



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ»

# ВВЭР-СКД – будущее легководных энергетических реакторов

Научно-техническая молодёжная конференция  
*«Будущее – атомная энергетика»*

**Пустовалов Станислав Борисович** – начальник отдела, к.т.н.,  
ответственный исполнитель работ по направлению ВВЭР-СКД

г. Нововоронеж, НВЭАС, 17 мая 2023 года

# Общие сведения

В рамках Подпрограммы НИОКР ГК «Росатом» на 2019-2028гг. «Разработка технологий корпусных энергетических реакторов с легководным теплоносителем закрытых параметров» должен быть выполнен первый этап разработки энергетического реактора нового поколения, обладающего следующими характеристиками:

- Работа в ЗЯТЦ с коэффициентом воспроизводства (КВ), **не менее 1,0**
- Эффективный КПД ЯЭУ, **не менее 0,4**
- Радиационная безопасность машзала – не ниже требований Поколения 3+
- Удельная стоимость – не ниже требований Международного форума «Поколение 4»
- Срок сооружения – не ниже требований Международного форума «Поколение 4»
- Срок службы – не ниже требований Поколения 3+

# Система АЭ на базе ВВЭР

*пессимистичный сценарий*

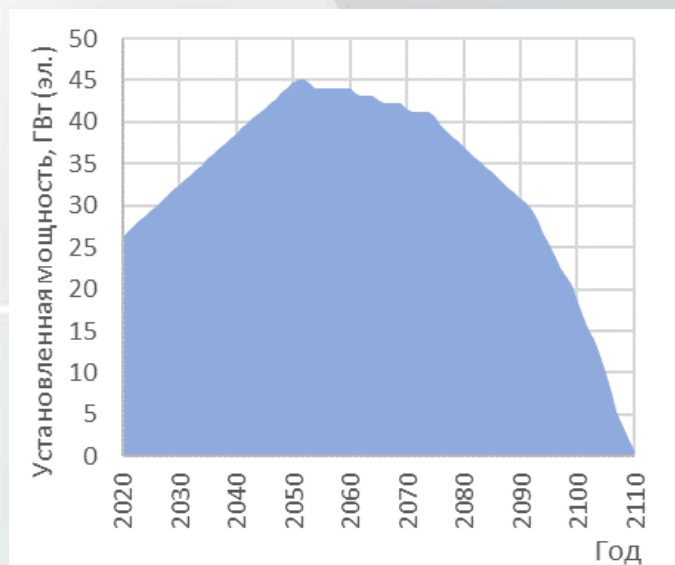


Рис. 1. Установленные мощности АЭ на базе ВВЭР, ГВт(эл.) (пессимистичный сценарий)

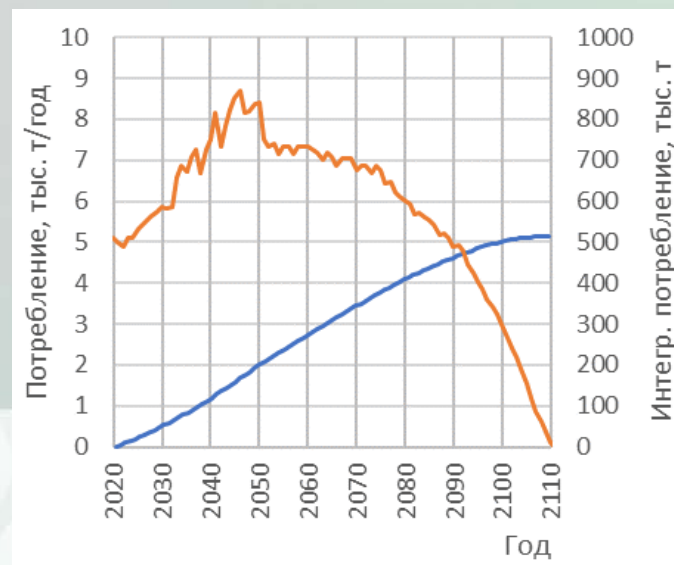


Рис. 2. Потребности реакторов ВВЭР в природном уране, тыс. т/год: — — интегральное потребление; — — ежегодное потребление (пессимистичный сценарий)

По состоянию на 1 января 2020 г. запасы и ресурсы урана в России оценивались в 513 тыс. т. [1].

В пессимистичном сценарии предполагается, что до 2022 г. ввод мощностей совпадает с фактическим, а затем до 2050 г. мощности вводятся с максимально возможным темпом так, чтобы все вводимые реакторы были обеспечены топливом на весь срок службы.

В этом случае установленная мощность системы АЭ составит 45 ГВт(эл.) к 2050 г.

После 2050 г. новые реакторы ВВЭР не вводятся, а уже введенные дорабатывают свой срок эксплуатации и к 2110 г. прекращают свою работу полностью (рис. 1), так при таком сценарии весь доступный ресурс природного урана будет исчерпан (рис. 2).

[1] **Отчетные** материалы горнорудного дивизиона за 2019 год. АРМЗ/Росатом [Электронный ресурс]. URL: [https://report.rosatom.ru/go/atomredmetzoloto/go\\_atomredmetzoloto\\_2019/armz\\_2019.pdf](https://report.rosatom.ru/go/atomredmetzoloto/go_atomredmetzoloto_2019/armz_2019.pdf) (дата обращения 17.01.2023).

