

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОБЛОКА С РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ ВБЭР-600 ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Арефьев А.Е., Кураченков А.В.
(ОАО «ОКБМ Африкантов»), Яшкин А.В. (ОАО «НИАЭП»), Семченков Ю.М.
(НИЦ «Курчатовский институт»)

Первый заместитель директора – генерального конструктора,
доктор технических наук, профессор
Петрунин Виталий Владимирович

Потенциальный рынок потребителей атомных станций малой и средней мощности (АС МСМ)

Объем рынка АС МСМ

С учетом критериев
«востребованность +
реализуемость до 2030 года»

35 ГВт(э)
(60÷350 блоков)

Исследования Bain & Company по запросу ГК «Росатом», 2011 г.

Объем рынка АС СМ

С учетом анализа потребностей до 2040 года стран: СНГ, Европы, Азии, Африки, Ближнего Востока, Латинской Америки

24 ГВт(э)
(40÷240 блоков)

Доклад ГК «Росатом» «Оценка потенциального рынка АЭС средней мощности ГК «Росатом» до 2040 г.», 2013 г. (АС СМ > 100 МВт)

Объем рынка опреснения воды

С учетом критерия
«дефицит пресной воды к 2050 году»
(min 261 млрд. м³/год)
норматив 1,2 МВт на 1 млн.м³год

217 ГВт(э)
(> 360 блоков)

Доклад «Системный подход к обоснованию необходимости широкомасштабного развития АС ММ на принципах «Стратегии национальной безопасности РФ», НИЦ «Курчатовский институт», 2011 г.

**Потенциальный рынок потребителей есть.
Готового продукта нет, нужен Заказчик.
Кто будет лидером на этом рынке?**



КНР

В составе АЭС «Циньшань» (пров. Чжэцзян) используются блоки CNP-600 китайской разработки с мощностью до 650 МВт и блоки CANDU-600 (разработчик - Канада)
Проект CNP-300 (Циньшань - 1) реализован в Пакистан
Ведутся разработки проекта АСР-600

Аргентина

Проектируется АС CAREM (Nэ= 150 – 300 МВт)

Индия

Ведется разработка АС СМ АНWR (Nэ= 304 МВт)
Заканчивается строительство PFBR-500 (Nэ= 500 МВт)
Ведется строительство FBR (Nэ= 500 МВт)

Япония

ABWR (GE-Hitachi III+) мощность 600-900 МВт(э) проходят этап сертификации
Проектируется АС IMR (Nэ= 350 МВт)

Корея

В 2012 году национальная Комиссия по ядерной безопасности утвердила стандартную конструкцию модульного реактора SMART (Nт= 330 МВт)

США

Проектируются РМСМ компании "Westinghouse" (Nэ= 225 МВт) и SMR-160 (Nэ= 160 МВт) компании «Holtec»
Компания «General Electric – Hitachi» ведет разработку PRISM (Nэ= 311 МВт)

Франция

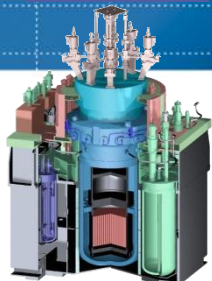
Компания DCNS проектирует модульную установку Flexblue (Nэ= 160 МВт) подводного исполнения

Канада

CANDU 6 (700 МВт(эл.))
Технология была лицензирована в Канаде, Аргентине и Южной Корее.
На сегодняшний день в мире эксплуатируются 11 энергоблоков CANDU 6, в т.ч. в Румынии, Корее и Китае

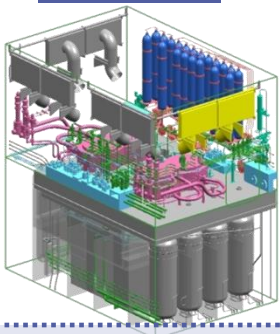
Проекты АС МСМ	Технология	N, МВт (эл)	Конфигурация АС МСМ	Состояние проекта	Лицензирование/Дата окончания или подачи заявки	Целевая дата реализации проекта
CAREM, Аргентина	PWR	150-300	Одномодульная, наземная	Рабочий проект на стадии завершения	Идет лицензирование / Строится прототип мощностью 25МВт (э)	Прототип: конец 2016 г.
mPower, США	PWR	2x180	Многомодульная, наземная	Разработка рабочего проекта	Начато лицензирование проекта в Канаде. Подача заявки в NRC в 3 кв. 2014 г., получение объединенной лицензии к 2018 г.	Первые два ЭБ в 2022 г.
Holtec SMR-160, США	PWR	160	Многомодульная, подземная	Разработка рабочего проекта	Подача заявки на сертификацию проекта к концу 2016 г.	После 2018 г.
Westinghouse SMR, США	PWR	>225	Одно- или многомодульная, наземная	Разработка рабочего проекта	Подача заявки в NRC ожидается во втором квартале 2014 г.	2022 г.
АСР-100, Китай	PWR	100	От одного до восьми модулей, наземная	Рабочий проект завершен	Идет лицензирование/ Окончание к 2015 г./ Строительство с середины 2014г.	Первая к 2018 г.
НТР-РМ, Китай	ВТГР	2x105	Двухмодульная, наземная	Рабочий проект завершен	Лицензирован/Строится с декабря 2012	Первая в 2015 г.
SMART, Корея	PWR	90	Одномодульная, наземная	Разработка рабочего проекта	Лицензия получена в июле 2012 г.	Прототип к 2017 г.

АБВ



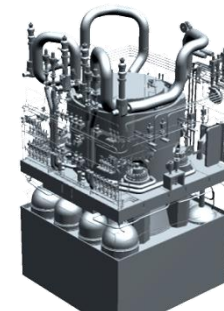
Тепловая мощность 16-45 МВт
Электрическая мощность 4-10 МВт
 Унифицированные РУ с реакторами интегрального типа и 100 % естественной циркуляцией первого контура для наземных и плавучих АС

КЛТ



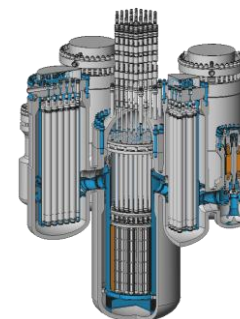
Тепловая мощность 150 МВт
Электрическая мощность 38,5 МВт
 Серийные блочные реакторы атомных ледоколов и судов морского флота, для плавучих и наземных АС

РИТМ



Тепловая мощность 175 МВт
Электрическая мощность до 50 МВт
 Реактор интегрального типа с принудительной циркуляцией для универсального атомного ледокола, плавучих и наземных АС

ВБЭР



Тепловая мощность 300-1700 МВт
Электрическая мощность 100-600 МВт
 Блочный реактор на базе судовых технологий для наземных и плавучих АС

