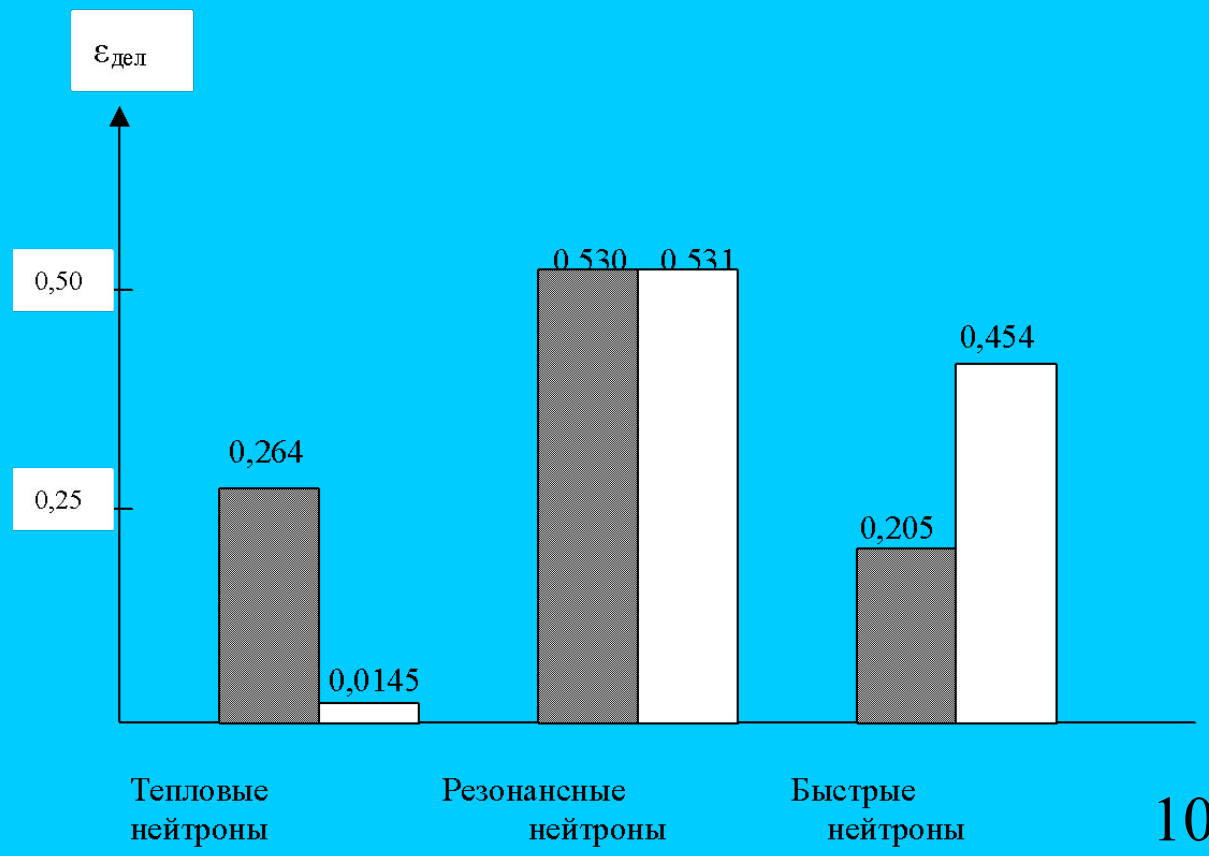
Доли групповых потоков нейтронов в ПЗ

ОКБ «ГП»



ОКБ «ГП»

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



Эффективность СУЗ ОКБ «ГП»

Рассмотрены следующие состояния реактора:

- **работа на номинальной мощности $N = N_н$;**
- **«МКУ», при котором вся активная зона заполнена питательной водой с $t_Т = 280$ °С и $P = 25$ МПа;**
- **«обезвоживание», при котором в активной зоне (а так же в отражателях) есть только пар с $\gamma_Т = 0{,}095$ г/см^3;**
- **залив всего реактора холодной водой при $t_Т = 20$ °С и $P = 10^{-5}$ МПа.**