# Система АЭ на базе ВВЭР-СКД

## эволюционный сценарий

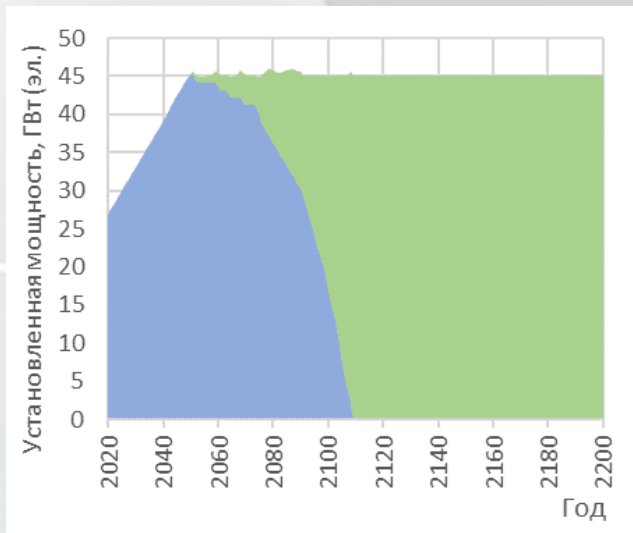


Рис. 3. Изменение структуры установленных мощностей ЯЭУ на базе легководных реакторов, ГВт (эл.): ■ — ВВЭР (UOX); ■ — ВВЭР-СКД (эволюционный сценарий)

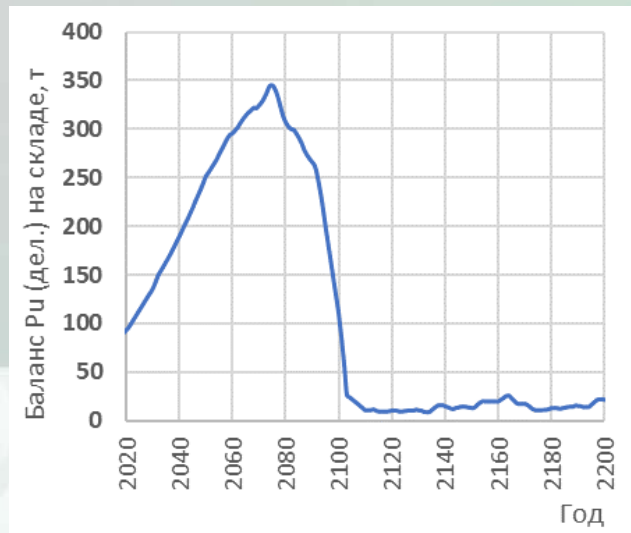


Рис. 4. Баланс делящихся изотопов плутония на складе, т (эволюционный сценарий)

Масштаб АЭ при реализации эволюционного сценария (см. рис. 3) не превысит 45 ГВт(эл.), так как при бóльшем масштабе АЭ в ОЯТ ВВЭР производится недостаточно плутония для поддержания мощности системы АЭ (рис. 4).

На рис. 4 также видно, что объём плутония на складе, извлекаемого из ОЯТ ВВЭР, сокращается в моменты ввода новых ВВЭР-СКД, так как плутоний используется для формирования стартовых загрузок этих реакторов. При полном замещении ВВЭР реакторами ВВЭР-СКД система АЭ выходит на самообеспечение делящимися нуклидами, при этом на складе практически отсутствует плутоний, так как коэффициент наработки (КН), определяемый как отношение масс выгружаемых и загружаемых делящихся нуклидов, в ВВЭР-СКД находится на уровне 1,01—1,04.

Таким образом, при поэтапном внедрении ВВЭР-СКД до уровня АЭ мощностью около 40—45 ГВт(эл.) данный вид реакторов будет топливообеспечен на длительное время при условии, что весь плутоний из ОЯТ ВВЭР будет доступен и использован при производстве твэлов ВВЭР-СКД на заводах по переработке ОЯТ.

# Система АЭ на базе ВВЭР-СКД и Супер БР

*инновационный сценарий*

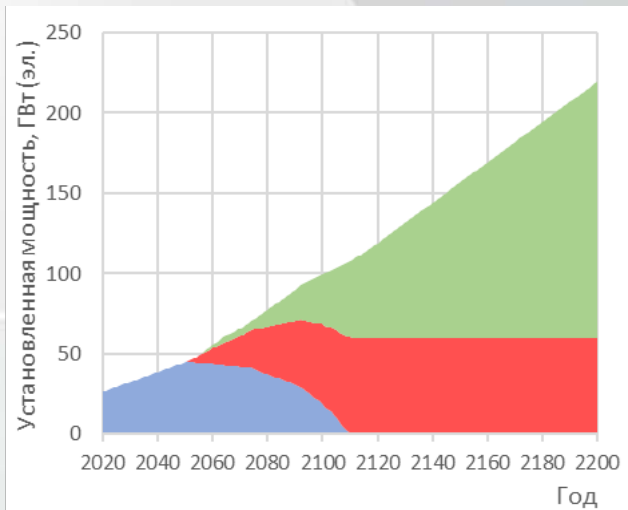


Рис. 5. Развитие системы АЭ на базе ВВЭР, ВВЭР-СКД и Супер БР: ■ — ВВЭР-ТОИ (UOX); ■ — Супер БР; ■ — ВВЭР-СКД (инновационный сценарий)

