



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Современное состояние проекта РУ БРЕСТ-ОД-300, преемственность решений для разработки коммерческих РУ со свинцовым теплоносителем

Лемехов Вадим Владимирович

Главный конструктор РУ БРЕСТ, АО «НИКИЭТ»

Моисеев Андрей Владимирович

Научный руководитель проекта БРЕСТ-ОД-300,
к. ф.-м. н., АО «НИКИЭТ»

Бажанов Антон Алексеевич

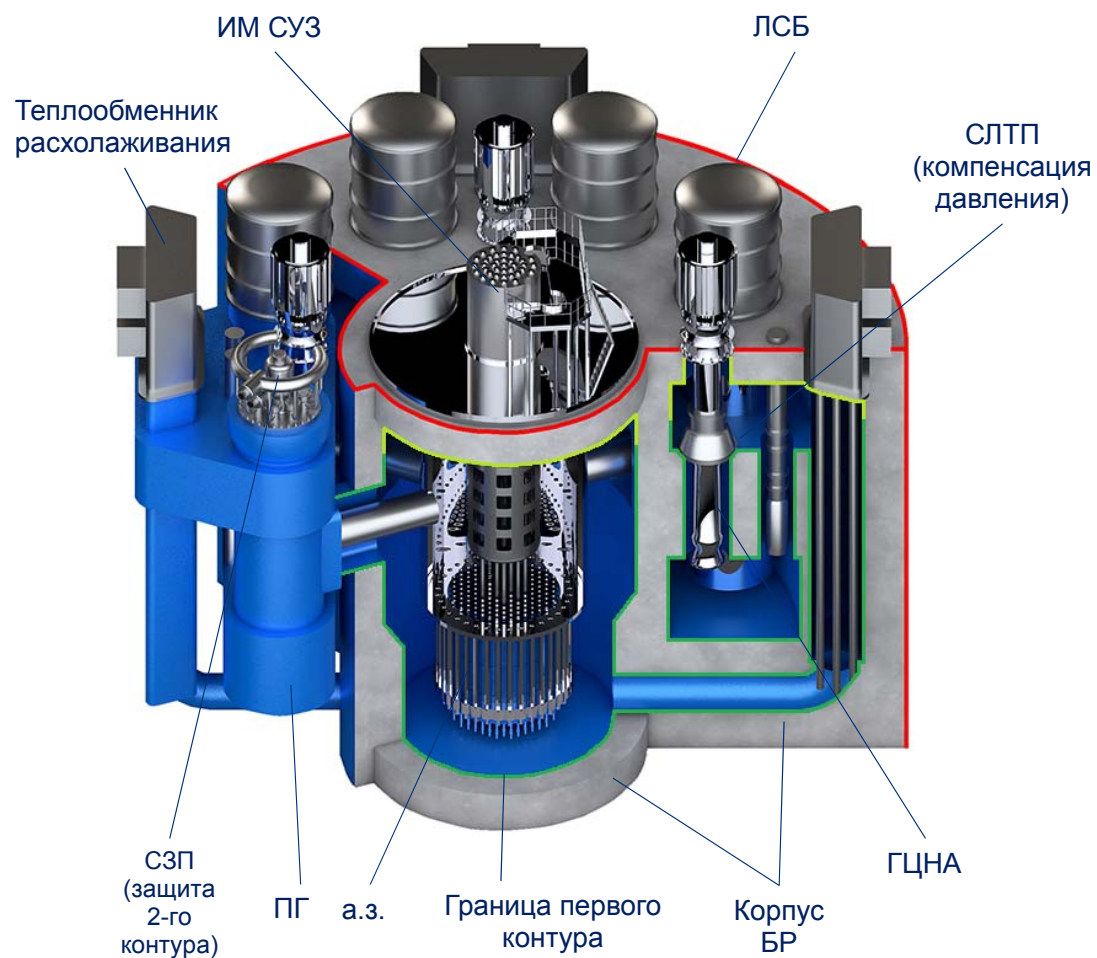
Начальник отдела, АО «НИКИЭТ»

Саркулов Марат Курмангалиевич

Начальник отдела, АО «НИКИЭТ»

МНТК-2023
14-17.11.2023

РУ БРЕСТ-ОД-300: проектные основы



- **Выполнение требований нормативной документации.**
- **Интегральная компоновка** с многослойным металло-бетонным корпусом без запорной арматуры в контуре циркуляции теплоносителя.
- **Резервирование** систем нормальной эксплуатации и систем безопасности.
- **Широкое использование пассивных защитных и локализирующих систем и устройств.**
- **Использование** радиационно-стойкого, малоактивируемого **свинцового теплоносителя** с высокой температурой кипения.
- **Использование** плотного, теплопроводного нитридного топлива.