Расчетное состояние	$N_н$	МКУ	Обезвоживание	Холодный
$\Delta K_{\%}$ (абс.)	1,26	7,265	-2,26	13,679
$N_{ТВС\ СУЗ}$	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 $ОР_{Pu}$ в а.з. (при всех “свежих” ТВС), т	15,68	9,47
Загрузка топлива (U + Pu)	598	560,6
Загрузка $ОР_{Pu}$ в одну ТВС, кг / расход $ОР_{Pu}$ в год, кг	67,88/3260	39,3/1864
Запас реактивности на кампанию, % в одну ТВС	1,5	1,21
Длительность межперегрузочного интервала, эфф. сут.	250	300
Количество типов ТВС/топлива в активной зоне	4/16	1/1
Средняя энерговыработка выгружаемых ТВС, 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: повреждающая доза, $ат/см^2$	39,9	40
флюенс быстрых нейтронов, $n/см^2$	$8,2 \cdot 10^{22}$	$8,4 \cdot 10^{22}$
Максимальные $t_т/t_{об}/t_{топ}$, С	558/662/1560	558/572/1140

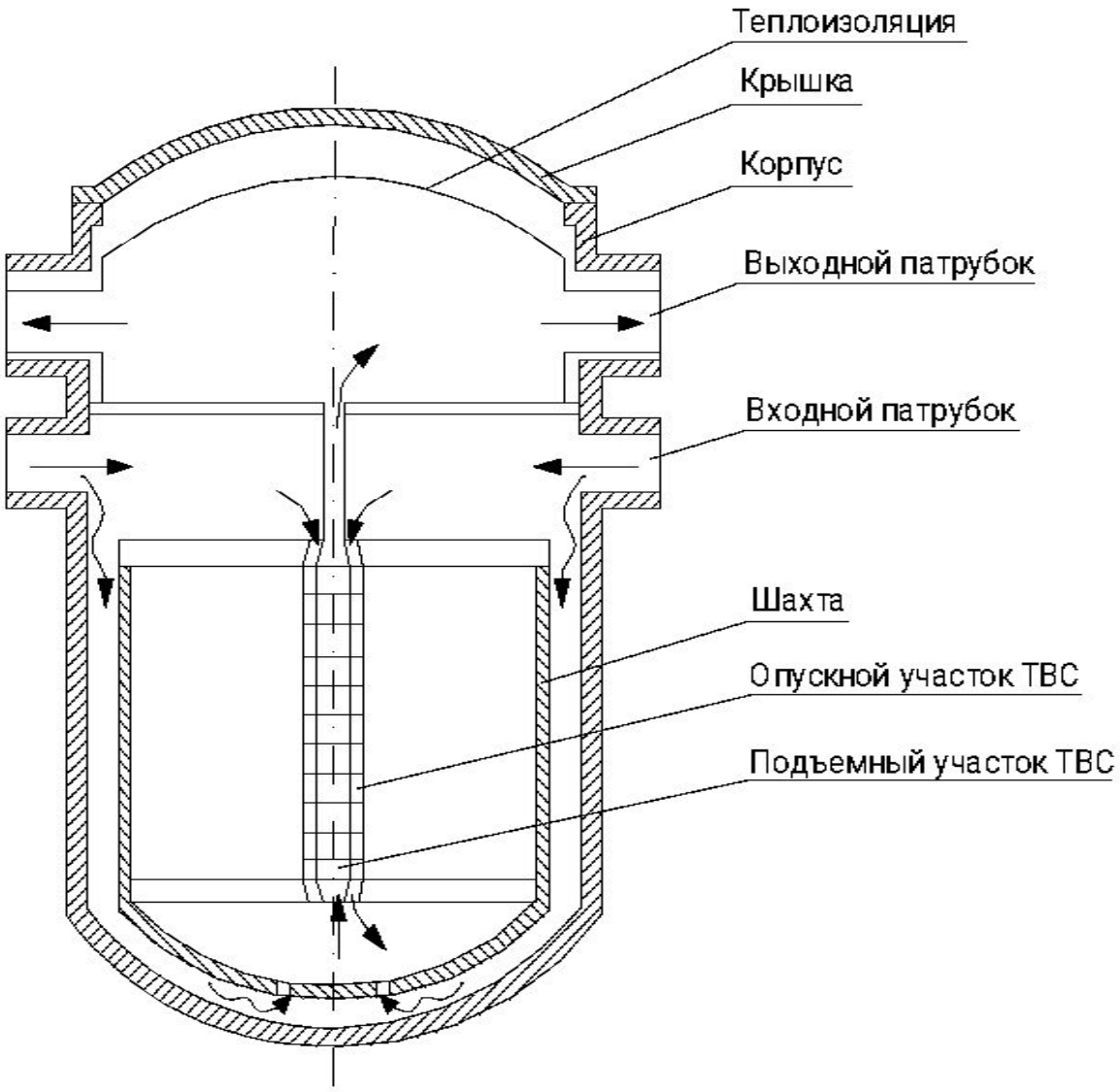
Реактор с тепловым спектром

ОКБ «ГП»

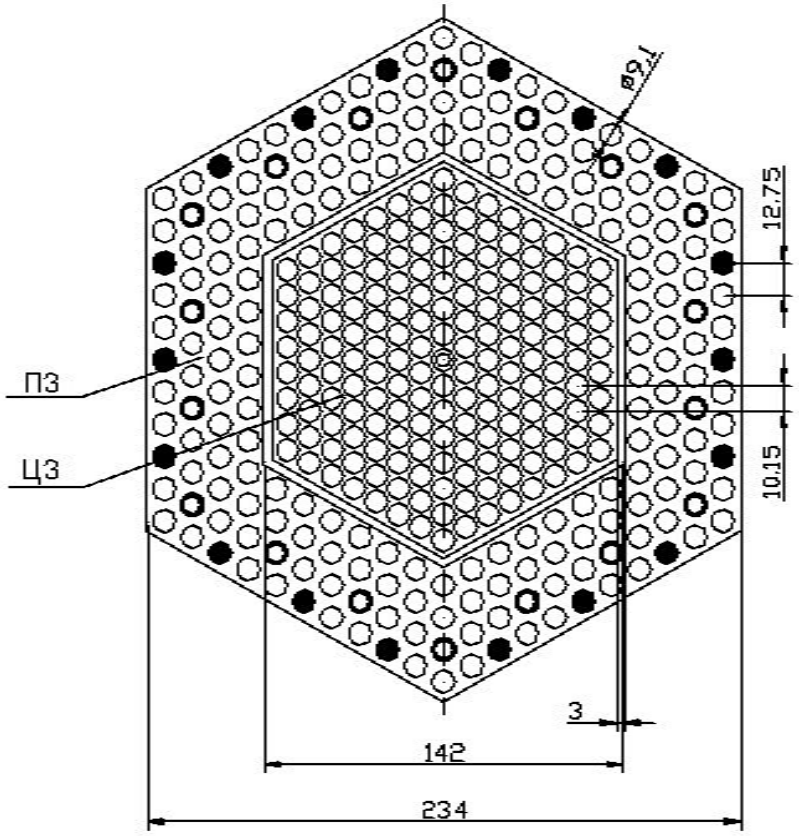
Мощность, МВт:	
электрическая	1200
тепловая	2700
Теплоноситель:	
давление, МПа	25
температура на входе/выходе, °С	280/510
расход , т/час	5440
Высота/эквивалентный диаметр активной зоны, м	3,55/3,16
Число ТВС, шт	163
Энергонапряженность ЦЗ/ПЗ, Вт/см^3	153/80
Тепловой поток с поверхности твэл ЦЗ/ПЗ, Вт/см^2	51/47

Схема охлаждения реактора

ОКБ «ГП»