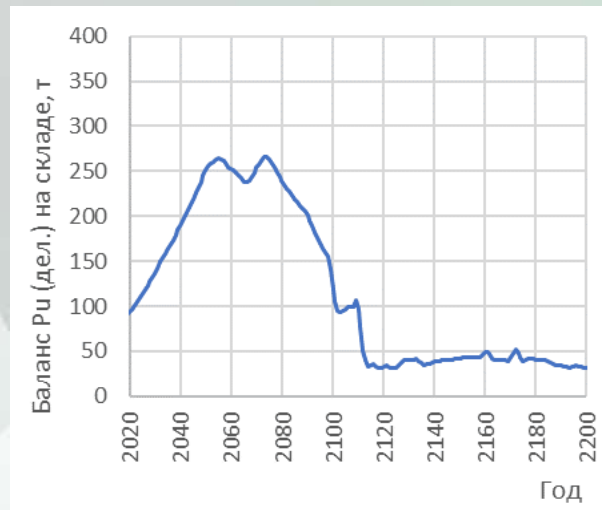


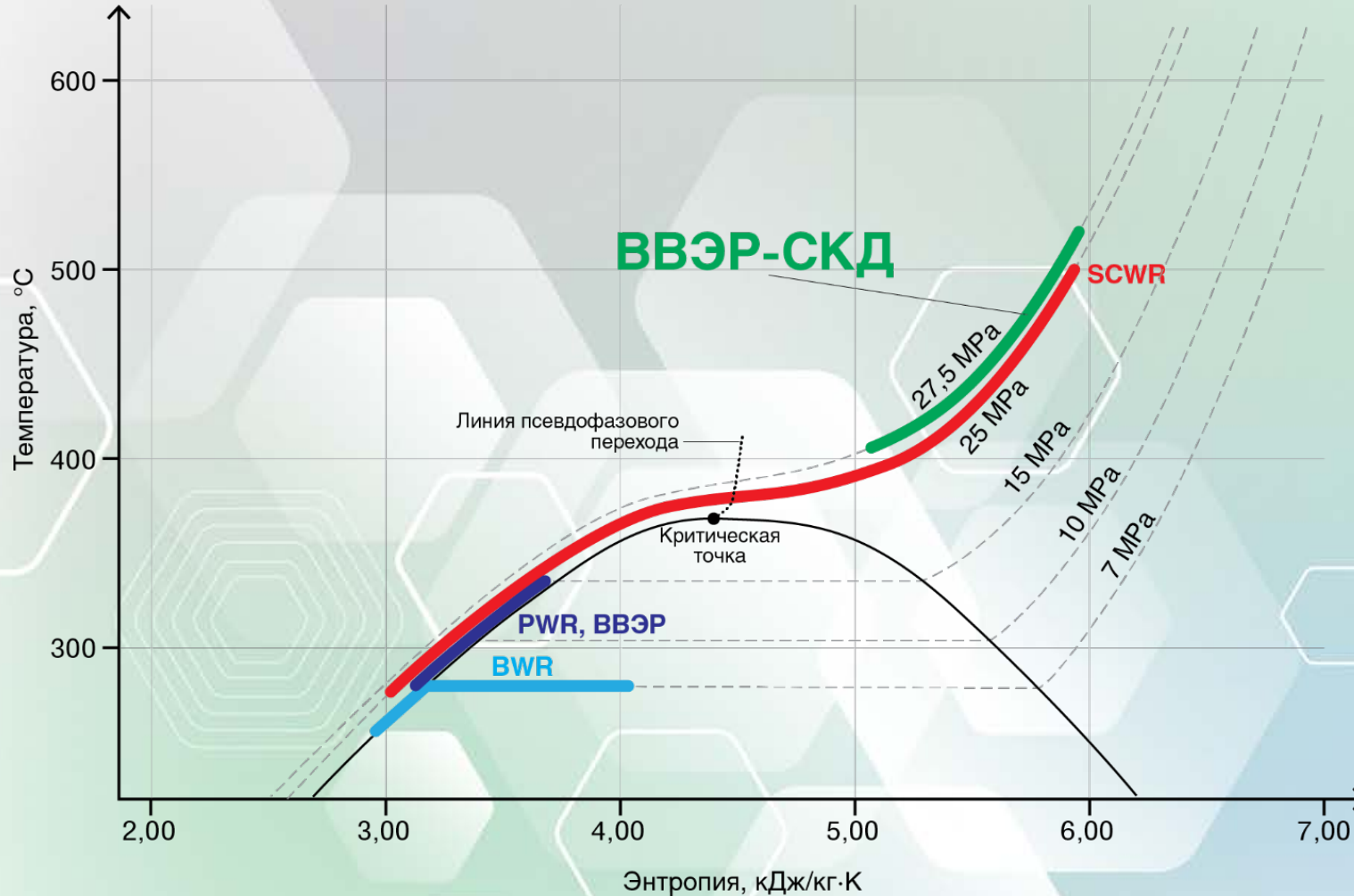
Рис. 6. Баланс делящихся изотопов на складе, (инновационный сценарий)

Для увеличения масштаба АЭ до 100 ГВт(эл.) и более необходимо введение в структуру АЭ, наряду с ВВЭР-СКД, перспективных реакторов-бридеров (далее — Супер БР) с избыточной наработкой нечётных изотопов плутония на уровне не менее 300 кг дел. Pu/год/ГВт(эл.) при стартовой загрузке по  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  не более 2—2,5 т/ГВт(эл.) и длительности внешнего ЯТЦ не более 3 лет.

Таким образом, можно сформулировать следующие ключевые системные требования к реакторам в системе АЭ, при которых её мощность может быть повышена до уровня 100 ГВт(эл.) и более с обеспечением воспроизводимой топливной базы на длительную перспективу:

- для энергетических реакторов ВВЭР-СКД: обеспечение  $K_N \geq 1,01$ — $1,04$  и мощности ЯЭУ на уровне 300—600 МВт(эл.) с возможностью маневрирования в диапазоне 100—75—100%;
- для реакторов-бридеров Супер-БР: обеспечение высокой удельной избыточной наработки нечётных изотопов плутония, пониженная удельная стартовая загрузка плутония и короткий внешний ЯТЦ.

# Параметры теплоносителя



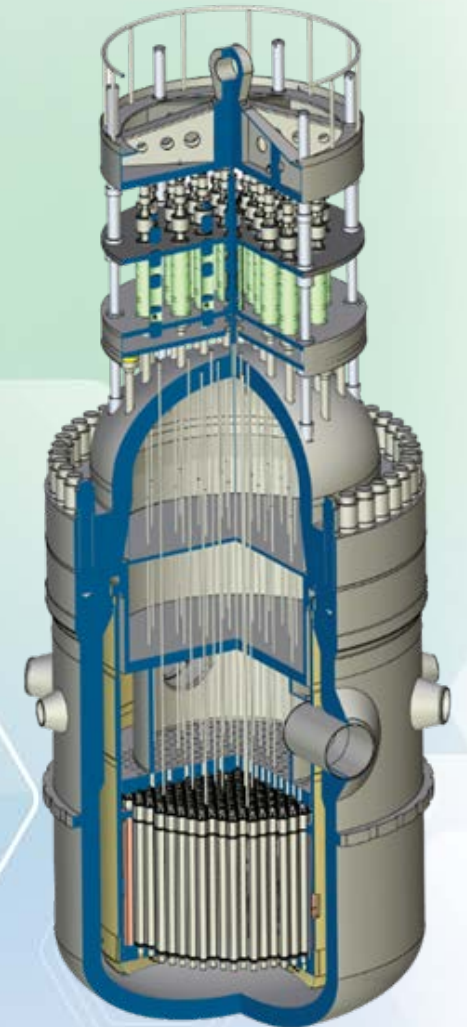
Параметры теплоносителя ВВЭР-СКД соответствуют области *псевдопара*, что позволяет наряду с тесной решеткой и уран-плутониевым топливом, обеспечить быстрый спектр нейтронов в активной зоне и высокий коэффициент воспроизводства делящихся нуклидов.