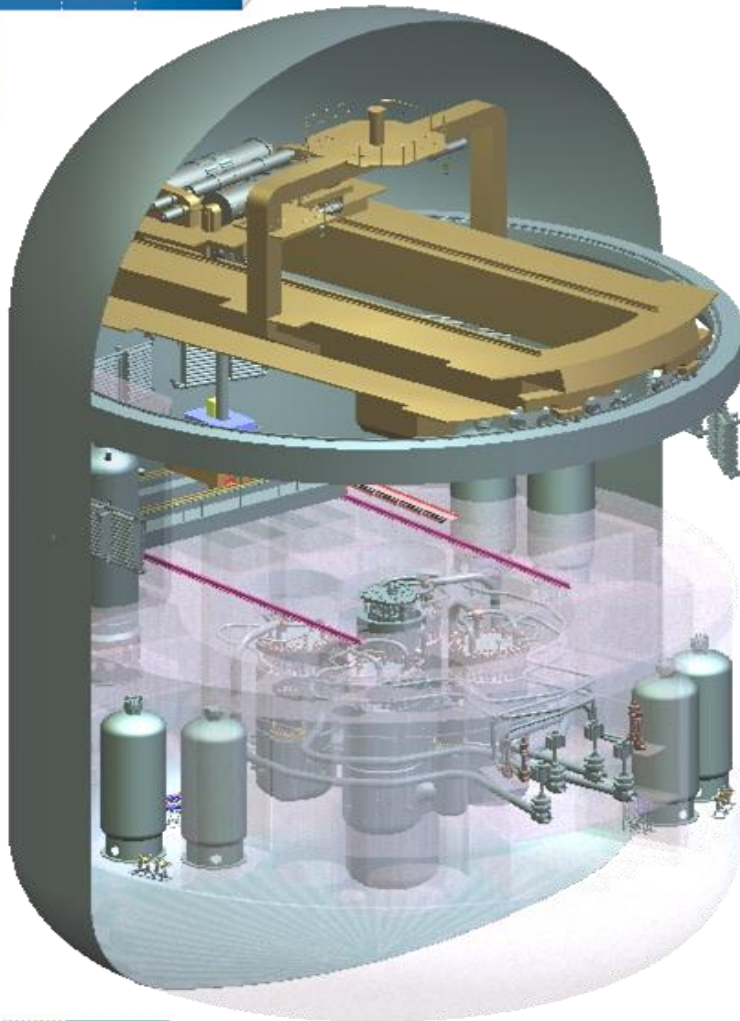
Проект	Интервал между перегрузкам и топлива, лет	Срок службы, лет	Стадия разработки
Типа АБВ	10-12	50	<ul style="list-style-type: none"> - Разработан ТП прототипной РУ и ПАТЭС «Волнолом» (1993 г.); - Разработаны ТЭИ строительства ПАТЭС с РУ АБВ-6М для Крайнего Севера (п. Тикси, п. Усть-Камчатск, 2006 г.) и АТЭС для Казахстана (г. Курчатов, 2007 г.); - Эксплуатируется наземный стенд-прототип со 100 % естественной циркуляцией (ФГУП «НИТИ»); - Разрабатывается техпроект транспортабельной РУ по контракту с Минпромторгом
Типа КЛТ	2,5-3	40*	В 2011 г. завершена комплектная поставка оборудования двух РУ для головной ПАТЭС «Академик Ломоносов»
Типа РИТМ	4,5-10	40*	Идет изготовление двух РУ для головного универсального ледокола (комплектная поставка - 2016 г.). Серийная поставка РУ для 2-х следующих а/л 2018г. и 2019г.
ТИПА ВБЭР	1,5 - 2	60	<ul style="list-style-type: none"> - ТКП двухблочной АС с РУ ВБЭР-300 (2002 г.) - Эскизный проект РУ, одобренный НТС№ 1 и ГАН (2004 г.) - ТЗ на проект АС и на технические проекты РУ, АСУ ТП и ТГУ, ТЭО-ОБИН для АС с РУ ВБЭР-300 в Мангистауской обл. Республики Казахстан (2007-2009гг.) - Проработка мощного ряда РУ ВБЭР мощностью 100...600 МВт (2007 – 2008 гг.) - НИОКР по в проекту АС на базе РУ ВБЭР-460/600 (2008-2011 гг.) - Разработка РУ ВБЭР-600/4 на основе петли теплообмена повышенной мощности (2011-2012 г.г.)

* - с возможностью продления до 60 лет

Целевые показатели создания энергоблока средней мощности с РУ ВБЭР-600

- Цель – инновационный энергоблок повышенной безопасности поколения 3⁺ (технико-экономические требования, сформулированные ОАО «Концерн «Росэнергоатом» к проекту двухблочной АЭС с энергоблоками средней мощности):

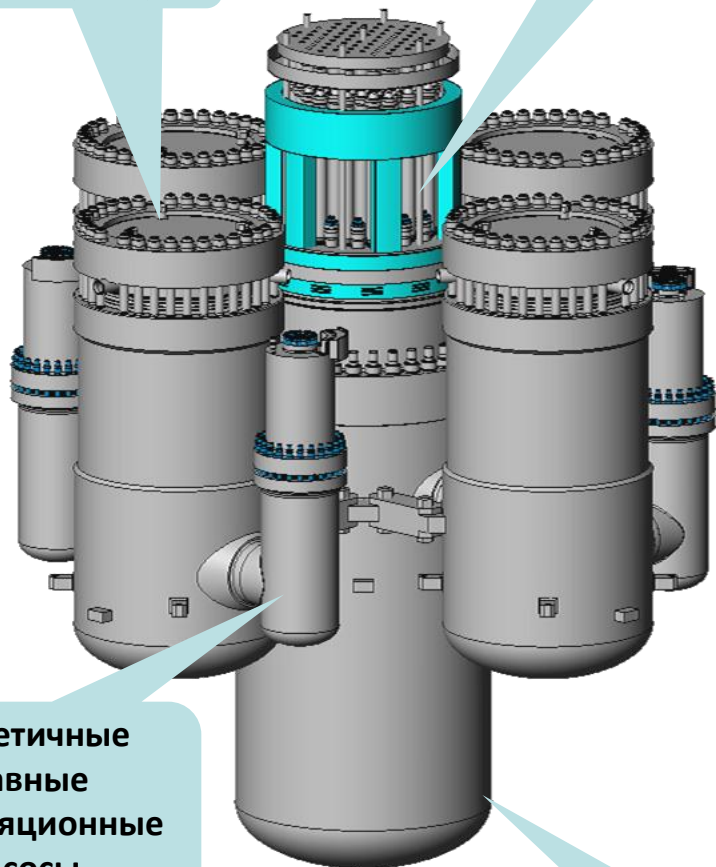
Электрическая мощность, МВт	не менее 600
Диапазон изменения мощности (маневренный режим), %	100-30-100
Срок службы, лет	60
Коэффициент готовности	0,93
Время обеспечения автономности при запроектной аварии, ч	72
Расчётный радиус зоны планирования защитных мероприятий, м	800
Удельные капиталовложения в строительство двухблочной АЭС с ВБЭР-600	Превышение не более, чем на 25% по сравнению с серийным блоком ВВЭР-ТОИ (по данным проекта)



- Максимальное использование проверенных технических решений на основе опыта судового реакторостроения и ВВЭР
- Апробированные эксплуатацией транспортных АЭУ технические решения (опыт создания 465 корабельных и судовых РУ блочной компоновки, общая наработка ~9500 реакторо-лет)
 - Компактная блочная компоновка реакторного блока
 - Основное оборудование, не требующее работы вспомогательных систем (парогенератор, ГЦН)
 - Герметичный 1 контура
 - Возможность максимальной автоматизации управления реактором (саморегулирование, прямоточный парогенератор)
- Технологии реакторов ВВЭР-1000
 - Активная зона на основе ТВСА и топливный цикл как в ВВЭР
 - Водно-химический режим
- Мощностей ряд РУ от 300 - 600 МВт(э) на основе петель теплообмена различной мощности