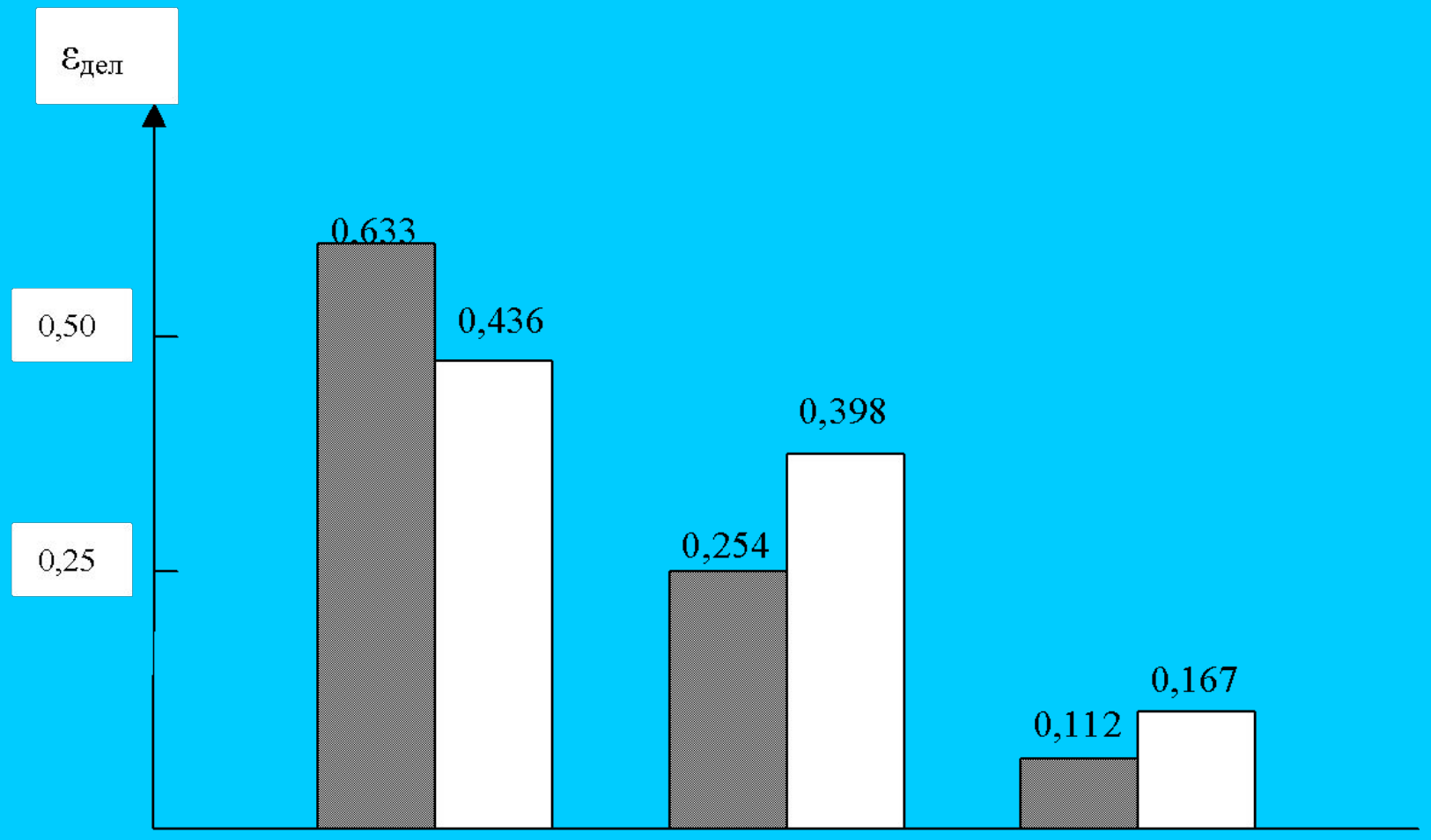
Поперечное сечение ТВС ОКБ «ГП»



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

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

ОКБ «ГП»



ОКБ «ГП»

Величины реактивности и требуемое количество СУЗ при различных состояниях реактора

Расчетное состояние	МКУ	Обезвоживание	Холодный
$\Delta K_{эф}$ (абс.)	9,8	-25,6	13,5
$N_{ТВС\ СУЗ}$ %	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. при всех ТВС), т	3,47/2,22
Загрузка 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 максимальная по ТВС максимальная по объему а.з.	 27,8 30,6 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 $N = N_н$ на начало межперегрузочного интервала: ? ρ/?γ·10^{-2}, см^3/г ? ρ/?$T_{топл}$·10^{-4}, 1/°С ? ρ/?$S_п$·10^{-4}, 1/% ? ρ/?$T_{пара}$·10^{-5}, 1/° С	 34,3 -9,8 -1,9 -17,8
Расход природного урана, кг/МВт (т)·сут	0,102

Заключение

ОКБ «ГП»

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 бланкета, 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.