Характеристики РУ БРЕСТ-ОД-300



Параметр	Значение	Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	700	Максимальное (гидростатическое) давление теплоносителя первого контура, МПа	1,17
Паропроизводительность, т/ч, не менее	1500	Давление защитного газа (аргон) над уровнем теплоносителя, МПа (абс.): - при нормальной эксплуатации; - максимальное при ННЭ	0,103-0,105 0,2
Объем теплоносителя первого контура (свинца), м ³	915	Среднесмешанная температура СТ на входе/выходе из активной зоны, °С	420/535
Максимальная плотность потока нейтронов в активной зоне, см ⁻² с ⁻¹	3,5×10¹⁵	Рабочая среда второго контура	Вода (пар)
Топливо	(U+Pu)N	Параметры теплоносителя второго контура (вода-пар): - давление на входе в ПГ, МПа - давление на выходе из ПГ, МПа - температура на входе в ПГ, °С - температура на выходе ПГ, °С	18,5 17,0 340 505
Загрузка топлива, т / ТВС	20,8 / 169	КПД, %	43,5
Ежегодные перегрузки (выгорание в точке): - для 6 % (~60 ТВС), т - для 9 % (~30 ТВС), т	~7,2 ~4,8	Проектный срок службы, лет, не менее	30
Максимальная глубина выгорания, % т.а.	до 10		
Максимальная повреждающая доза на оболочке ТВЭЛ при выг. 9 % т.а., сна	до 140		
Число ИМ СУЗ	31		
Количество петель циркуляции	4		

Пассивная САОР: вероятность отказа при выполнении только функции безопасности за 30 лет составляет 4,37E-10 1/год.

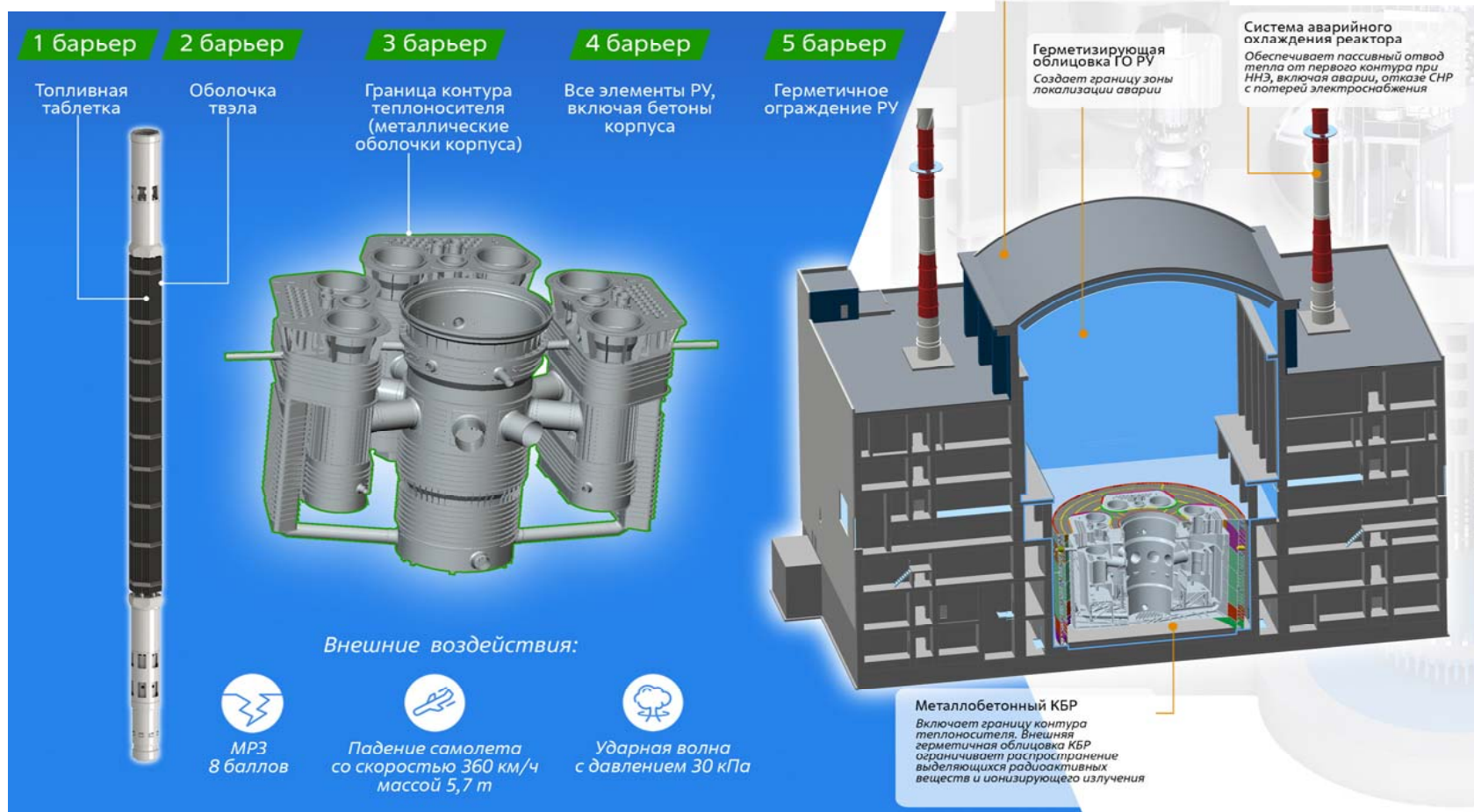
Корпус с выполнением локализирующей функции: вероятность разрушения < 1E-10 1/год

