

Газоохлаждаемый реактор с высоким коэффициентом полезного действия



Котов В. М., Зеленский Д.И.

(1) ИАЭ НЯЦ РК, г. Курчатов, ВКО Республика Казахстан.

(2) ЗАО МЭТР, Москва, Россия.

Возможные направления повышения КПД АЭС с газотурбинными установками

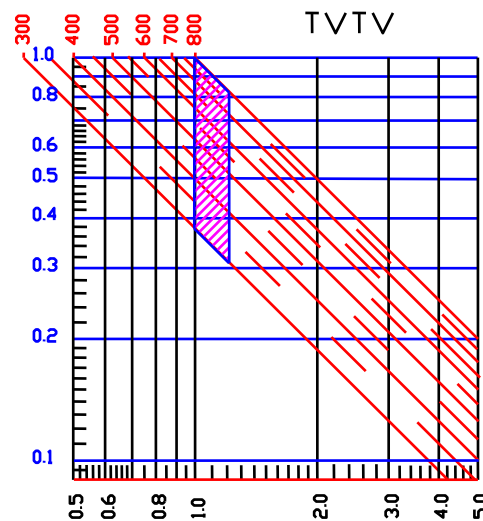
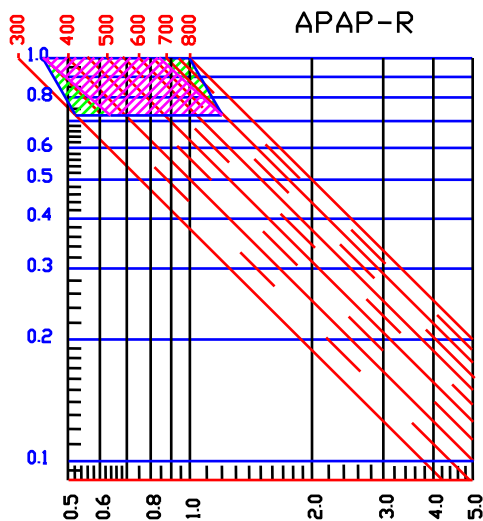
- **Цикл Ренкина:**
 - Особенность: работа на сверхкритическом давлении легководного теплоносителя.
 - Проблемы – усложнение конструкции реактора и контура теплоносителя, необходимость решения многих технических задач.
- **Цикл Брайтона:**
 - Особенность: использование ГТУ с малым расширением рабочего тела.
 - Проблемы – необходимость рекуперации тепловой энергии изобарических процессов, высокая температура топлива, технические проблемы ГТУ.

Особенности применения для АЭС поршневых двигателей

- ❑ **Двигатели Стирлинга:**
- ❑ Особенности: Работа в области малых расширений, необходимость рекуперации тепловой энергии.
- ❑ Недостатки: высокая температура топлива и теплоносителя (1123-1373 К). Использование графита в проектах ВТГР.
- ❑ **Цикл Брайтона с высоким расширением рабочего тела (АРАР):**
- ❑ Возможность использования определяется малыми потерями энергии в отдельных процессах.
- ❑ Достоинства: КПД на уровне 45-48 % при использовании топлива существующих реакторов.
- ❑ Возможны модификации цикла для повышения его эффективности.

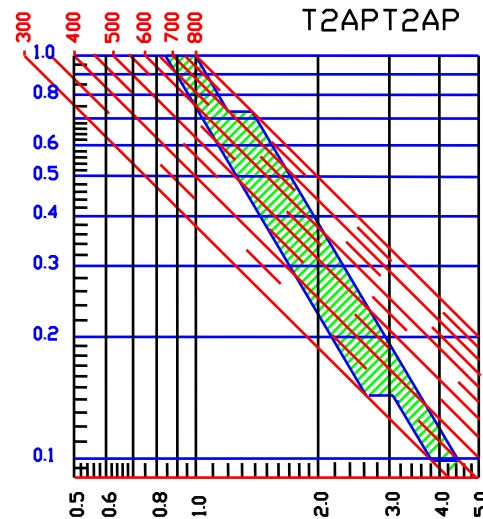
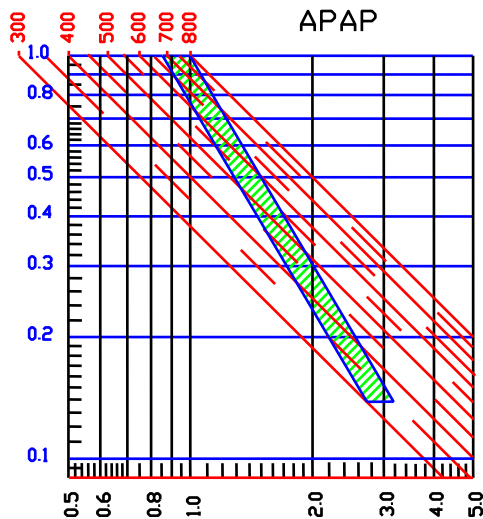
Циклы возможных преобразователей с внешним подводом тепловой энергии