Отсутствие псевдофазового перехода теплоносителя в активной зоне и парогенераторе позволяет повысить нейтронно-теплогидравлическую устойчивость контура РУ.

Двухконтурная схема ЯЭУ позволяет обеспечить радиационную безопасность машзала на уровне Поколения 3+

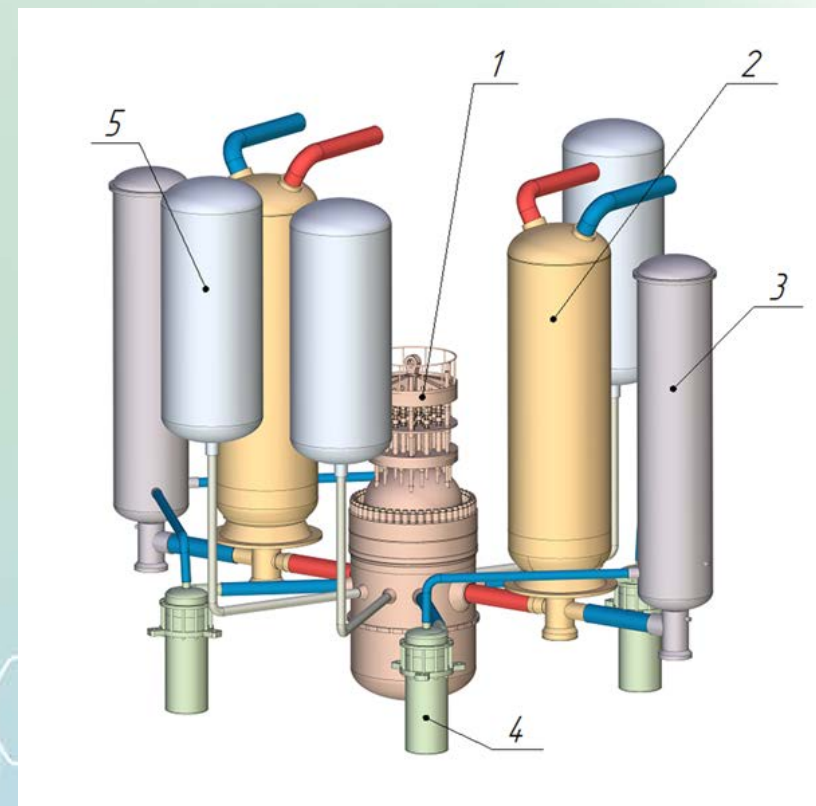
# Энергетический реактор ВВЭР-СКД

Основные характеристики	
Срок службы, лет	60
Тепловая мощность реактора, МВт	1250
Коэффициент воспроизводства	не менее 1,0
Топливный цикл	уран-плутониевый ЗЯТЦ
Рабочее давление теплоносителя, МПа	27,5
Плотность теплоносителя в реакторе, вход/выход, кг/м <sup>3</sup>	207/85
Температура теплоносителя в реакторе, вход / выход, °С	405/520
Среднее объемное энерговыделение в активной зоне, кВт/л	250
Средняя/максимальная линейная нагрузка твэла в активной зоне, кВт/м	210/350



# Реакторная установка ВВЭР-СКД

Основные характеристики	
Срок службы, лет	60
Тепловая мощность РУ, МВт	1250
Количество петель	2
Количество ГЦА на петлю	2
Теплоноситель	легководный псевдопар
Тип циркуляции теплоносителя	принудительная
Номинальный расход теплоносителя через реактор, кг/с	1740
Температура теплоносителя на входе/выходе парогенератора, °С	520/405
Давление рабочего тела ПТУ, МПа	27,5
Температура рабочего тела ПТУ на входе/выходе парогенератора, °С	320/500