ВАБ второго уровня:

- повышение БАВ для рассмотренных тяжелых аварий нет,
- системы локализаций аварий выполняют свои функции пассивно.

ФНП	БАВ по НРБ-99/2009: <u>50 мЗв</u>	Целевой ориентир по НП-001-15: <u>1.0E-07 1/год</u>
БРЕСТ-ОД-300	Максимальная расчетная доза: <u>8,0E-02 мЗв</u>	Суммарная вероятность выброса РВ: <u>3,2E-8 1/год</u>

Проектные основы: уровни ГЭЗ



Параметры в ГО центрального зала:

- НЭ - 33 °С, - 200 Па;
- ПА - 33 °С, - 200 Па;
- ЗПА - 40 °С, 2,5 кПа.

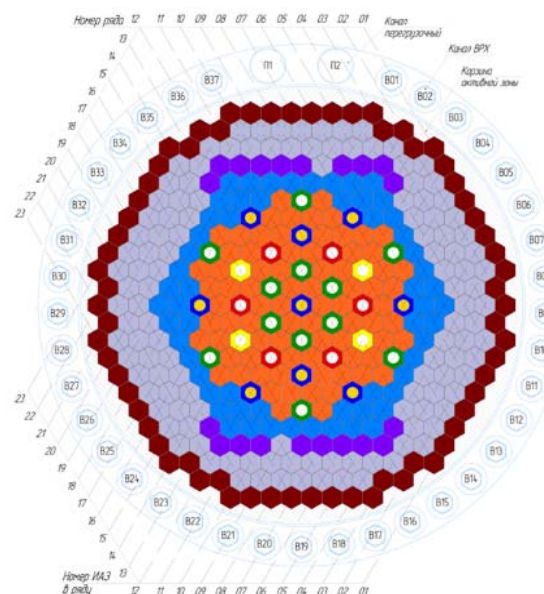
Параметры в ГО помещений СЛТП:

- НЭ - 30 °С, - 200 Па;
- ПА - 55 °С, 20 кПа;
- ЗПА - 60 °С, 24 кПа.

Активная зона: особенности

Параметр	Значение
Содержание плутония в смеси изотопов урана и плутония, % вес.	13,6
Полная загрузка СНУП топлива, т	20,8
Масса плутония, т	2,7
Запас реактивности после реализации непуниевоего эффекта, $\beta_{эф}$	0,35
Запас реактивности в «холодном» состоянии, $\beta_{эф}$	2,1
Коэффициент воспроизводства (средний по кампании)	1,05
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, % $\delta K/K$	0,36
Возможность компенсации технологических и расчётных погрешностей, % $\delta K/K$	$\pm 1,36$

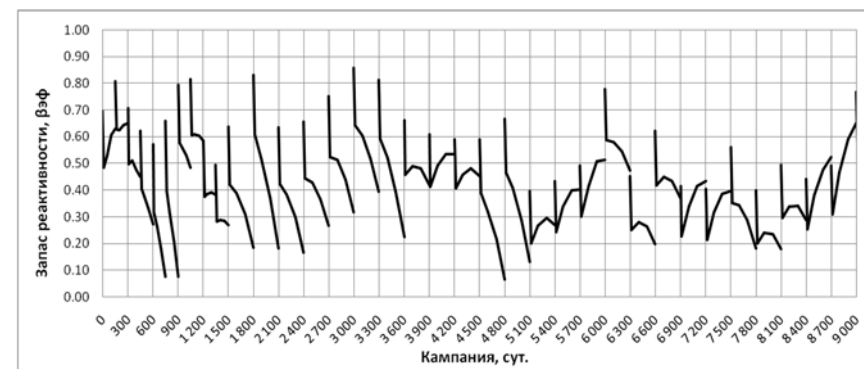
- Минимальный запас реактивности и сохранение стабильных физических характеристик за кампанию.
- Исключение аварий с разгоном на мгновенных нейтронах.
- Гомогенная структура активной зоны (отсутствие blankets) – доказательство реалистичности экспортного потенциала.
- Фабрикация топлива за счет подпитки отвалым ураном, без выделения плутония.
- Получены первые партии Pu, позволяющие обеспечить требования малого запаса реактивности по кампании.