Прямоточный
парогенератор

Приводы СУЗ

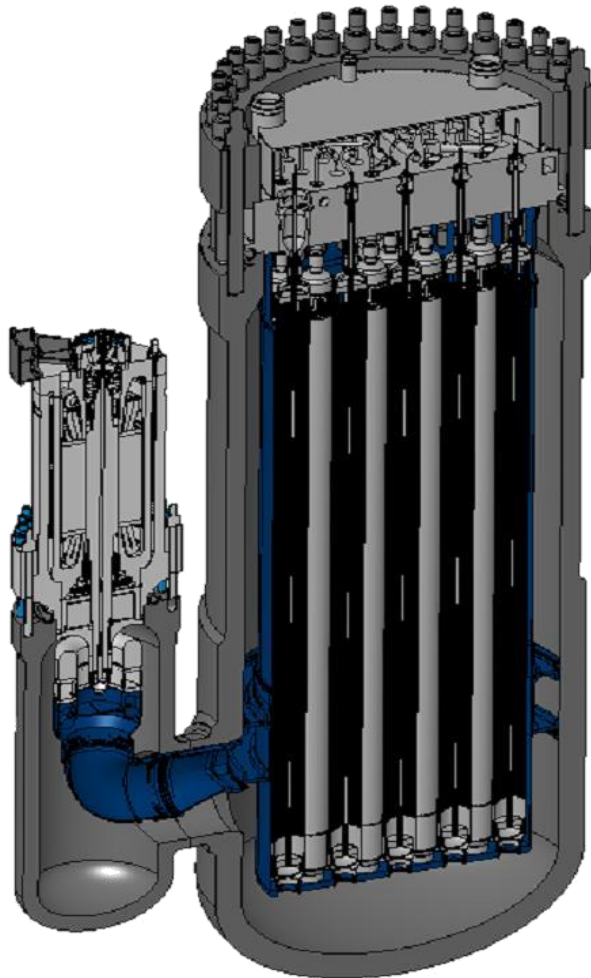


Герметичные
главные
циркуляционные
насосы

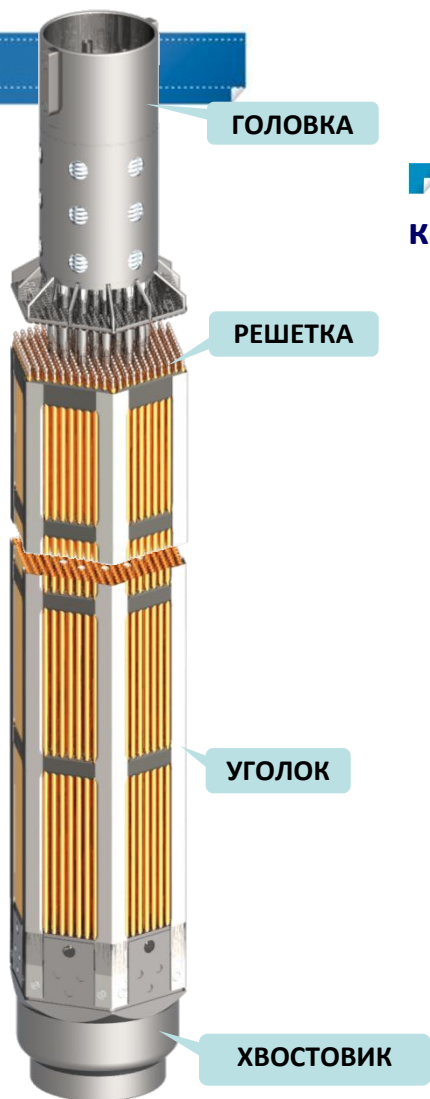
Реактор

- ▣ Водо-водяной реактор давления с принудительной циркуляцией и вынесенным паровым компенсатором давления
- ▣ Блочная компоновка с исключением главных циркуляционных трубопроводов и размещением оборудования в интегрированном корпусе
- ▣ Четырехпетлевое исполнение (реактор и приваренные к нему на коротких патрубках 4 двухкорпусных блока «парогенератор-ГЦН»)

Количество петель, шт.	4
Мощность тепловая, МВт	1662
Электрическая мощность при КПД = 37%, МВт	615
Число ТВС, шт	121
Давление рабочее 1 контура, МПа	16,3
Температура теплоносителя 1 контура °С	330/28
	4
Диаметр описанный, м	13,73
Высота, м	17,06
Масса реакторного блока (в сухом состоянии), т	2100

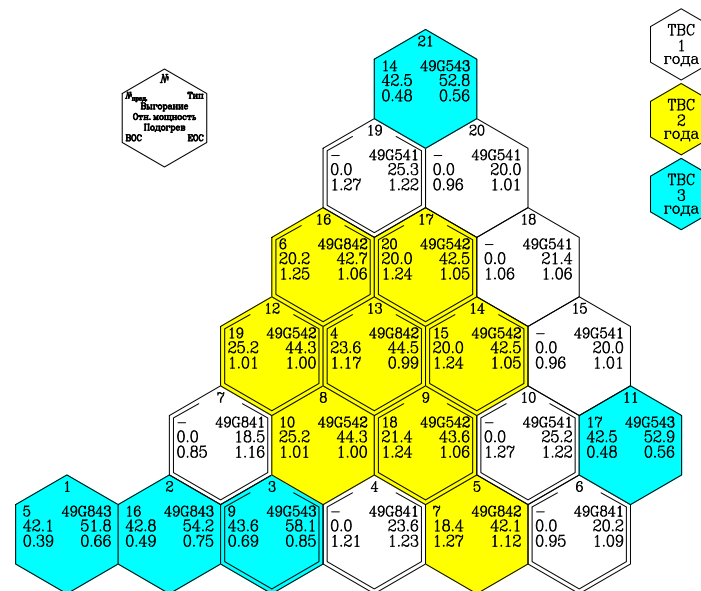


Мощность тепловая, МВт	415
Давление рабочее 1 контура, МПа	16,3
Давление пара, МПа	6,18
Температура пара/ питательной воды °С	310,4/216
Мощность насоса, кВт	1900
Подача, м ³ /ч	8112
Напор, м	47,8
Материал трубной системы ПГ	42ХНМ
Теплообменная трубка ПГ, мм	10x1,1
Теплообменная поверхность, м ²	4580
Масса, т	351