Цикл газотурбинной установки



Цикл Стирлинга

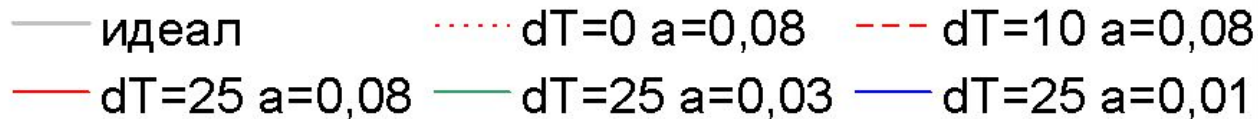
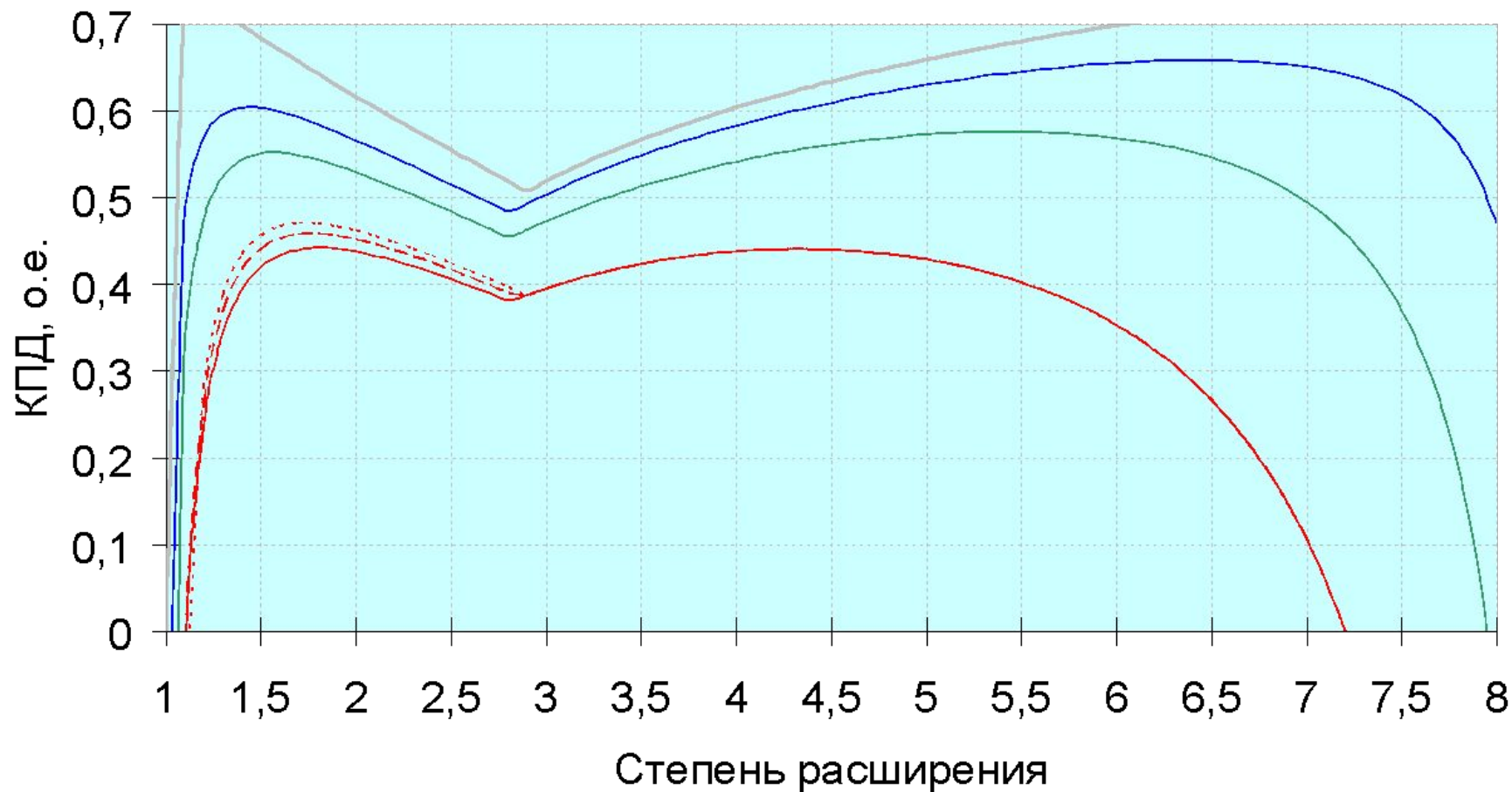
Цикл APAP



Дискретное приближение цикла APAP к Карно

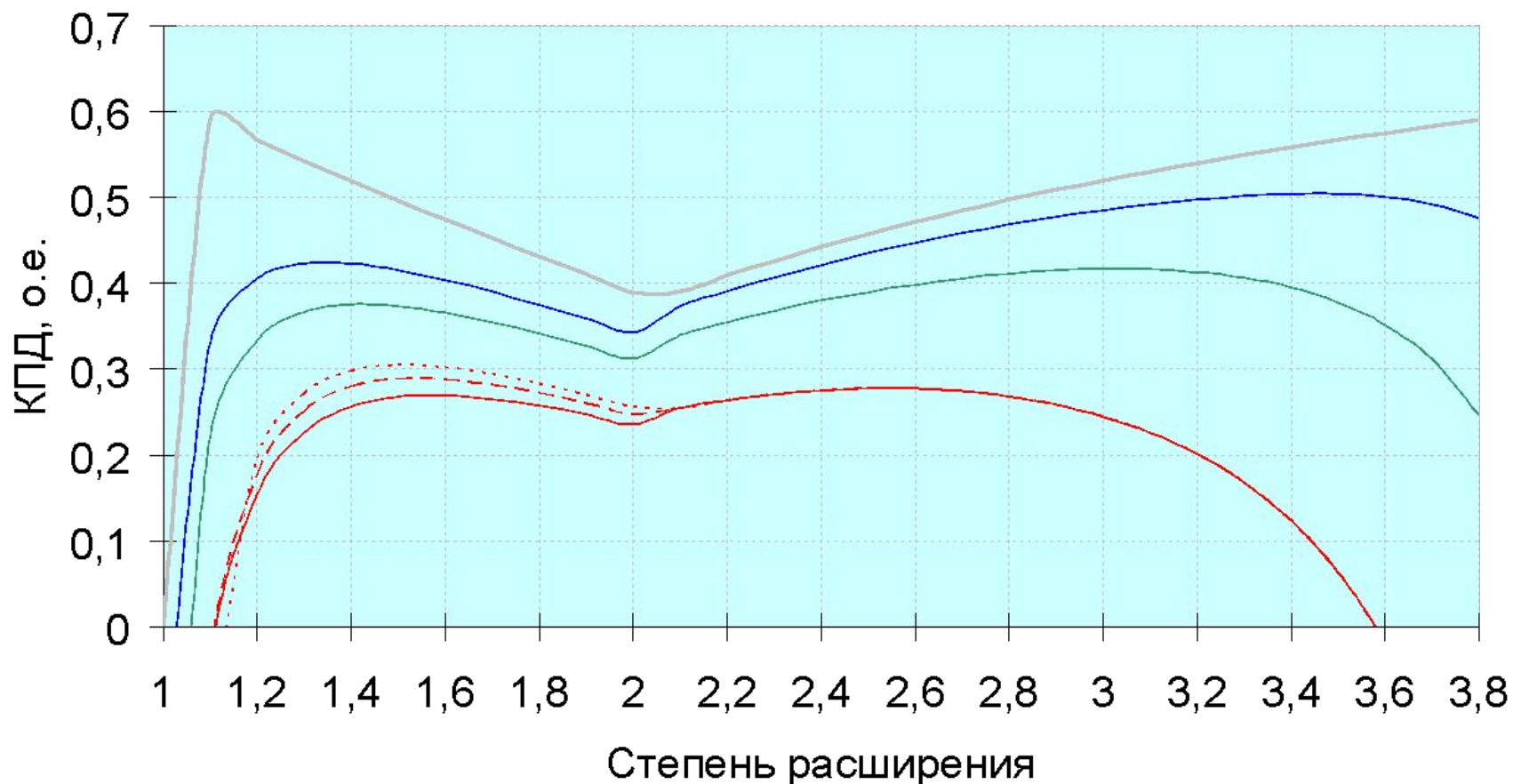
КПД цикла Брайтона. $T_{\max} = 1223 \text{ К}$, $T_{\min} = 300 \text{ К}$.