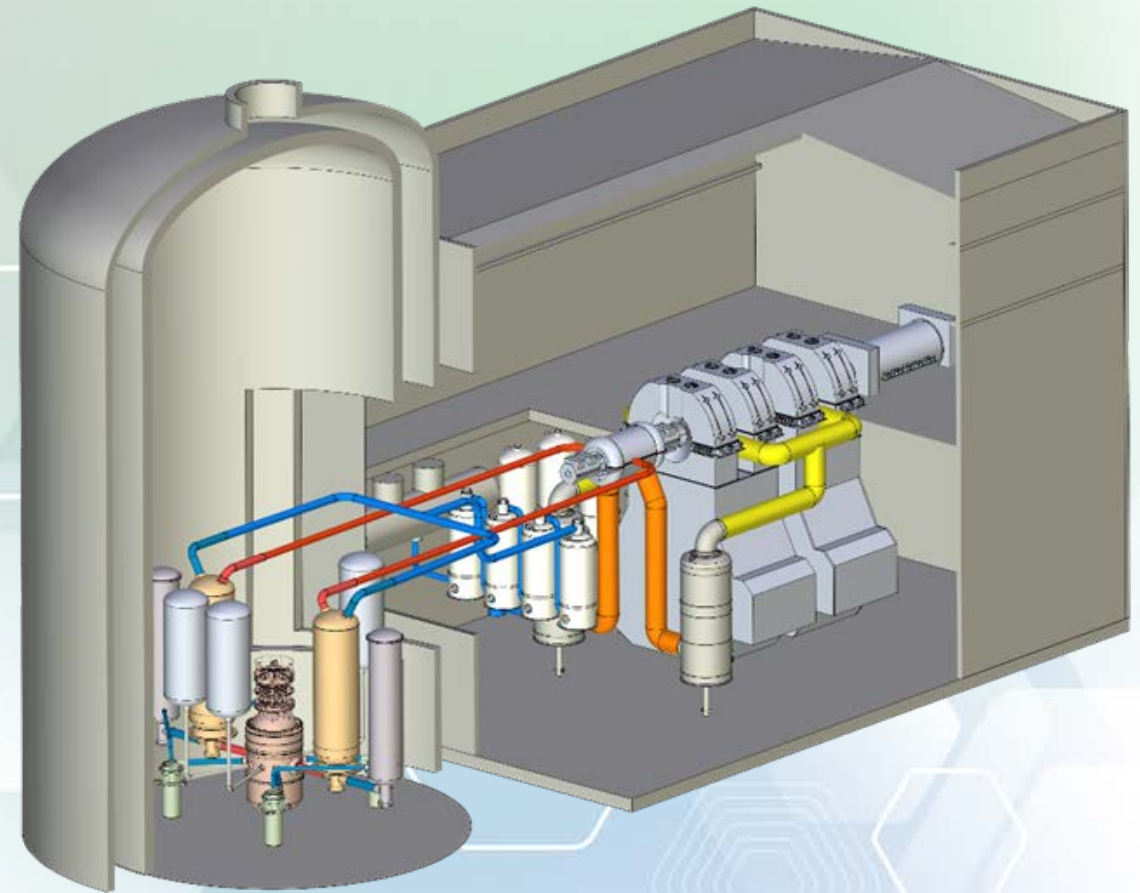
1- реактор; 2- парогенератор;  
3- буферная ёмкость;  
4- циркулятор; 5- ёмкость САОЗ



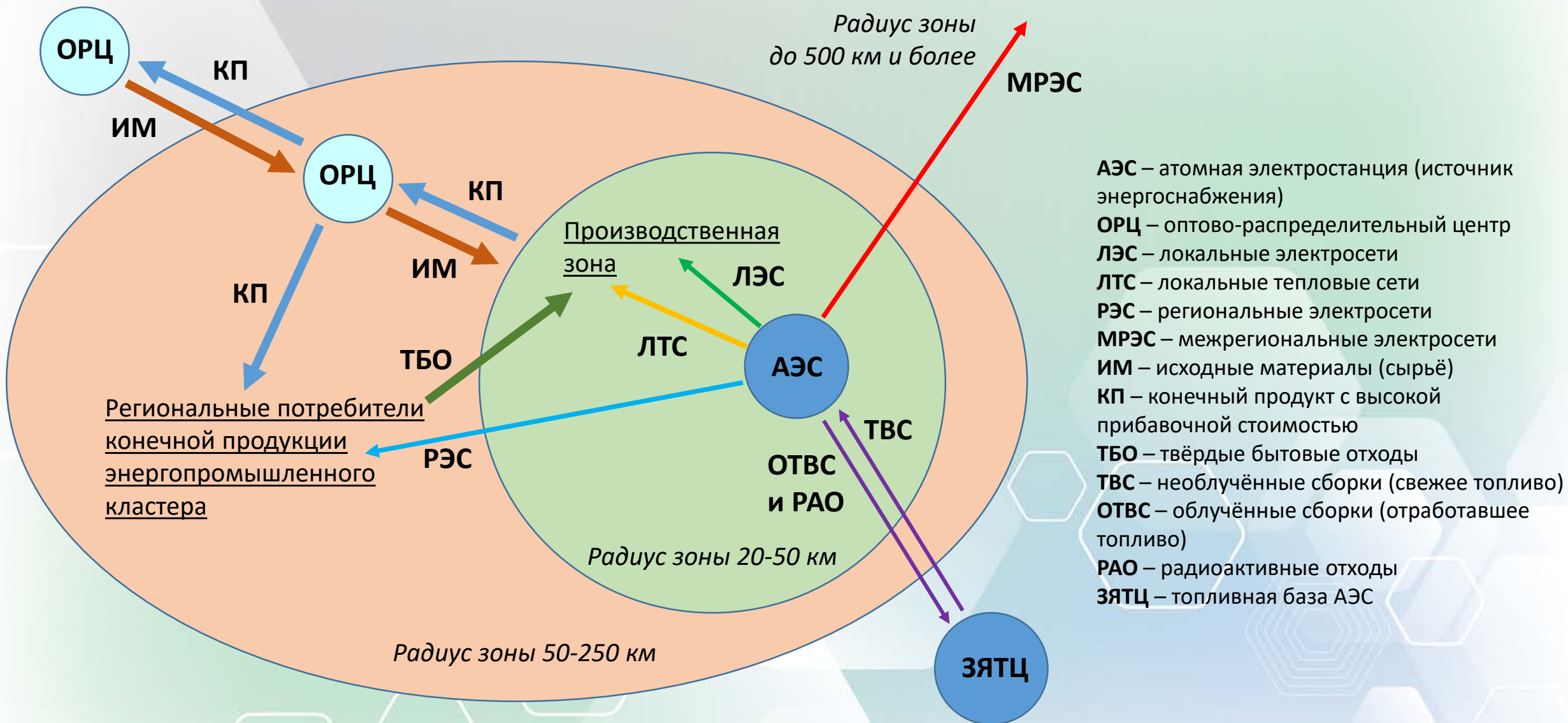
# Энергоблок АС с РУ ВВЭР-СКД

## Основные характеристики

Установленная электрическая мощность, МВт	580
Эффективность системы преобразования энергии (брутто/нетто), %	46,4/42,1
Эффективность ЯЭУ, %	40,5
Схема реакторной установки	двухпетлевая
Схема паротурбинной установки	1 ЦВСД + 2 ЦНД
Удельная стоимость, \$/кВт(э)	4000–4500
Срок сооружения, лет	4–4,5