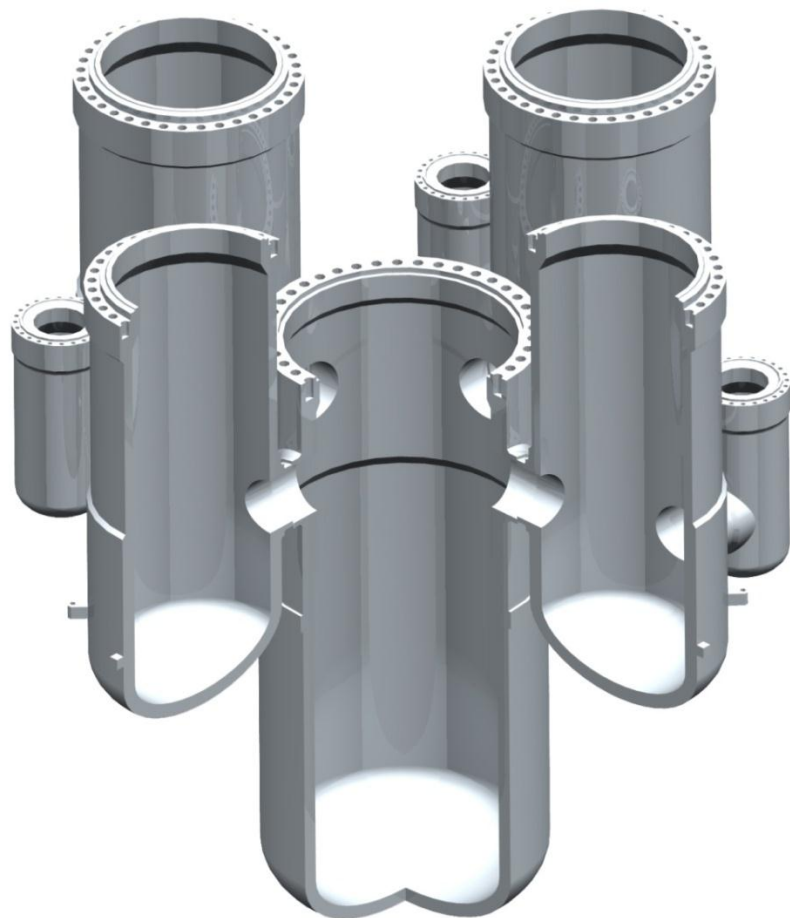
Использование бесчехловых ТВС каркасной конструкции типа ТВСА-Альфа:

- интенсификаторы теплообмена (перемешивающие решетки)
- антидебризные фильтры
- ТВЭЛы с максимальной ураноемкостью
- реализация режимов суточного и недельного маневрирования со снижением уровня мощности до 30%



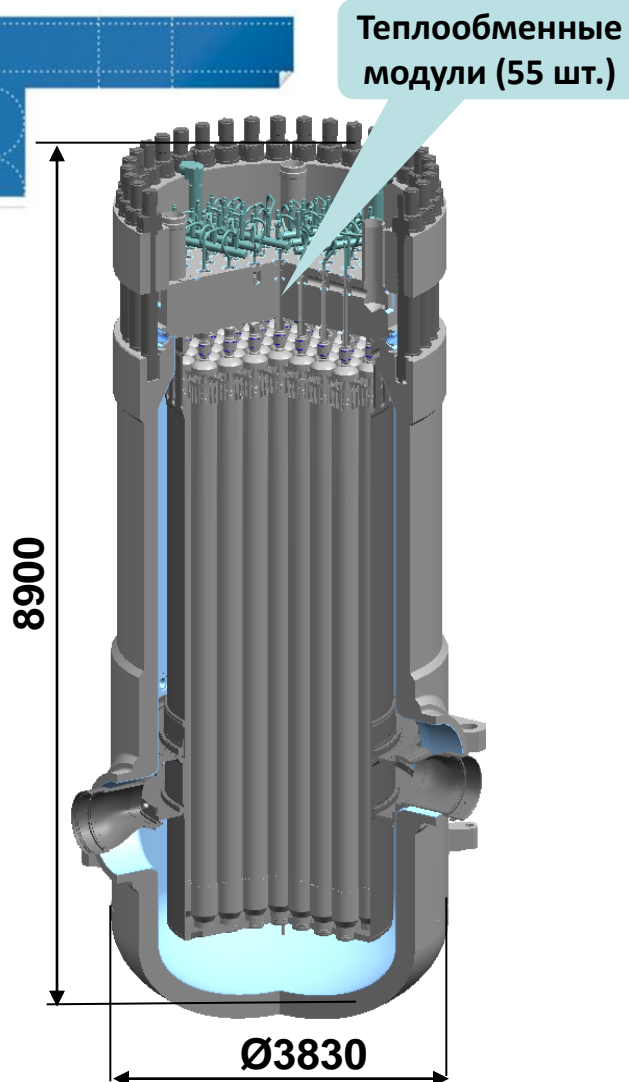
Картограмма загрузки активной зоны в стационарном режиме работы (3x2)

Количество ТВС в активной зоне, шт.	121
Высота активной зоны, мм	3530
Удельная энергонапряженность, кВт/л	90,0
Средняя линейная нагрузка ТВЭЛов, Вт/см	139,2
Максимальная глубина выгорания выгружаемого топлива по ТВС, МВт сут/кг урана, не менее	68
Количество ежегодно выгружаемых ТВС, шт.	
- цикл 3x2	42
- цикл 4x1,5 (в зависимости от условий работы)	30÷36



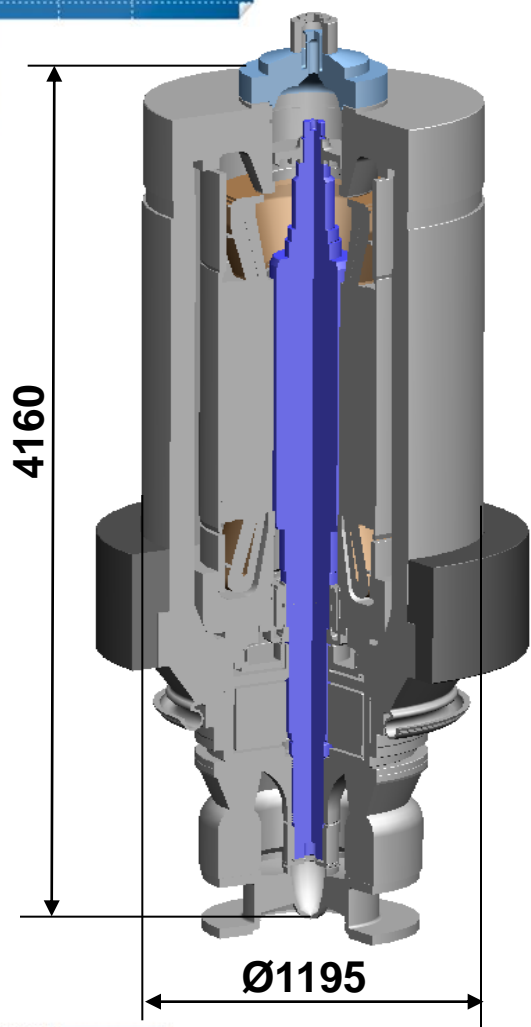
- Технология изготовления отдельных корпусов традиционна для основного оборудования АЭС. Габариты, сечения и требуемые механические свойства наиболее крупных корпусных обечаек находятся в рамках действующих технических условий ТУ 5.961-11060-2008
- Технология сварки и контроля качества главных патрубков как на заводе – изготовителе, так и на площадке АЭС рассмотрена и подтверждена материаловедческими организациями ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
- Интегрированный корпус гарантированно может быть изготовлен на отечественных заводах атомного машиностроения по сквозной заводской технологии (АО «Ижорские заводы»).