Рабочее тело – гелий.



КПД цикла Брайтона. $T_{\max} = 773 \text{ К}$, $T_{\min} = 300 \text{ К}$.

Рабочее тело – гелий.



— идеал dT=0 a=0,1	--- dT=10 a=0,1
— dT=25 a=0,1	— dT=25 a=0,03	— dT=25 a=0,01

КПД цикла TVTV (идеал для Стирлинга).

$T_{\max} = 773 \text{ К}$, $T_{\min} = 300 \text{ К}$. Рабочее тело – гелий.

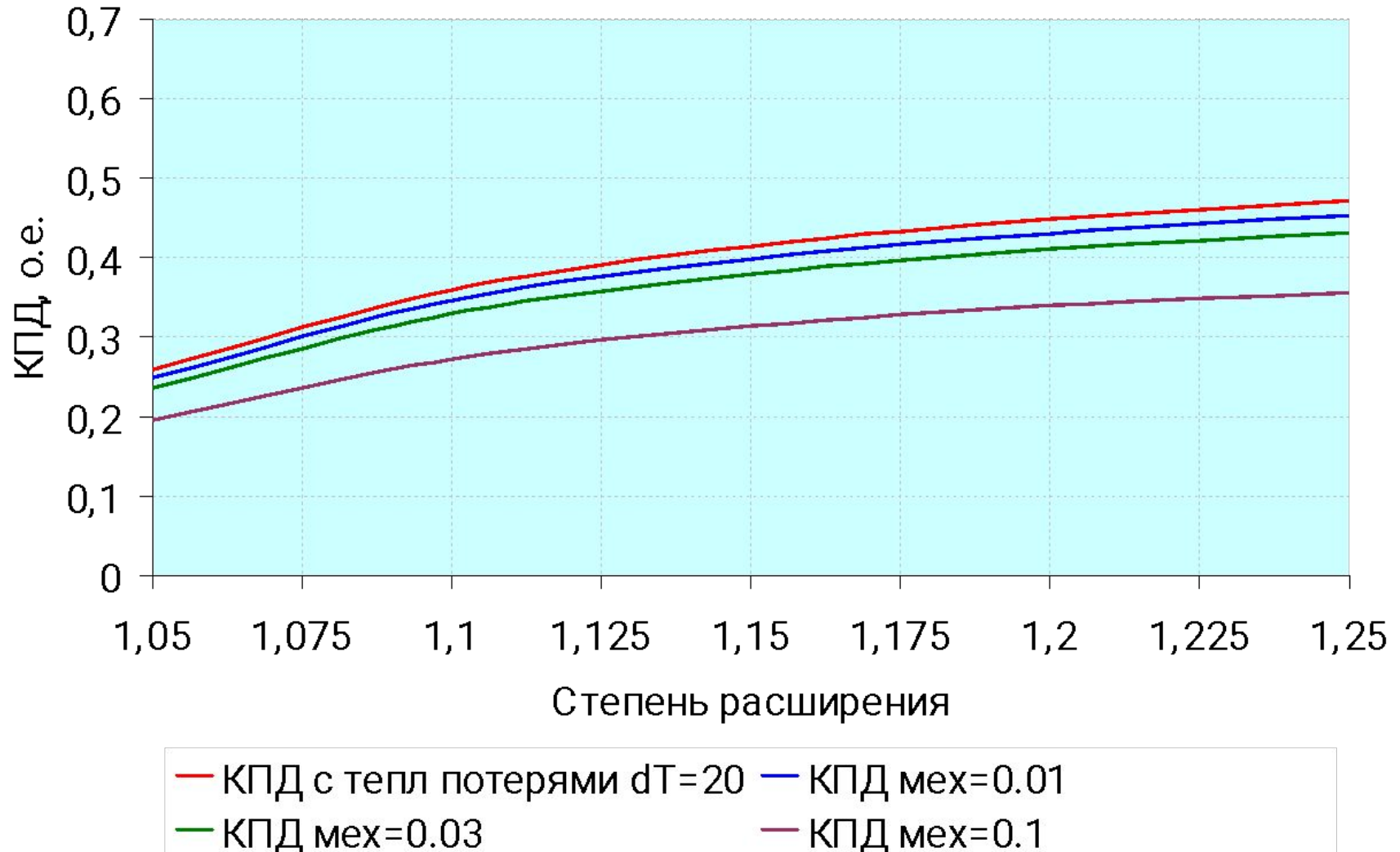