# Концепция энергопромышленного кластера



# Атомная теплофикация на базе РУ ВВЭР-1200

Параметр	АЭС-ТФУ	АТЭЦ	АЭС-ТНС
Мощность реактора, МВт(т)	3200	3200	3200
Установленная электрическая мощность, МВт(э)	1198,7	1130	1198,7
Способ нагрева сетевой воды	паротурбинный	паротурбинный	теплонасосный
Тип турбины	конденсационная	теплофикационная	конденсационная
Теплофикационная мощность, МВт(т)	300*	1000**	2500***
Затраты мощности при теплофикации, МВт(э)	91	160	556
Удельные потери мощности при теплофикации, МВт(т)/МВт(э)	3,3	4,34****	4,5

\*Нерегулируемые отборы работоспособного пара из ЦНД ~100 МВт(т) и ЦВД ~ 200 МВт(т)

\*\*Регулируемые отборы работоспособного пара из ЦНД ~1000 МВт(т)

\*\*\*Нагрев сетевой воды в тепловом насосе на диоксиде углерода с электрическим приводом компрессора, утилизирующем сбросную теплоту энергоблока АЭС с РУ ВВЭР-1200

\*\*\*\*С учётом снижения установленной электрической мощности энергоблока АЭС с теплофикационной турбиной

# Потенциал агробιοοкомплекса на базе двухблочной АС с РУ ВВЭР-СКД\*

Параметр	Помидоры	Огурцы	Салат	Микро-водоросли
Занимаемая площадь, га	120	120	120	40
Годовая урожайность, кг/м <sup>2</sup>	80	150	150	3,25 (сухой вес)
Годовой сбор, тыс. тонн	96	180	180	1,3 (сухой вес)
Среднегодовая цена реализации продукции, руб./кг	110	150	500	2000
Годовая выручка, млрд. руб.	10,56	27	90	2,6
Суммарная годовая выручка, млрд. руб. (цены 2023 года)	<b>130,16</b>			

\*Теплофикационная мощность двухблочной АС с РУ ВВЭР-СКД на базе технологии АЭС-ТНС составит около 1,2 ГВт(т)

# Дорожная карта направления ВВЭР-СКД

## МТИР-СКД

### Проект ЕОТП-МТ-234

Разработка программы реакторных облучений, ДРИ и ПРИ образцов оболочечных КМ и опытных твэлов. Моделирование ОУ и АУ-СКД с опытными твэлами

2019

### Подпрограмма НИОКР на 2023-2033 годы в обоснование проектирования МТИР-СКД

Реализация проектов ЕОТП ГК «Росатом»: «Разработка технологий МТИР-СКД», «СКД-твэл», «СКД-теплотехника» и «СКД-нейтроника». Валидация расчетных кодов ЯЭУ МТИР-СКД. Обоснованные нормативные документы для проектирования многофункционального исследовательского комплекса на базе МТИР-СКД. Рекомендации по проектированию МТИР-СКД.

2023

### Проектирование, сооружение и ввод в эксплуатацию МТИР-СКД

Проектирование многофункционального исследовательского комплекса на базе МТИР-СКД

2033

Подготовка площадки, сооружение зданий, монтаж и пуско-наладка оборудования. Ввод МТИР-СКД в опытную эксплуатацию.

2036

### Тестовая стадия эксплуатации МТИР-СКД

Отработка технологии ВХР на МКУ, достижение проектных значений коэффициентов реактивности, требуемых запасов реактивности на ОР СУЗ. Поэтапное освоение мощности МТИР-СКД.

2040

### Исследовательская стадия эксплуатации МТИР-СКД

Реакторные облучения перспективных ТВС, оболочечных ККМ в составе ОТ и ГНО в среде легководного СКД-теплоносителя.  
Теплотехнические испытания масштабных моделей перспективных теплообменных аппаратов ЯЭУ ВВЭР-СКД.  
Разработка и согласование мероприятий по выводу МТИР-СКД из эксплуатации.  
Вывод МТИР-СКД из эксплуатации.

2043

2045

2050

2070

## ВВЭР-СКД

### Подпрограмма НИОКР на 2019-2028 годы по технологиям ВВЭР-СКД

Разработка концепции, конструкторской, технологической и проектной документации нереакторной петли ВВЭР-СКД

Проведение исследований нереакторной петли ВВЭР-СКД и обобщение результатов. Выбор базового варианта ЯЭУ ВВЭР-СКД.

### Подпрограмма НИОКР на 2029-2040 годы в поддержку развития технологий ВВЭР-СКД

Валидация расчетных кодов ВВЭР-СКД. Обоснованные нормативные документы для проектирования пилотного энергоблока АС с РУ ВВЭР-СКД.

Рекомендации по проектированию реактора, РУ и ЯЭУ ВВЭР-СКД.  
Разработка концепции перспективной РУ ВВЭР-СКД с высокотемпературным теплоносителем.

Разработка концепции перспективной высокоманевренной ЯЭУ ВВЭР-СКД.

### Проектирование, сооружение и ввод в эксплуатацию пилотного ЭБ

Проектирование пилотного энергоблока АС с РУ ВВЭР-СКД

Подготовка площадки, сооружение зданий, монтаж и пуско-наладка оборудования. Ввод пилотного энергоблока с РУ ВВЭР-СКД в опытно-промышленную эксплуатацию.