Материал	сталь 15Х2МФА-А	мод. А
Высота, м	12,25	
Описанный диаметр, м	13,73	



- Отсутствие системы продувки парогенератора:
 - снижение жидких радиоактивных отходов;
 - снижение мощности систем очистки и обращения с жидкими радиоактивными отходами
- Отсутствие системы очистки продувочной воды:
 - отсутствуют баки, холодильники, фильтры и насосы
- Корпус парогенератора работает при давлении первого контура:
 - исключение предохранительных клапанов для защиты корпуса парогенератора от превышения давления;
 - отсутствует выброс теплоносителя первого контура при локализации течи трубной системы
- Ремонт парогенератора без вскрытия первого контура:
 - снижение дозовых нагрузок при ремонте и обслуживании парогенератора

Паропроизводительность, т/ч	753
Температура питательной воды, °С	216
Давление пара за ПГ, МПа	6,18
Температура пара за ПГ, °С	310,4
Материал теплообменной трубки	42ХНМ
Теплообменная трубка	10x1,1
Масса трубной системы в сухом состоянии, кг	96500

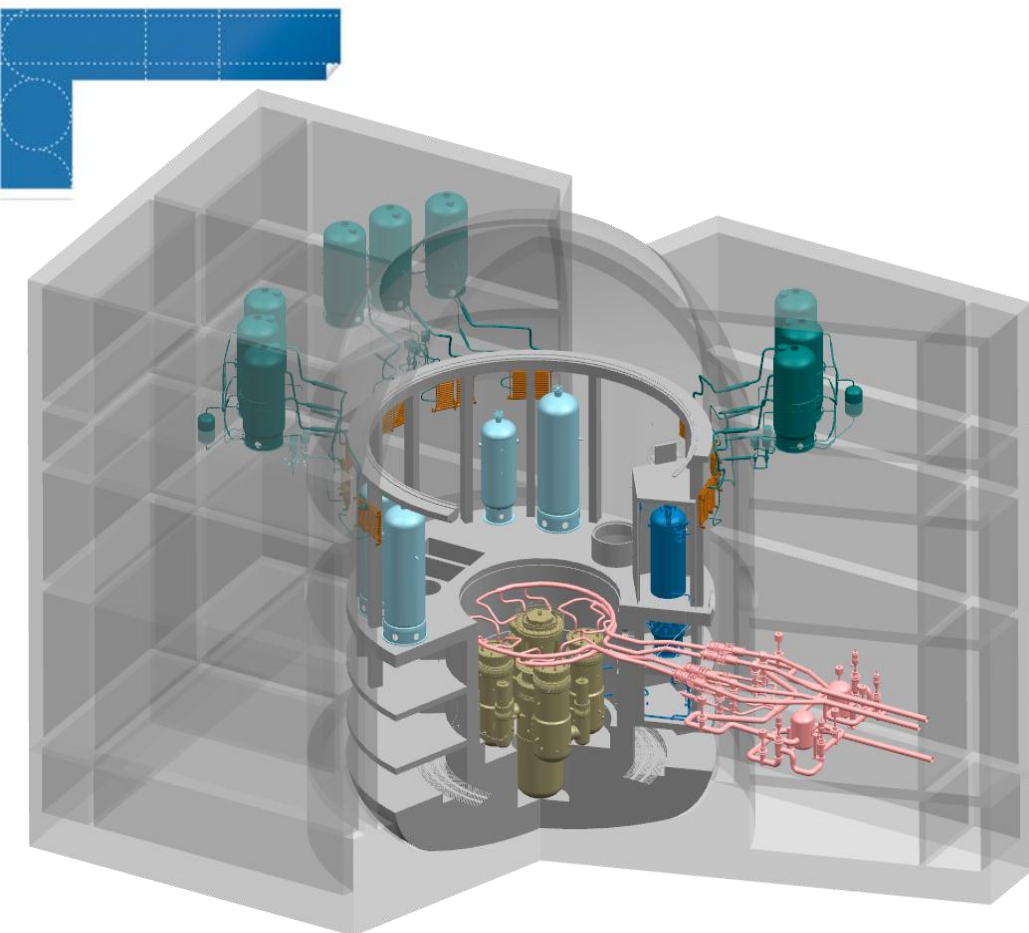


- **Отсутствие протечек теплоносителя первого контура:**
 - **снижение мощности систем очистки и обращения с жидкими радиоактивными отходами.**
 - **снижение жидких радиоактивных отходов;**
- **Отсутствие системы уплотняющей воды:**
 - **отсутствует вывод теплоносителя за границы защитной оболочки;**
 - **отсутствуют сброс давления, охлаждение, очистка и дегазация теплоносителя (отсутствует необходимость в работе систем газоудаления);**
 - **отсутствуют насосы высокого давления уплотняющей воды.**
- **Отсутствие системы смазки:**
 - **отсутствуют маслобаки, холодильники, фильтры и маслонасосы, при этом радикально решается проблема пожаробезопасности и упрощается система пожаротушения РО**
- **В настоящее время ОАО «ОКБМ Африкантов» и ЗАО «НПО ВЭИ Электроизоляция» выполняют разработку проекта электронасоса**

Подача, м ³ /ч	8112
Напор, м	47,8
Потребляемая мощность, кВт	1900
Масса, т (с гидрокамерой)	75,0

- Исключается борное регулирование водообменом между РУ и системой спецводочистки для планового изменения мощности в процессе кампании (реализуется электромеханической системой СУЗ). При этом для маневренного режима обеспечивается регулирование мощности в диапазоне 100- 30-100% *
- Герметичное исполнение первого контура (герметичная система очистки 1 контура по типу судовых и корабельных РУ, исключение борного регулирования, применение герметичных ГЦН и мембранных устройств перед ИПУ первого контура позволяют уменьшить потерю активного теплоносителя из первого контура по сравнению с ВБЭР-1000 до ~ 20 т/ч)
- Дозозатраты при обслуживании и ремонте оборудования РУ ВБЭР-600 за счет сокращения продолжительности и объема работ с открытым первым контуром в два – три раза меньше дозозатрат для РУ ВБЭР-1000 (~ 210 чел.-мЗв для РУ ВБЭР-600 и ~ 525 чел.-мЗв для РУ ВБЭР-1000)

* Для маневренного режима ВБЭР-ТОИ предусмотрен диапазон изменения мощности 100- 50-100% $N_{ном}$



Параметр	ВБЭР-600
Защитная оболочка: внутренняя наружная	Двойная: - металлическая - бетонная без преднапряжения
Внутренняя защитная оболочка: диаметр, м высота, м	36 45,9
Наружная защитная оболочка: диаметр наружный, м высота, м	42 48,9
Максимальное расчетное землетрясение, баллы по шкале MSK-64: -базовое значение -для конструкций выполняющих функции безопасности	8(0,25g) 9(0,41g)
Падение самолета (проектное событие), т	20

Параметры внутренней защитной оболочки энергоблоков ВВЭР-1000
Куданкуламской АЭС:

- диаметр - 44 м
- высота - 65,9 м

Отличие характеристик безопасности ВБЭР в авариях с потерей теплоносителя от ВВЭР