Достигнутые параметры твэл со СНУП:

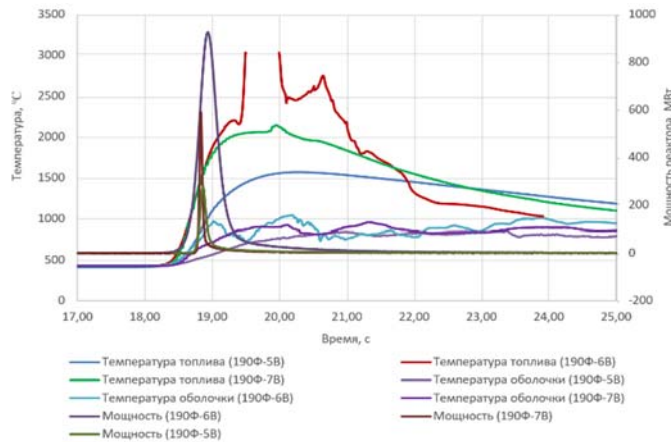
- БОР-60 - 8,7% т.а., 134 сна;
- БН-600 - 9,0% т.а., 108 сна.

Изменение реактивности на весь ЖЦ (30 лет)

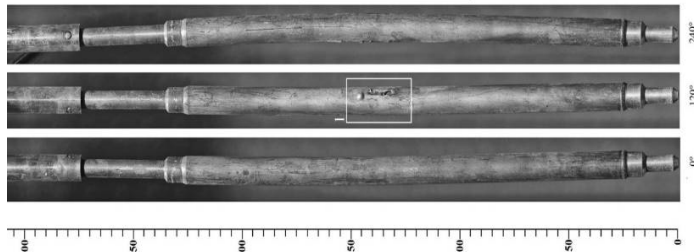


Ключевые результаты НИОКР 2022-2023 г.г.: обоснование топлива\ТВС

Определение ПСЭ топлива по результатам экспериментов на реакторе ИГР



Параметры пусков по определению ПСЭ



Внешний вид твэла после испытаний

Определение ПСЭ

- 8 из 15 твэлов остались целыми. Основная причина разрушения – плавление оболочки.
- ПСЭ СНУП-топлива необлучённого твэла – 167 кал/г. Обосновано до выгорания топлива в 3 % т.а.
- ЗПА ($T_{об.макс} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$) - разгерметизация. Топливо сохранило своё исходное положение.
- $T_{об.макс} > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 140 с, => ПБЭ подтверждены.
- Верификация моделей по кодам ПК MCU-RBMK, IVIS и STAR-CCM+.

Падение ТВС

- При ударе происходит потеря устойчивости с последующим разрушением перегородок между окнами трубы хвостовика.
- Формоизмерения твэльного пучка и головки не зарегистрировано.
- Зарегистрировано частичное смещение имитаторов твэлов внешнего ряда в направлении хвостовика, при этом касания твэлов и хвостовика нет.

Испытания по падению полномасштабной тепловыделяющей сборки



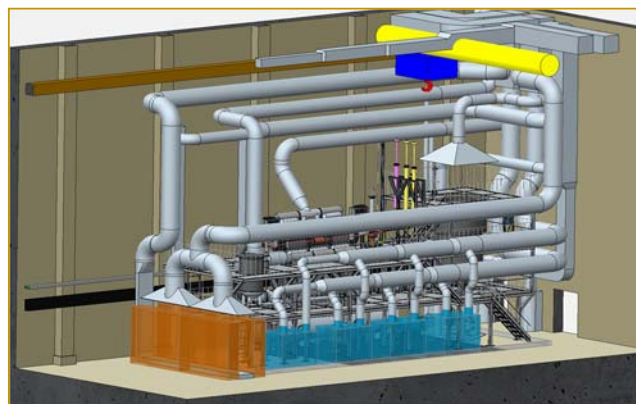
Макет ТВС ЦЗ до сброса

Макет ТВС ЦЗ после сброса

Ключевые результаты НИОКР 2022-2023 г.г.: испытания вибрационной модели парогенератора

Параметры стенда

Параметр	Значение
Объем теплоносителя, м ³ , не более	6
Температура теплоносителя, °C, не более	550
Проходное сечение циркуляционного трубопровода, мм	350
Защитный газ	аргон
Мощность электрическая, МВт, не более	3,7



Стенд, 3D модель



Общий вид стенда КЭ ВМПГ

- Измеренные вибрационные параметры показали высокую консервативность ранее проведенной оценки износостойкости и долговечности теплообменных труб ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300 в экспериментально-теоретическом исследовании фреттинг-коррозионного изнашивания пар трения «труба-дистанционирующая гребенка».
- Подтверждена возможность использования методики расчета вибраций теплообменных труб НПО ЦКТИ.