### Эксплуатация пилотного энергоблока с последующим сооружением серии энергоблоков АС с РУ ВВЭР-СКД

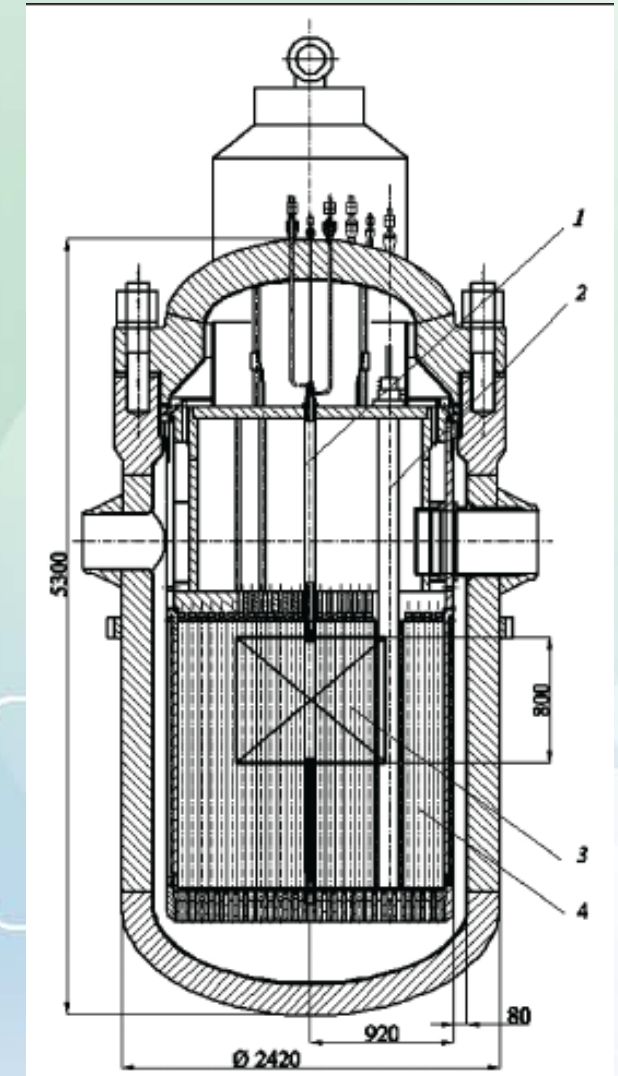
Проектирование, сооружение и ввод в эксплуатацию второго энергоблока АС с РУ ВВЭР-СКД

Проектирование, сооружение серии энергоблоков АС с РУ ВВЭР-СКД в России и за рубежом

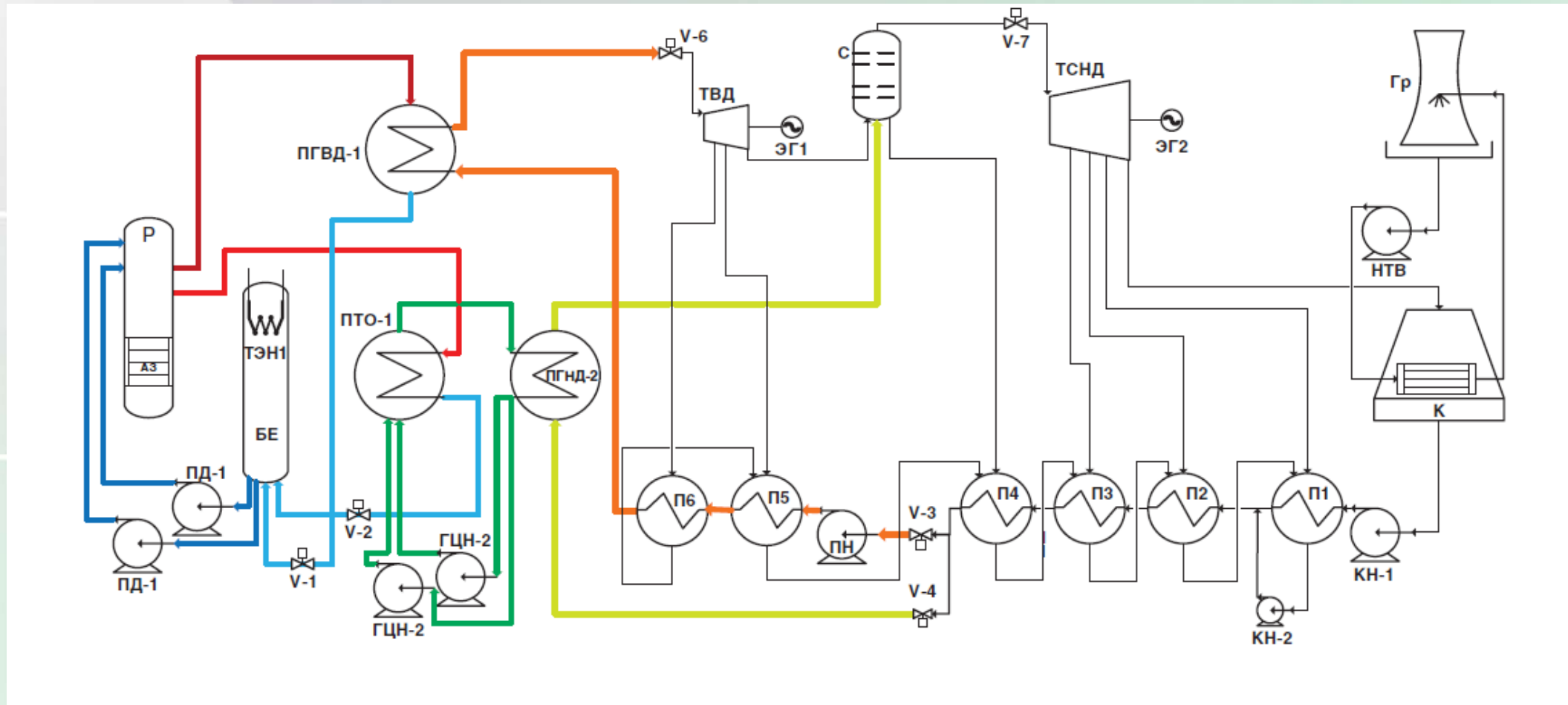
# Многоцелевой реактор МТИР-СКД

Основные характеристики МТИР-СКД	
Проектный ресурс, лет	30
Тип топлива	UO <sub>2</sub> , МОКС
Количество автономных петель, шт.	2
Рабочее давление теплоносителя, МПа	28,0
Температура теплоносителя в реакторе, вход / выход, °С	410/457
Среднее объемное энерговыделение в активной зоне, кВт/л	210