РУ ВБЭР-600	ВВЭР-1000
<p>Ограничение максимальной величины возможной разгерметизации 1 контура величиной DN 130 мм (реализуется в постулируемой аварии разрыва главного патрубка реакторного блока с учетом работы страховочных ограничительных устройств)</p>	<p>Максимальный масштаб разгерметизации имеет место при разрыве ГЦТ полным сечением DN 850 мм с учетом двухстороннего истечения</p>
<p>Наличие страховочных ограничительных устройств (стяжек) приводит при снижении давления 1 контура к уменьшению размера течи – сечение разрыва уменьшается до 7 % от максимального значения</p>	<p>Масштаб разгерметизации в процессе аварии сохраняется</p>
<p>Отсутствует осушение активной зоны и перегрев оболочек твэлов</p>	<p>Имеет место частичное осушение твэлов. Происходит окисление оболочек и образование водорода вследствие пароциркониевой реакции</p>
<p>Отсутствует разгерметизация оболочек твэлов</p>	<p>Постулируется разгерметизация наиболее энергонапряженных твэлов –до 10% твэлов активной зоны</p>
<p>Радиационные последствия аварии обусловлены выходом активности, содержащейся в теплоносителе 1 контура</p>	<p>Радиационные последствия аварии обусловлены как выходом активности, содержащейся в теплоносителе 1 контура, так и выходом активности из-под оболочек твэлов и превышают последствия аварии для РУ ВБЭР-600 на два-три порядка</p>

Характеристика радиационного воздействия АЭС с ВБЭР-600 на население

НАИМЕНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	ЦЕЛЕВОЕ ЗНАЧЕНИЕ
1. Размер санитарно-защитной зоны	совпадает с границей площадки АЭС
2. Расчётный радиус зоны планирования защитных мероприятий населения	
- при достижении уровня А прогнозируемой дозы облучения на ранней и поздней стадиях	2 км
- при достижении уровня Б прогнозируемой дозы облучения за первые 10 суток	800 м
3. Расчётный радиус зоны планирования мероприятий по обязательной эвакуации населения	зона отсутствует
<i>Для справки:</i>	
- степень герметичности защитной оболочки, % объёма/сут.	0,2 (за счет применения внутренней металлической ЗО)
- Уровень А (по НРБ-99-2009)	нет необходимости в выполнении мер защиты, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.
- Уровень Б (по НРБ-99-2009)	необходимо выполнение соответствующих мер защиты, если они связаны с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

Модульная конструкция РУ приспособлена для сооружения главного корпуса методом «открытого верха» в сочетании с крупноблочным монтажом



Монтаж интегрированного корпуса:
корпус реактора с приваренными двухкорпусными блоками «парогенератор-гидрокамера ГЦН»

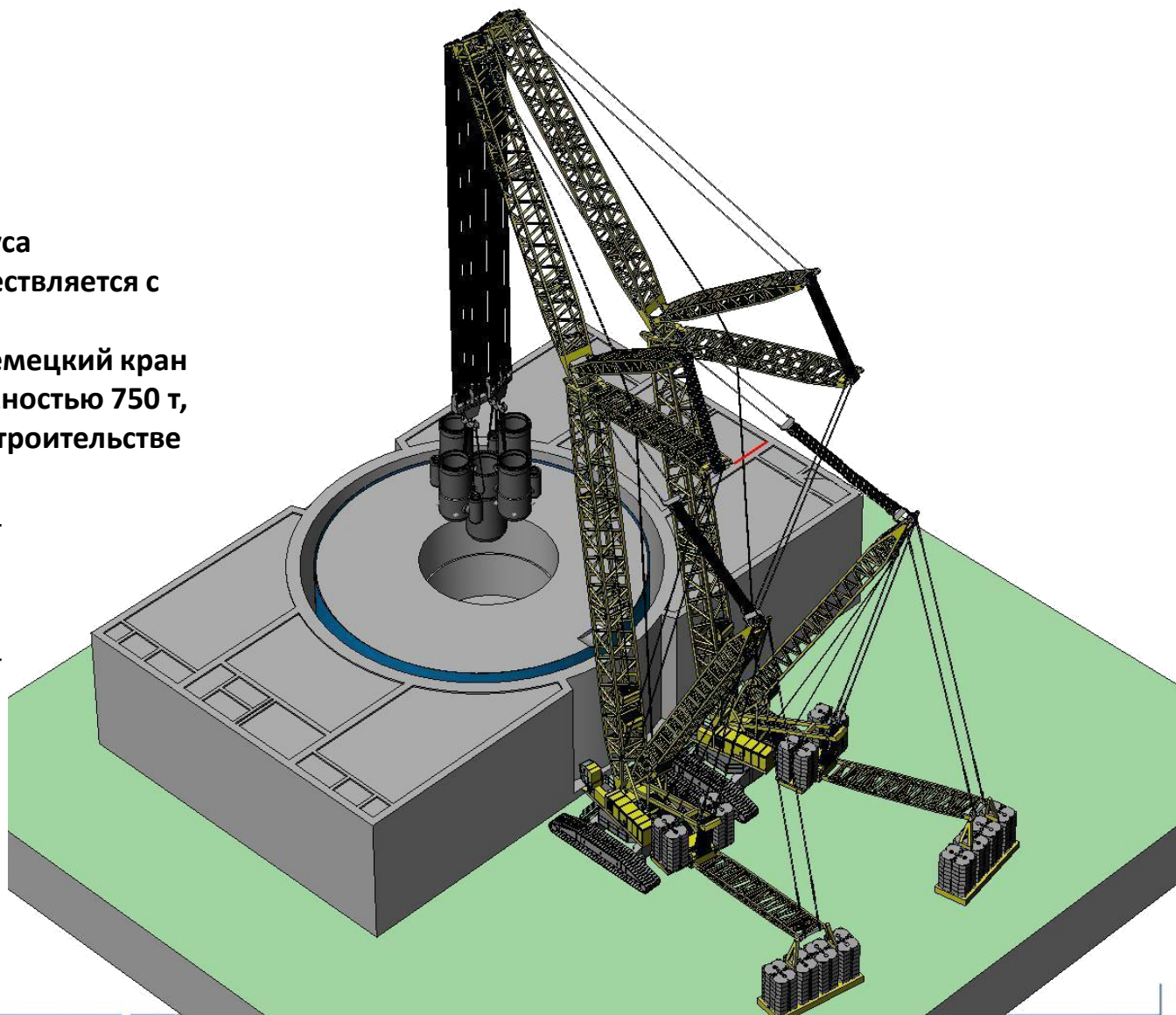
Сокращение сроков сооружения

Модульное исполнение:
систем очистки и расхолаживания 1 контура, системы аварийного отвода тепла, системы снижения давления в герметичном ограждении (защитной оболочке)