Схема поршневого двигателя цикла АРАР

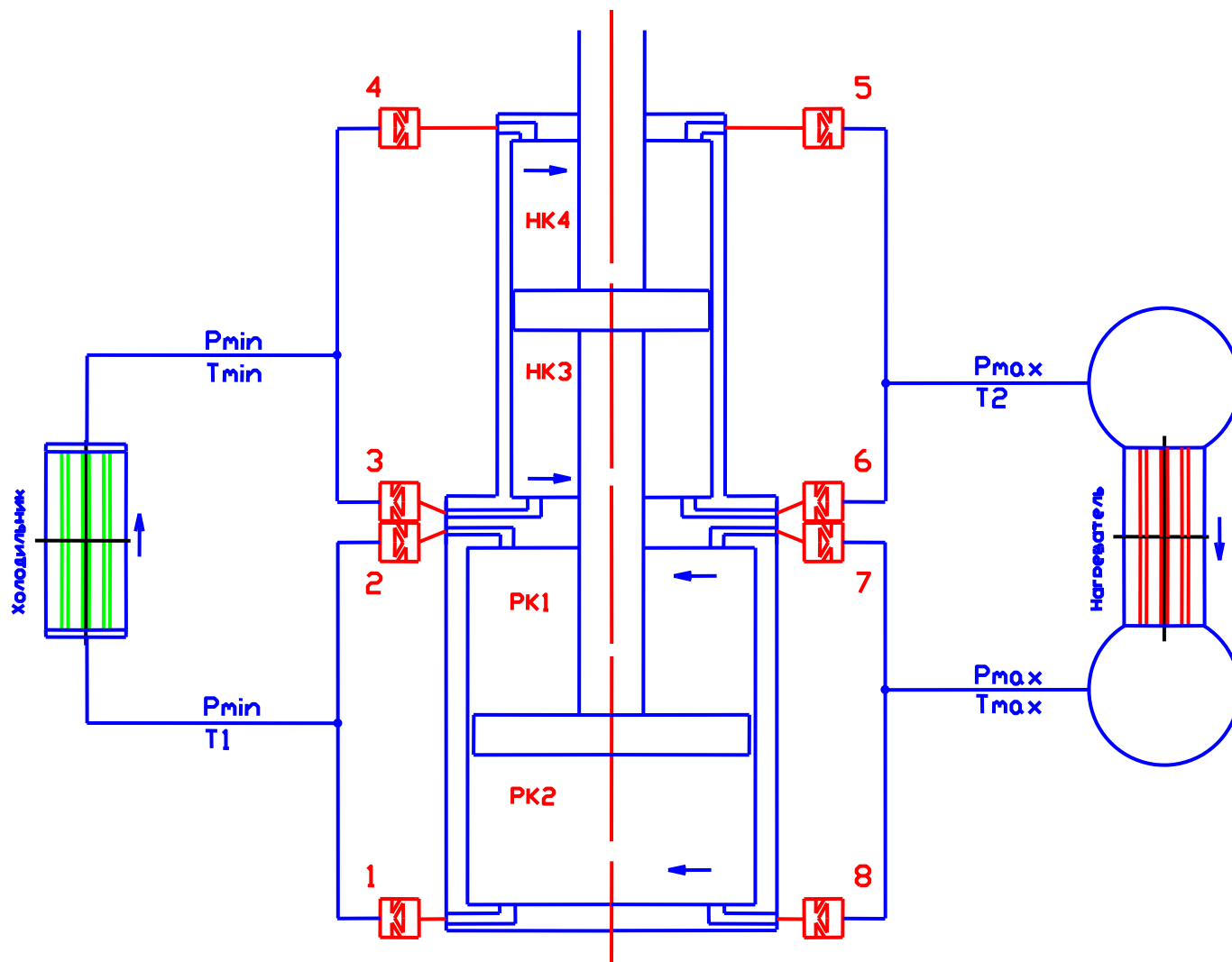
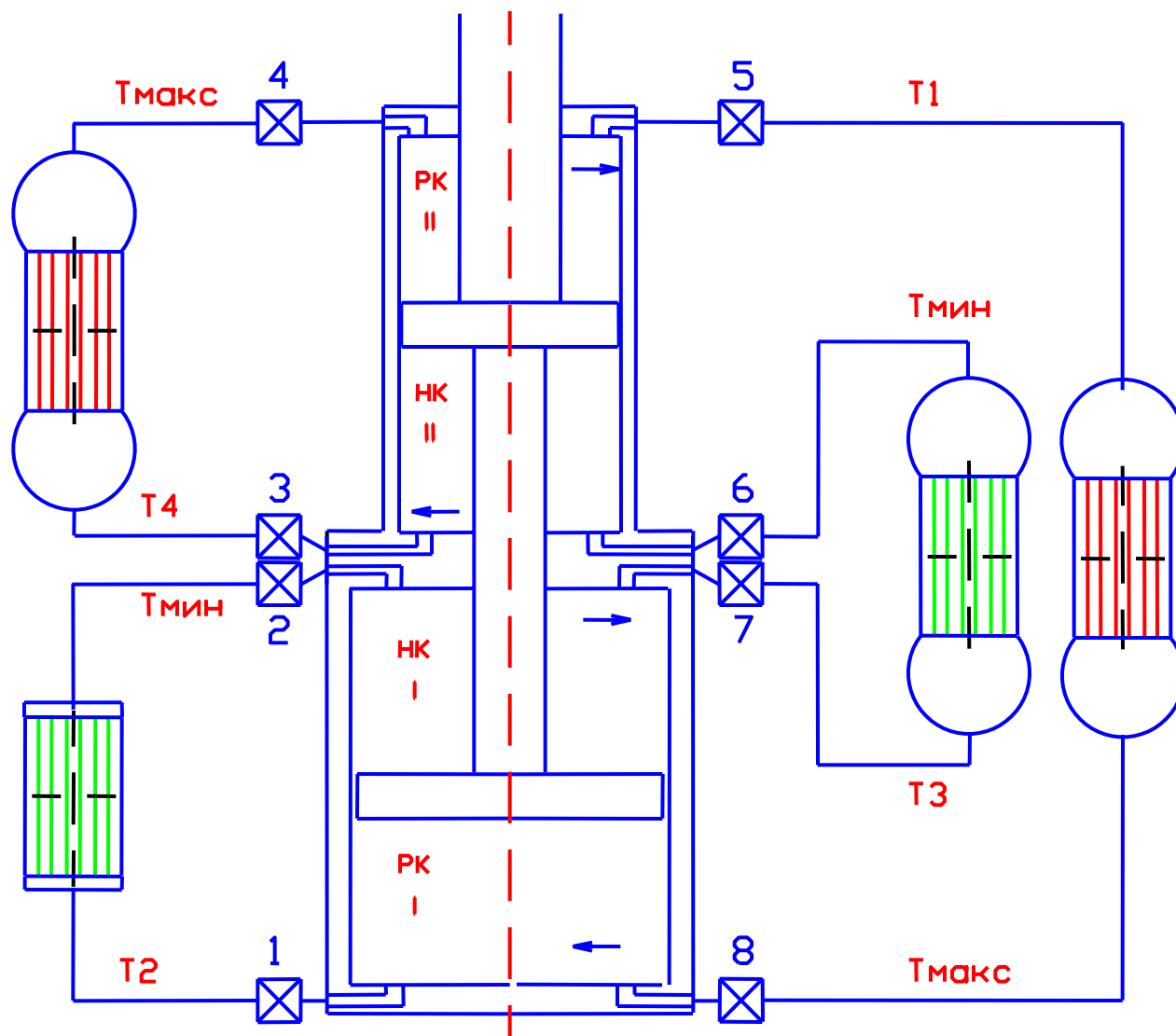
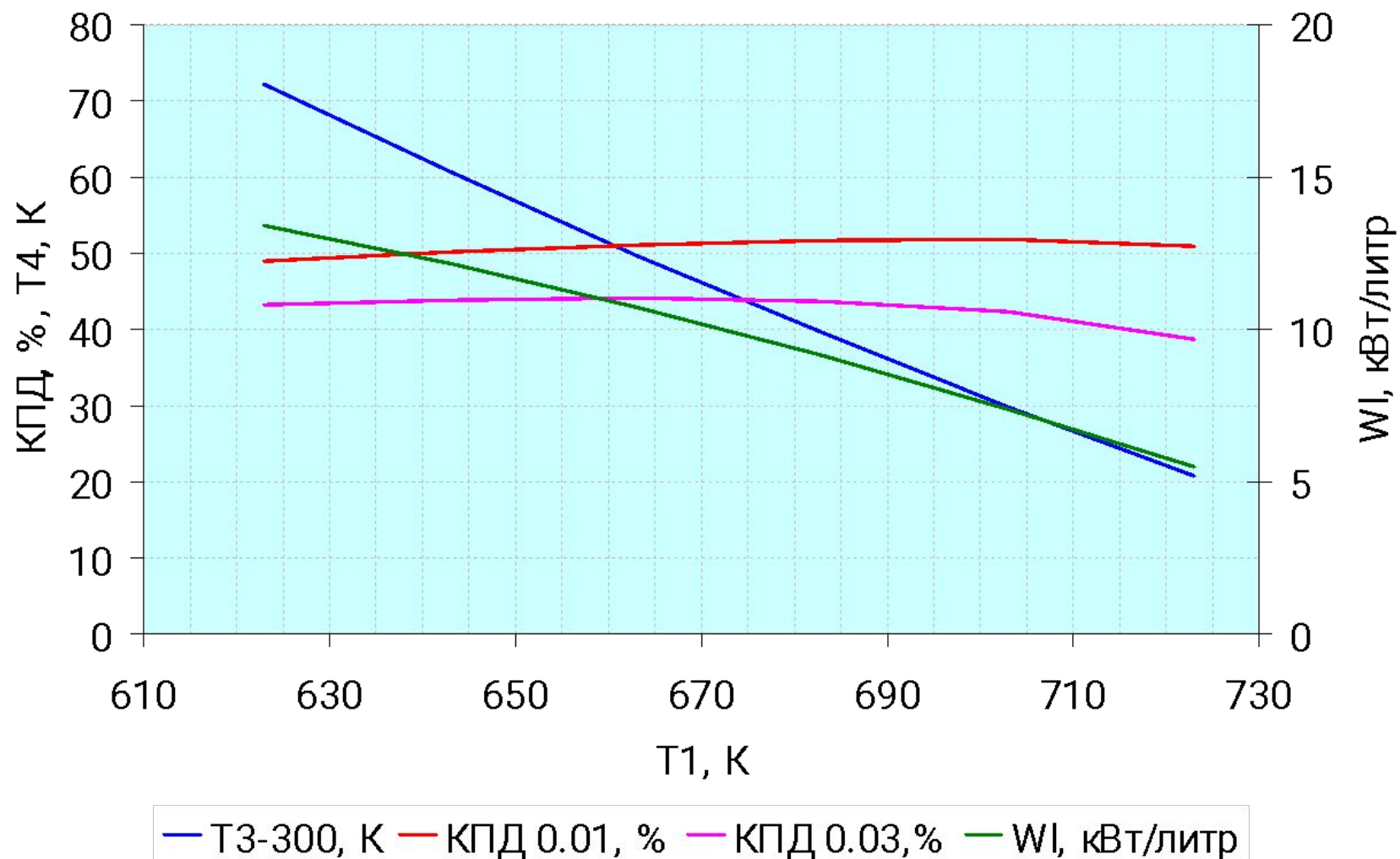