Вибрационная модель ПГ

Испытания ГЦНА

Параметр	Значение
Теплоноситель	свинец
Масса расплава свинца максимальная, т, не более	670
Проходное сечение циркуляционного трубопровода, мм	350
Количество петель циркуляционного контура	4
Максимальная подача, не менее, м ³ /ч	4140
Максимальный напор, не менее, м	3,1
Защитный газ	аргон

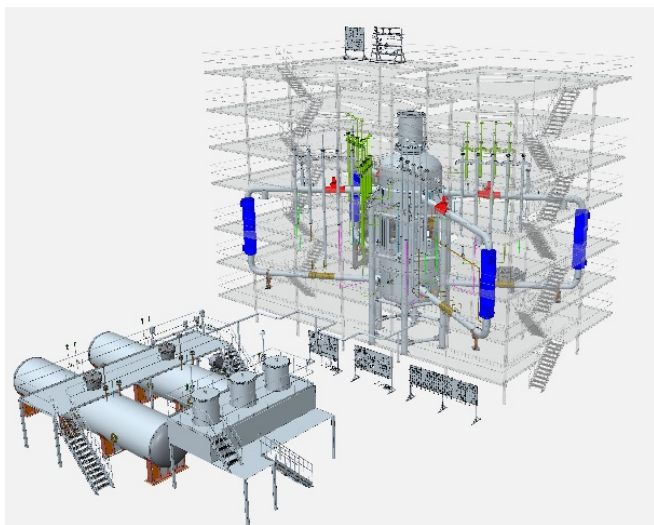


Схема стенда



Испытательная колонка



Электродвигатель

Ключевые результаты НИОКР 2022-2023 гг. теплогидравлика и динамика

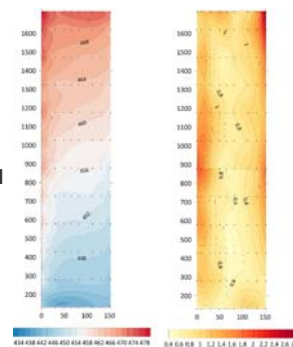
ОИВТ РАН



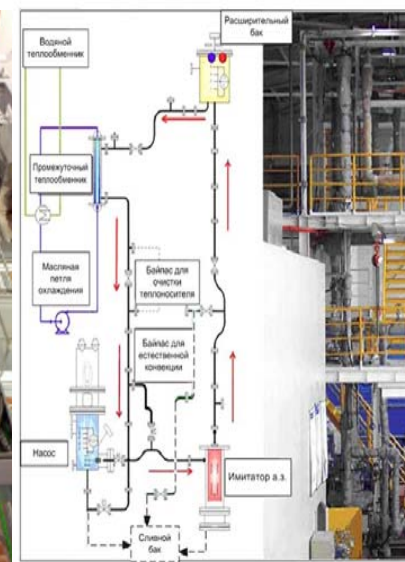
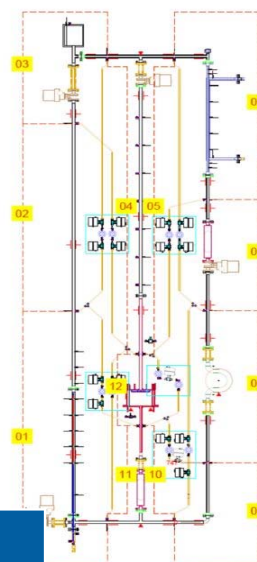
УР модели бокового отражателя



УР модели верхней камеры РУ



Поля температуры
и интенсивности
пульсаций



Результаты расчетов БН-600

Теплоноситель – PbBi
Высота установки – 6,8 м
Расход при ЕЦ – 0,5-1 кг/с

Теплоноситель – PbBi
Высота установки – 12 м
Расход при ЕЦ – 1,8-2,8 кг/с

Теплоноситель – PbBi
Высота эксп. петли – 5 м
Расход при ЕЦ – 0,6–1,1 кг/с

Безразмерные
числа

TALL-3D

HELIOS

KYLIN-II

Рейнольдса	до $1,4 \cdot 10^5$	до $4,6 \cdot 10^4$	до $4 \cdot 10^4$
Пекле	до 4000	до 1130	до 400
Ричардсона	до 2500	до 2	до 4,6

Опытные образцы КИП



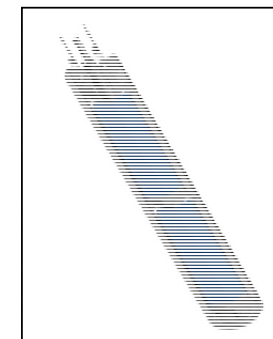
Опытные образцы подвески СКЗН, ДСЗ, ШДК-Б и ШДК-Б-01. Общий вид в развернутом виде



Корпус подвески СКЗН (место расположения ионизационной камеры)