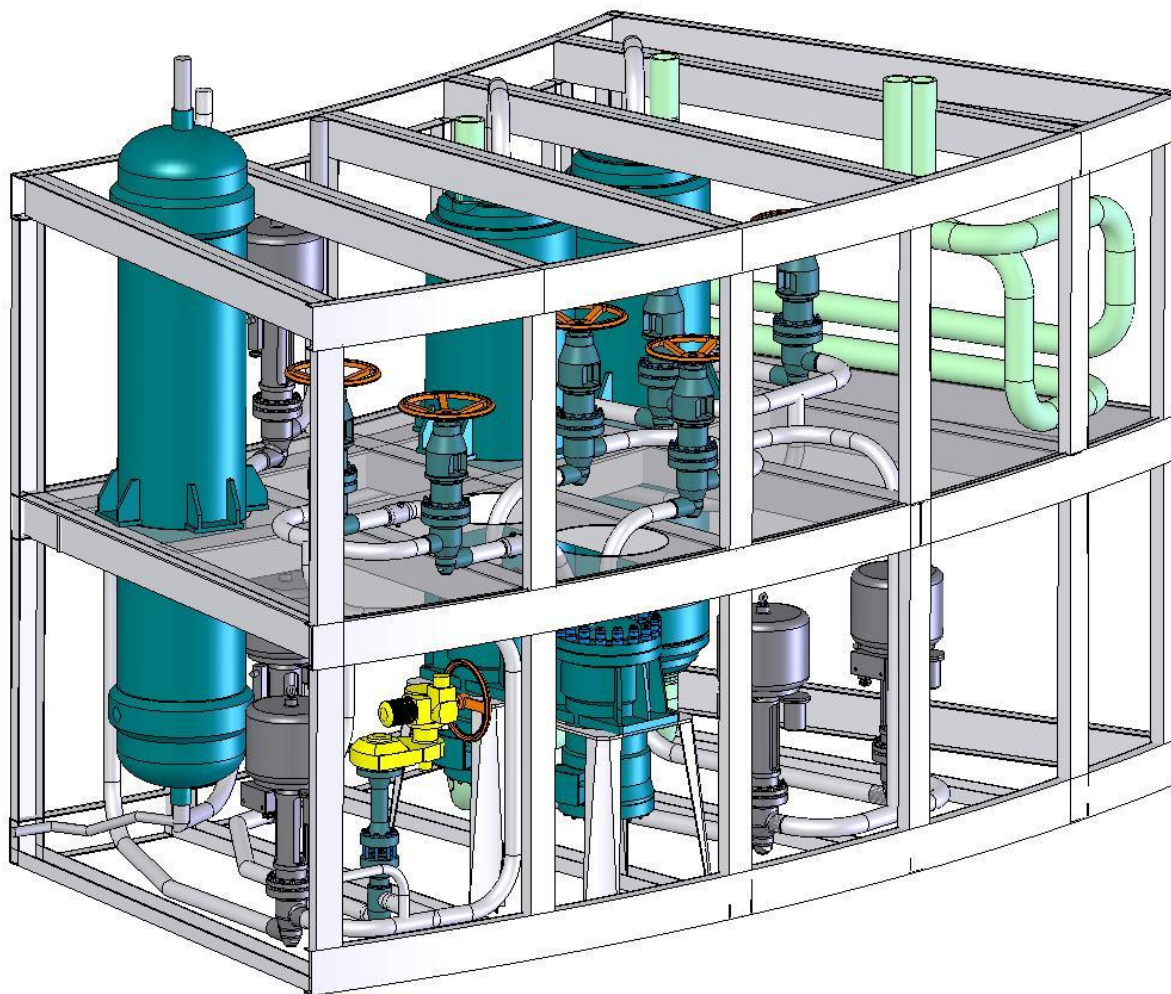
Модульное исполнение:
бассейна выдержки, конструкций шахт реактора, опорного пояса и элементов защитной оболочки

Монтаж интегрированного корпуса реакторного блока в шахту осуществляется с помощью двух кранов, большой грузоподъемности (например, немецкий кран «DEMAG CC 2800-1» грузоподъемностью 750 т, аналогично используемым при строительстве АЭС БН-800)

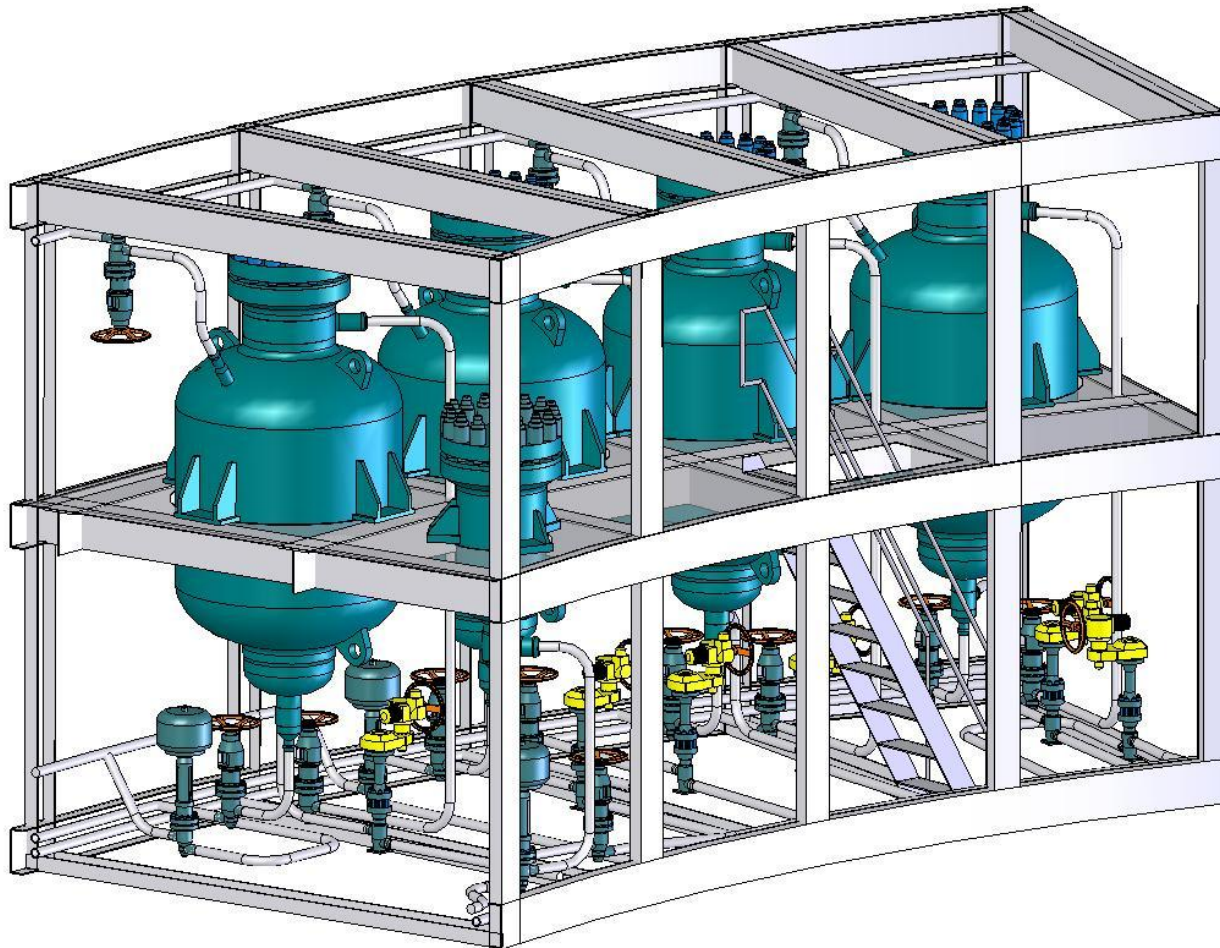
Масса интегрированного корпуса, т	1360
-----------------------------------	------