Схема поршневого двигателя цикла $T_2AP T_2AP$



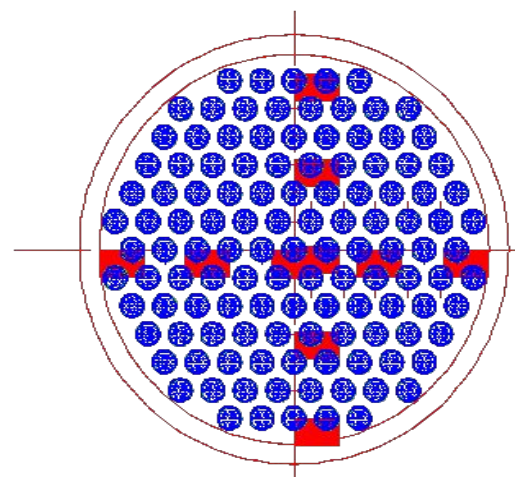
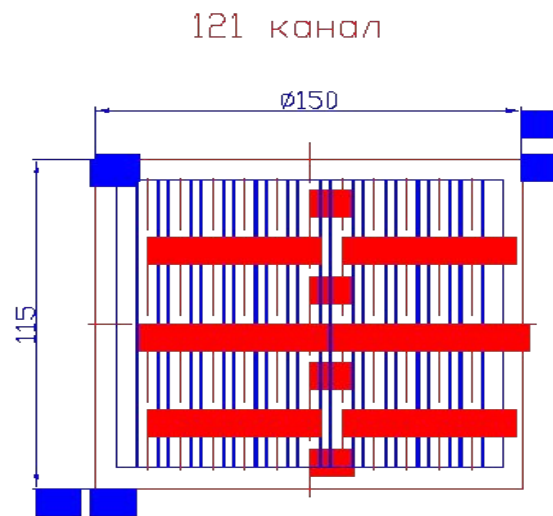
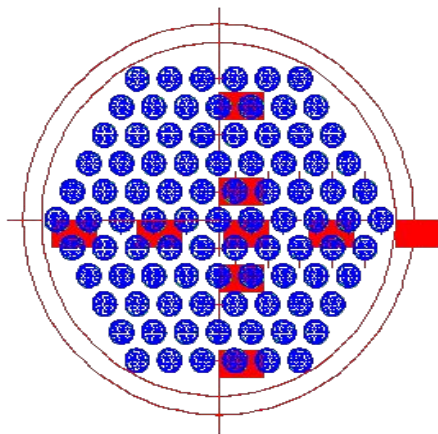
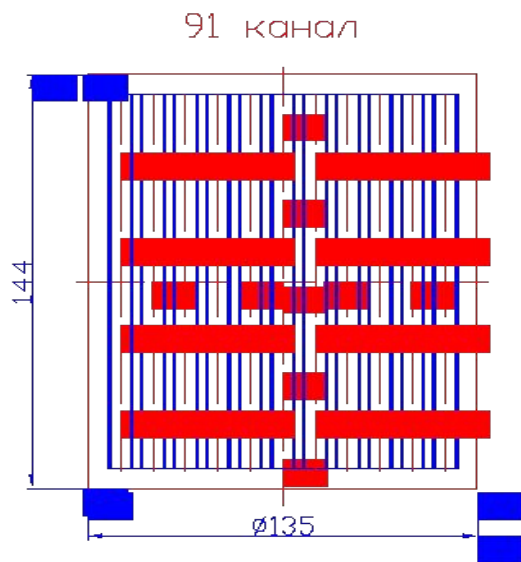
Характеристики цикла $T_2AP T_2AP$



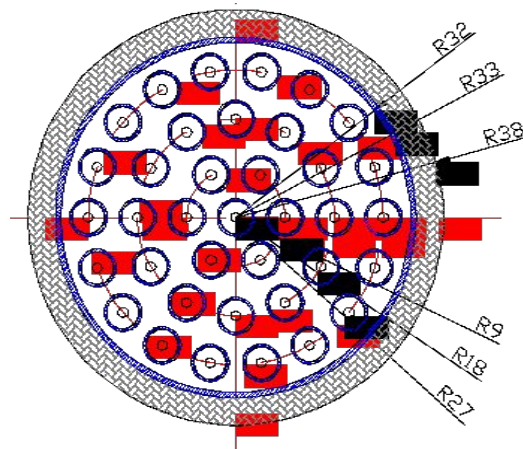
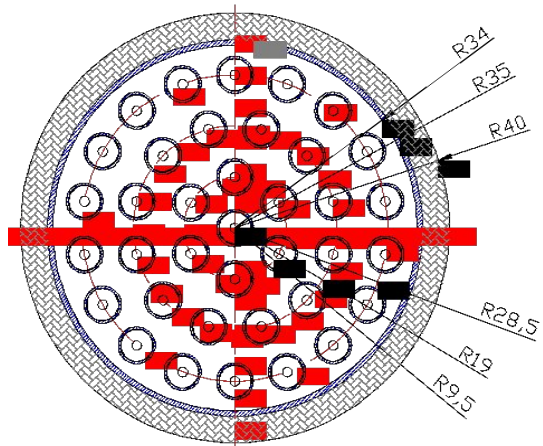
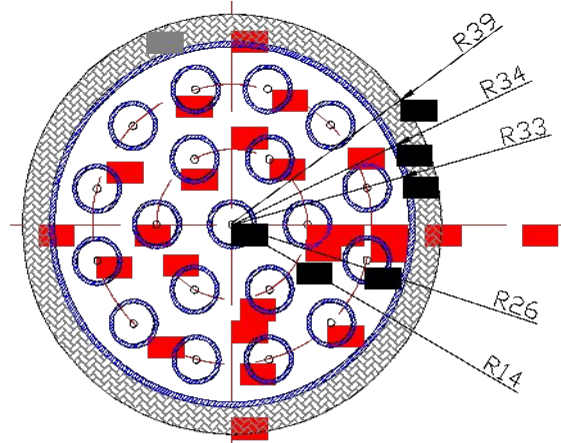
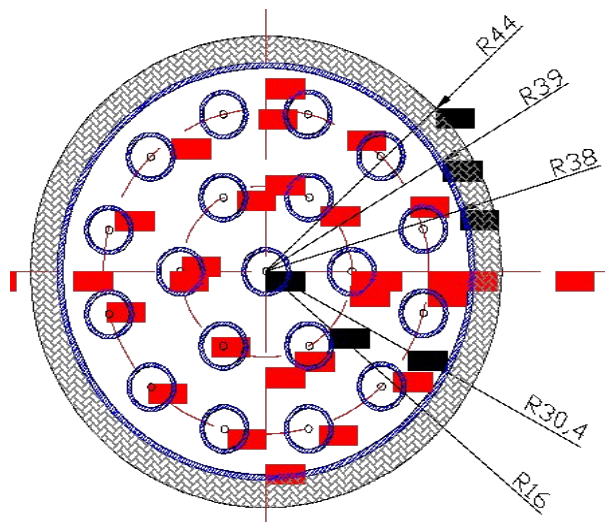
Исходные данные для расчета характеристик реактора тепловой мощностью 40 МВт.

	Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Активная зона	Замедлитель	Смесь H ₂ O и D ₂ O	
	Давление в полости замедлителя, МПа	2,5	
	Температура замедлителя, К	485	
	Высота (по топливу), м	1,3	1,0
	Число каналов	91	121
Топливный канал	Материал топливного сердечника	диоксид урана	
	Материал оболочки	Zr + 0,01 Nb	
	Внешний диаметр твэла, мм	6,9	9,1
	Число твэлов в канале	37	19
	Допустимая температура топлива, К	2200	
	Допустимая температура оболочки твэла, К	1100	
	Теплоноситель (рабочее тело)	гелий	
	Тип цикла рабочего тела	T ₂ AP T ₂ AP	
	Температура гелия на входе, К	350	
	Температура гелия на выходе, К	773	
	Давление гелия в каналах типа I, МПа	6,0	
	Давление гелия в каналах типа II, МПа	4,2 (3,24)	
	Внешний диаметр корпуса канала, см	7,6 – 8,8	
	Материал корпуса канала	Zr + 0,01 Nb	
Толщина стенки корпуса канала, мм	1,0		

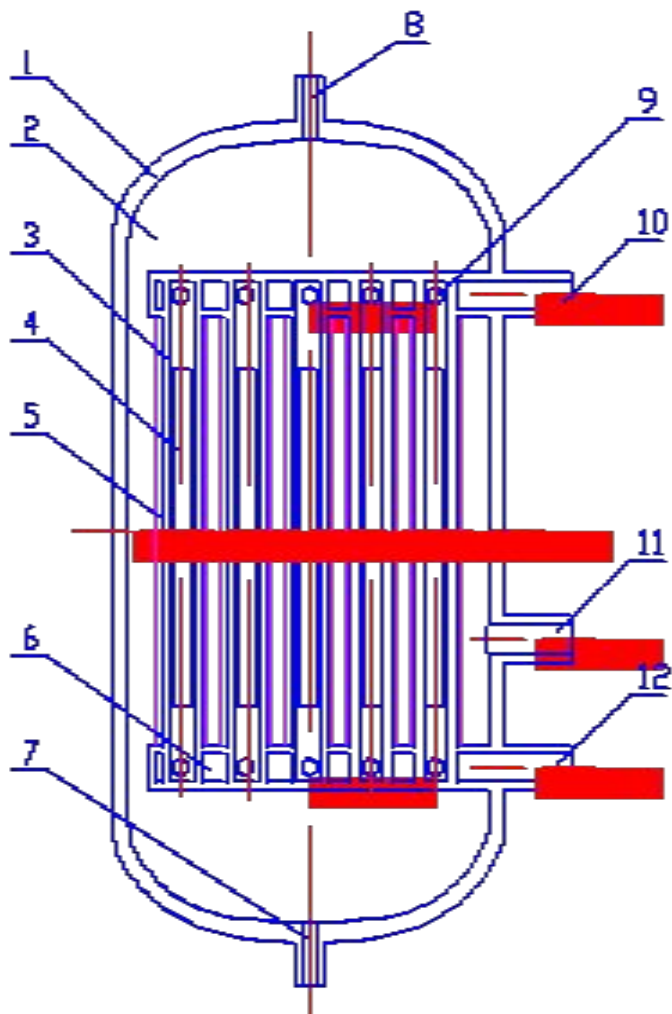
Варианты геометрии активной зоны реактора