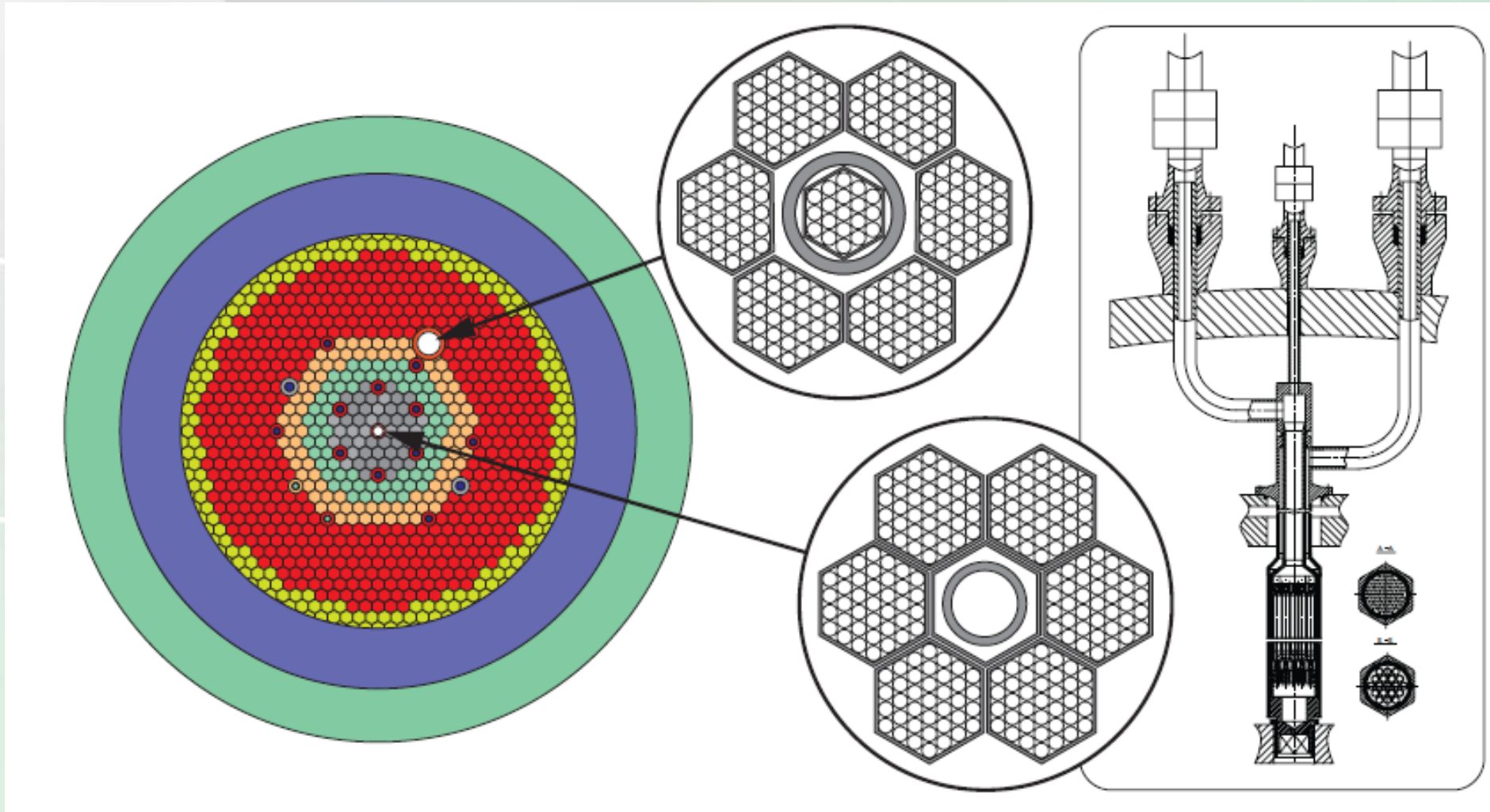
- 1- центральное облучательное устройство;  
2- периферийное облучательное устройство;  
3- активная зона; 4- боковая зона воспроизводства



# Тестовый реактор МТИР-СКД



# Исследовательский реактор МТИР-СКД





# Заключение

- реализация направления ВВЭР-СКД является инновационным этапом развития легководного направления энергетических реакторов и системы АЭ в целом;
- ВВЭР-СКД с  $KН \geq 1,01$ — $1,04$  позволяют в течение длительного периода времени поддерживать мощность АЭ на уровне до **45 ГВт(эл.)** за счёт использования нейтронного потенциала легководных реакторов;
- ВВЭР-СКД позволяют обеспечить мощность АЭ до **100 ГВт(эл.)** и более и поддерживать её в течение длительного периода времени при совместной работе в системе АЭ с реакторами-бридерами, обеспечивающими высокий темп избыточной наработки нечётных изотопов плутония в замкнутом ядерном топливном цикле (ЗЯТЦ);
- энергоблоки АС с РУ ВВЭР-СКД обладают высокими технико-экономическими показателями и базируются на апробированной технологии легководных энергетических реакторов и отечественном энергомашиностроении;
- построение энергопромышленных кластеров на базе АС с РУ ВВЭР-СКД позволит существенно повысить эффективность использования энергоресурсов, производимых атомным энергоисточником;
- агробиокомплексы закрытого грунта, наряду с промышленными предприятиями в районе размещения АС, являются перспективными платёжеспособными потребителями энергоресурсов от АС;
- для обоснования основ проектирования ВВЭР-СКД необходимо создание и отработка МТИР-СКД, в рамках комплексной программы по направлению ВВЭР-СКД на 2023-2028гг. и на период до 2040 года.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ»

# Спасибо за внимание!

*Пустовалов Станислав Борисович*

Электронная почта: [Pustovalov\\_SB@nrcki.ru](mailto:Pustovalov_SB@nrcki.ru)

Телефон: +7 (499) 196 7016