Блок теплообменного оборудования системы очистки 1 контура



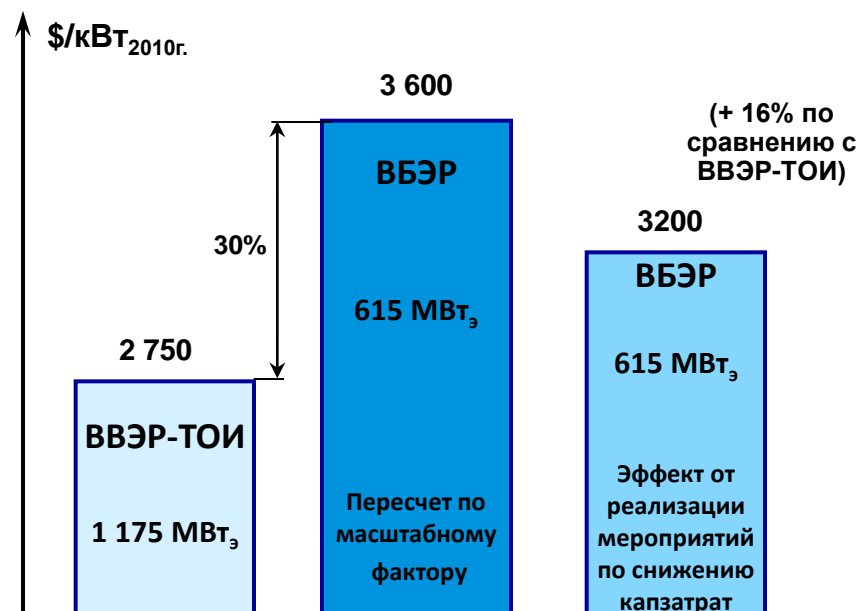
Длина, м	10,66
Ширина, м	7,8
Высота, м	8,9
Масса, т	45



Длина, м	8,9
Ширина, м	7,8
Высота, м	8,5
Масса, т	58

Мероприятия по снижению стоимости	% снижения по отношению к ВВЭР-ТОИ
1) Проектные решения	9 %
<ul style="list-style-type: none"> • Компактность <ul style="list-style-type: none"> - блочная компактность - защитная оболочка Двн × Нвн = 35 × 46 м - сокращение количества сварных швов в ГЦТ (60%) 	3-4 %
<ul style="list-style-type: none"> • Исключение класса аварий больших и средних течей теплоносителя I контура, с исключением систем безопасности: <ul style="list-style-type: none"> - сплинклерная система - система аварийного впрыска низкого давления - система пассивного залива активной зоны 	1,5-2%
<ul style="list-style-type: none"> • Герметичный ГЦН, с исключением: <ul style="list-style-type: none"> - радиально-осевого подшипника - смазки электродвигателя - подача воды в блок уплотнения - отвода протечек от уплотнения 	0,6 %
<ul style="list-style-type: none"> • Вертикальный прямоточный ПГ <ul style="list-style-type: none"> - исключение системы продувки ПГ - сокращение объемов ЖРО 	0,6 %
<ul style="list-style-type: none"> • ВХР без борного регулирования <ul style="list-style-type: none"> - снижение объемов ЖРО - сокращение СМР по спецкорпусу 	1 %
<ul style="list-style-type: none"> • «Сухой» способ перегрузки <ul style="list-style-type: none"> - сокращение на 1500 м³ объемов хранения и перекачки химочищенной воды - сокращение вспомогательного оборудования общей массой ~ 50т - сокращение на ~ 900 м² площади облицовки конструкций нержавеющей сталью 	0,8 %
2) Сокращение стоимости оборудования и СМР за счет блочно-модульной поставки, серийности и агрегатированной комплектной поставки	2-3,5 %
3) Сокращение сроков строительства за счет max агрегатированного способа поставки и монтажа	1-1,5 %
ИТОГО	14 %

Удельные капитальные затраты

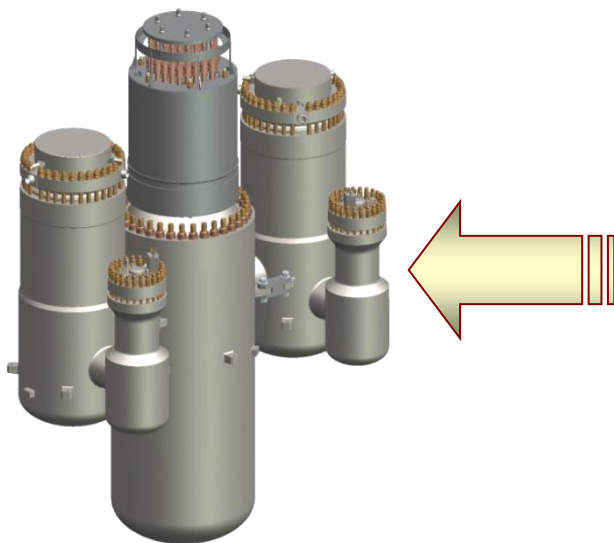


1) Доклад «Анализ конкурентоспособности проекта энергоблока ВВЭР-ТОИ», А.Е. Крошилин ОАО «ВНИИАЭС»), 2011 г.

2) Доклад «О параметрах конкурентоспособности АЭС (на примере проекта ВВЭР-ТОИ), С.Л. Соловьев (ОАО «ВНИИАЭС»), 2011 г.

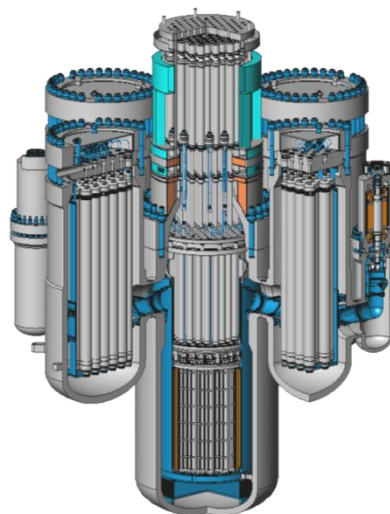
Унифицированная петля теплообмена ВБЭР – основа создания мощностного ряда

N=300 МВт эл.



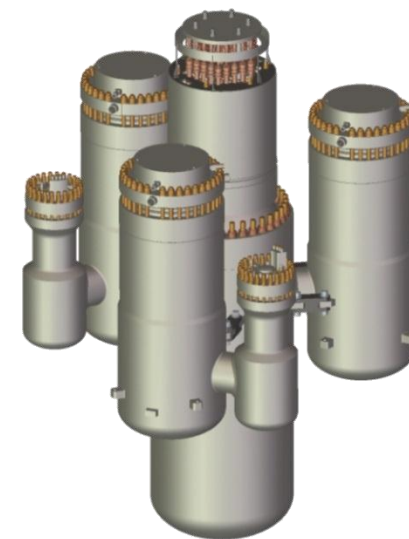
Двухпетлевая РУ

N=600 МВт.эл.



Базовый вариант
Четырехпетлевая РУ

N=450 МВт эл.



Трехпетлевая РУ

- **1. Проектные и конструкторские решения и характеристики энергоблока с РУ ВБЭР-600 показывают возможность достижения его конкурентоспособности и свидетельствуют о повышенных характеристиках безопасности и технологичности сооружения**

- **2. Разработка технического проекта РУ и активной зоны может быть выполнена за ~1,5 года. Объем ОКР и проектно-изыскательских работ, необходимый для получения разрешения на сооружение может быть выполнен за ~3 года**

- **3. Комплектная поставка РУ может быть осуществлена за ~3,5 года, а энергоблок с РУ ВБЭР-600 может быть создан за ~6,5÷7 лет**



СПАСИБО

СПАСИБО

за ВНИМАНИЕ

603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15
Тел.(831)275-40-76,(831) 275-26-40. Факс (831) 241-87-72
E-mail:okbm@okbm.nnov.ru
www.okbm.nnov.ru