Варианты размещения ТВЭЛОВ с внешними диаметрами 6,9 мм и 9,1 мм в ТВС



Основные элементы активной зоны и замедлителя реактора

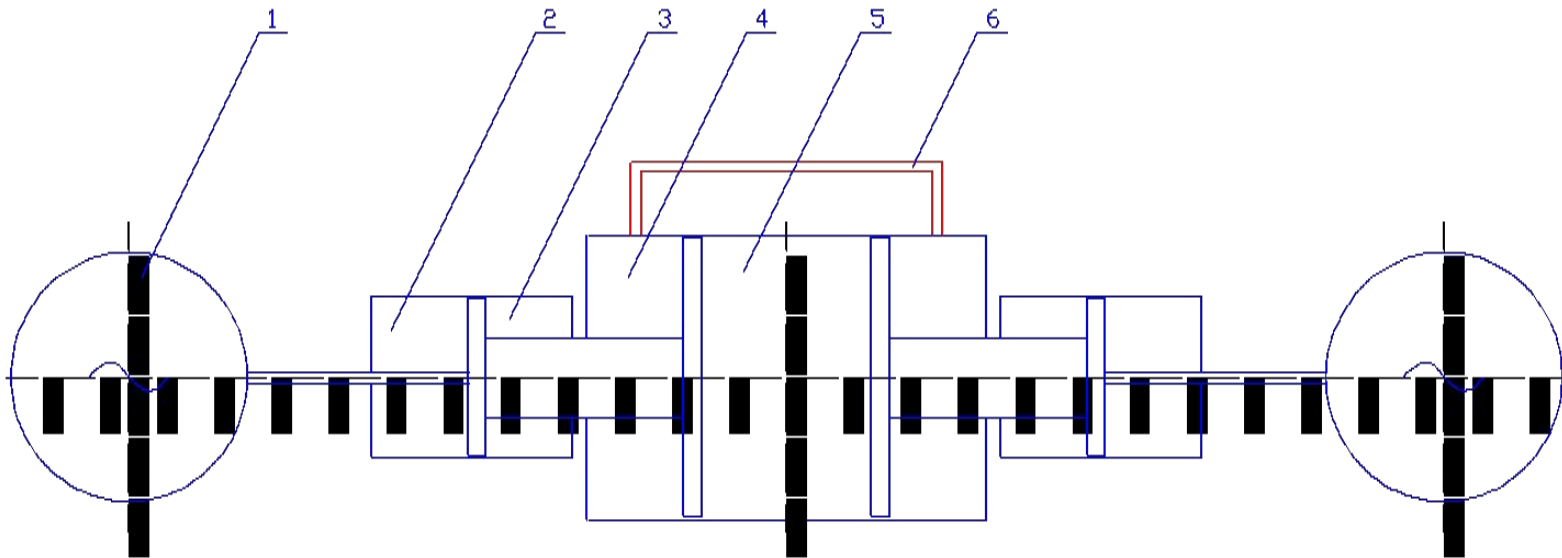


- 1 – корпус реактора,
- 2 – замедлитель,
- 3 – корпус канала ТВС,
- 4 – ТВС,
- 5 – теплоизоляция ТВС,
- 6 – интегральный коллектор теплоносителя,
- 7 – входной патрубок замедлителя,
- 8 – выходной патрубок замедлителя,
- 9 – отверстия связи «канал – коллектор»,
- 10 – выходной коллектор теплоносителя,
- 11 – коллектор аварийного сброса замедлителя,
- 12 – входной коллектор теплоносителя

Результаты теплового расчета элементов ТВС

Теплоноситель	91 канал	121 канал
Перепад давления по высоте ТВС, МПа	0,09	0,02
Скорость теплоносителя на выходе ТВС, м/с	120	75
Отношение мощности прокачки к выработанной электрической мощности, %	4,9	0,5
Наиболее горячие твэл и ТВС в реакторе		
Максимальная температура в центре сердечника твэла, К	1724	
Максимальная температура на поверхности сердечника, К	1537	
Максимальная температура гелия в зазоре, К	1055	
Максимальная температура оболочки твэла, К	900	
Максимальная температура стенки канала ТВС, К	782	

Схема свободнопоршневого генератора



1 – линейный электрогенератор, 2, 3 – насосные камеры двигателя АРАР, 4, 5 – рабочие камеры двигателя АРАР, 6 – магистраль синхронизации движения поршневых групп.

На АЭС электрической мощностью 20 МВт устанавливается три генератора для выработки трехфазного напряжения. Мощность одного линейного генератора – 3.3 МВт.

Сравнительные характеристики реакторов с газовым теплоносителем

	<i>ПАРАМЕТР</i>	<i>HTGR BEACH BOTTOM</i>	<i>AGR</i>	<i>HTGR-1160</i>	<i>THTR-300</i>	<i>KHTR</i>	<i>РАСЧЕТНЫ Й РЕАКТОР</i>
Реактор	Тепловая мощность, МВт	115	1493	3000	750	50	40
	Электрическая мощность (брутто), МВт	40	625	1175	310	15	20
	КПД	35	42	39	41	30	50
Первый контур	Теплоноситель	гелий	CO ₂	гелий	гелий	гелий	гелий
	Давление, МПа	2,4	4,3	5,1	4,0	4	5
	Температура теплоносителя на входе, °С	344	292	316	260	560	350
	Температура теплоносителя на выходе, °С	728	645	741	750	900	500
Активная зона	Диаметр, м	2,8	9,1	8,4	5,6	3,0	1,25
	Высота, м	2,3	8,3	6,3	5,1	2,9	1,3
	Энергонапряженность, МВт/м ³	-	2,76	8,6	6,0	5,7	28
	Энергонапряженность топлива, кВт/кг	-	13,1	76,5	115	33,8	36,2
	Топливо	-	UO ₂ (обогащение 2,0-2,55 %)	Th-235U (обогащение 93 %)	Th-235U (обогащение 93 %)	U обогащение макс, 9,9 %, мин, 3,0 %, среднее 5,3 %	UO ₂ (обогащение 5 %)

Модель двигателя АРАР



Заключение

- Применение в качестве нагрузки ядерного реактора поршневой машины, работающей на основе адиабатических и изобарических процессов (АРАР или $T_2AP T_2AP$) обеспечивает возможность достижения коэффициента полезного действия на уровне до 50 % при использовании хорошо отработанного в энергетических реакторах на ТВЭлах с оксидным топливом температурного режима.
- Проработан вариант газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем тепловой мощностью 40 МВт. В состав замедлителя включены обычная и тяжелая вода, что обеспечивает простоту конструкции реактора, безопасность его работы и уменьшает затраты на утилизацию его элементов при выводе из эксплуатации в сравнении с графитовым замедлителем.
- Простота технологической схемы преобразования тепловой энергии в электрическую является предпосылкой высокой экономической и экологической эффективности АЭС.
- «Способ работы тепловой машины и поршневой двигатель для его осуществления» запатентованы в РФ (Патент на изобретение № 2284420).