3D-модель головки подвески



3D-модель ионизационной камеры



Линия кабельная



Преобразователь вторичный



Преобразователь первичный



а



б

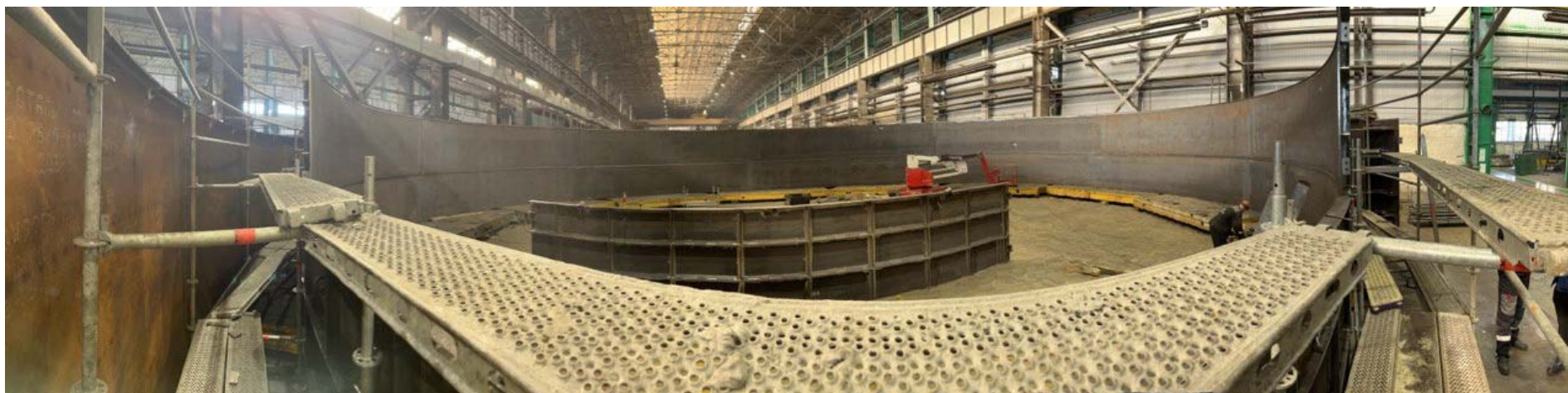
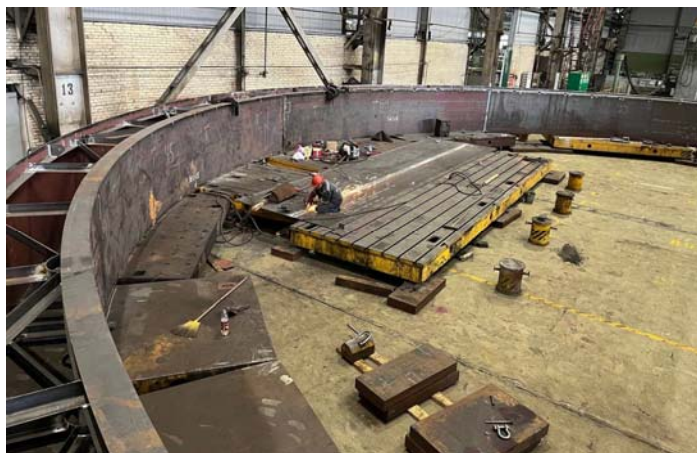
Общий вид системы ИПО-99:

а – штанга измерительная,
б – измерительно-управляющий блок

Статус изготовления металлоконструкций корпуса РУ БРЕСТ-ОД-300



НИКИЭТ
РОСАТОМ



Статус сооружения на площадке ОДЭК



Площадка, август 2023. Вид на здание реактора и машзал

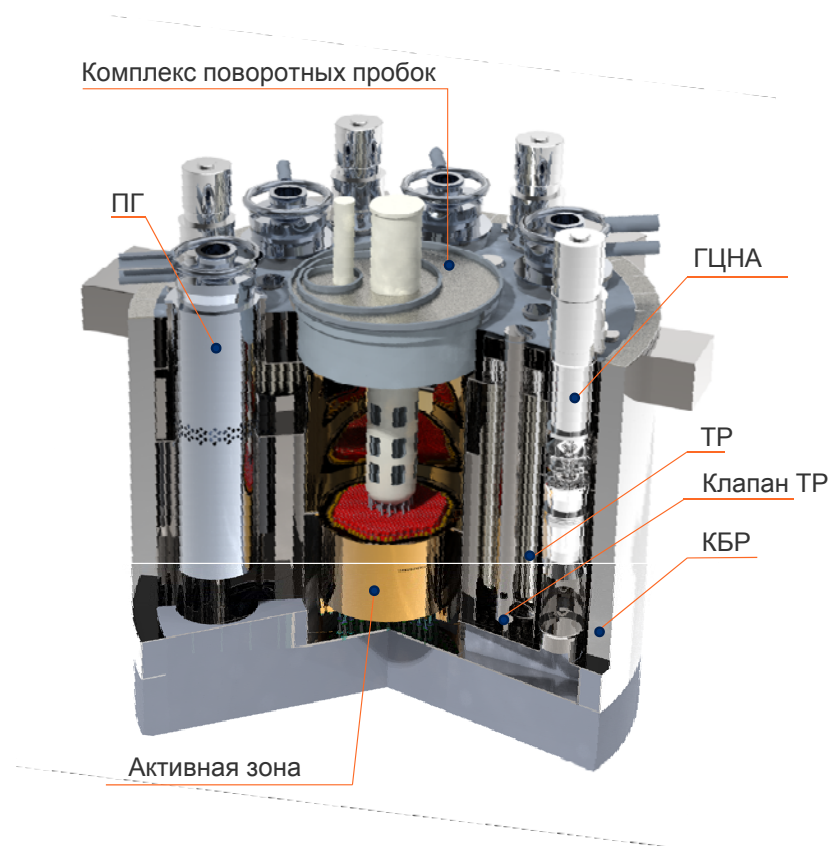


Площадка, август 2023. Здание реактора

Конструкция и параметры РУ БР-1200

Основные новые (относительно РУ БРЕСТ-ОД-300) технические решения:

- безуровневая схема циркуляции теплоносителя,
- исключена газовая СПОС.



Параметр	Значение
Мощность тепл. / эл., МВт, не менее	2930 / 1250
Срок службы, лет, не менее	60
$K_{\text{гост}}$ не менее	0,9
Длительность работы между перегрузками, эфф. сут	220 (нач. этап) / 330
Паропроизводительность, т/ч, не менее	6120
Стойкость к ВДВ	ПЗ – 7 баллов МРЗ – 8 баллов
ЗР при работе на 100% мощности, $\beta_{\text{эф}}$	$\sim \beta_{\text{эф}}$
Средний КВА	1,05
Среднее выгорание топлива, % т.а.	6,5 / 9,0 / 12,0
Количество ТВС, шт.	397
Количество ПГ, шт.	6
Количество ГЦНА, шт.	6

Нормативная документация: полная преемственность

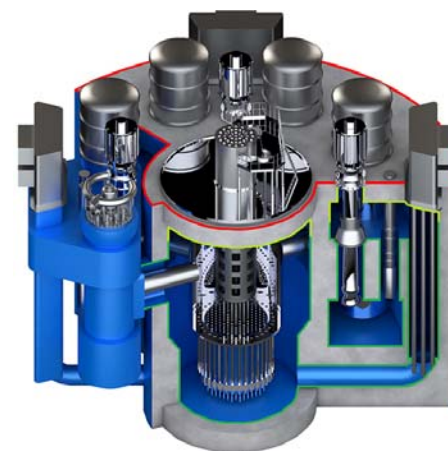
Федеральные нормы и правила

- «Правила устройства и безопасной эксплуатации корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем» (НП-107-21).
- «Требования к обоснованию прочности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем» (НП-108-21).
- «Требования к обоснованию целостности элементов активной зоны реакторной установки со свинцовым теплоносителем» (НП-119).

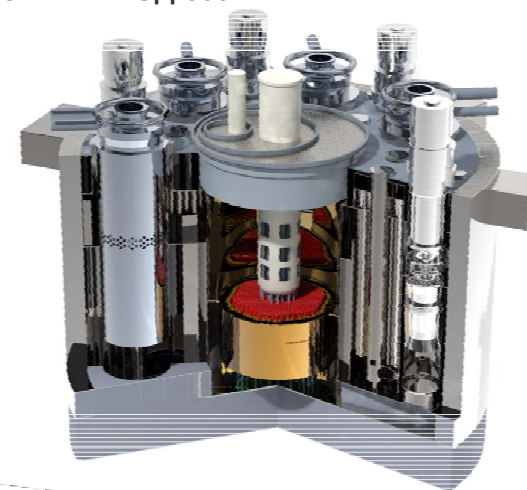
Комплекс стандартов

- «Обеспечение целостности корпуса блока реакторного, оборудования, трубопроводов и внутрикорпусных устройств ядерной энергетической установки со свинцовым теплоносителем» (16 стандартов).
- «Обеспечение целостности элементов активной зоны реакторной установки со свинцовым теплоносителем» (4 стандарта).

Необходимо актуализировать: НП-010, НП-018, НП-061.



РУ БРЕСТ-ОД-300



РУ БР-1200

Уровни глубокоэшелонированной защиты



НИКИЭТ
РОСАТОМ

ФИЗИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ РУ БР-1200

1 барьер

Топливная
таблетка

2 барьер

Оболочка
твэла

3 барьер

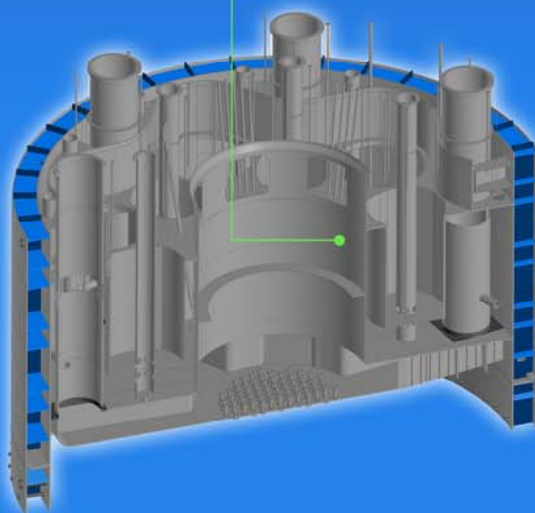
Граница контура
теплоносителя
(металлические
оболочки корпуса)

4 барьер

Все элементы РУ,
включая бетон
корпуса

5 барьер

Герметизирующая
облицовка



Внешние воздействия:



МРЗ
8 баллов

Система локализации течи парогенератора

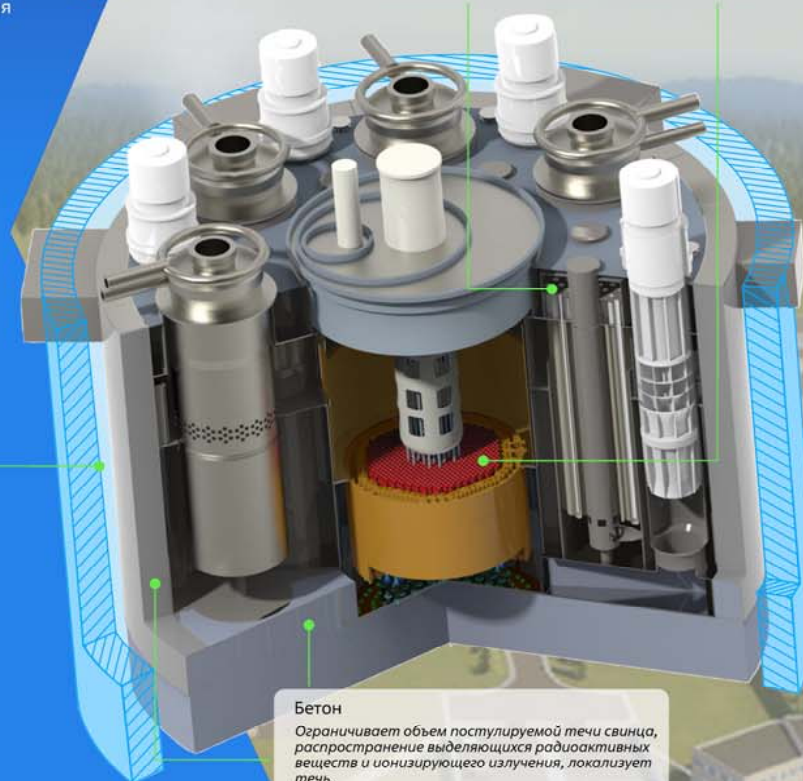
Защищает от превышения
давления в газовой полости
БР. Локализует выделяющиеся
радиоактивные вещества

Система аварийного охлаждения реактора

Обеспечивает пассивный отвод
тепла от первого контура при
ННЗ, включая аварии, отказ СНР
с потерей электроснабжения

УПОС

Специальное средство
по управлению
и ограничению
последствий ЗПА



Бетон

Ограничивает объем постулируемой течи свинца,
распространение выделяющихся радиоактивных
веществ и ионизирующего излучения, локализует
течь.

Изделия активной зоны, оборудование блока реакторного

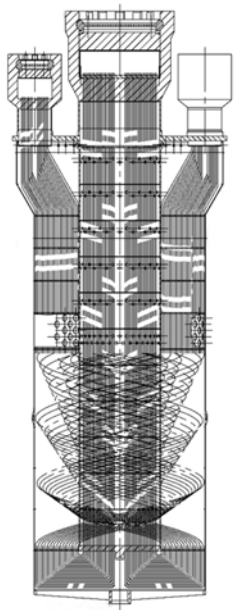


Полномасштабный макет ТВС
РУ БРЕСТ-ОД-300

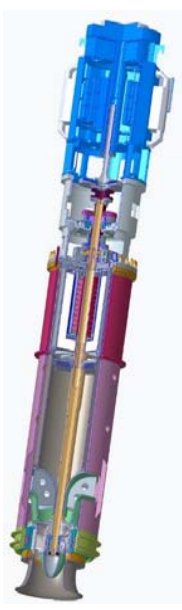


Полномасштабный макет
ТВС РУ БР-1200

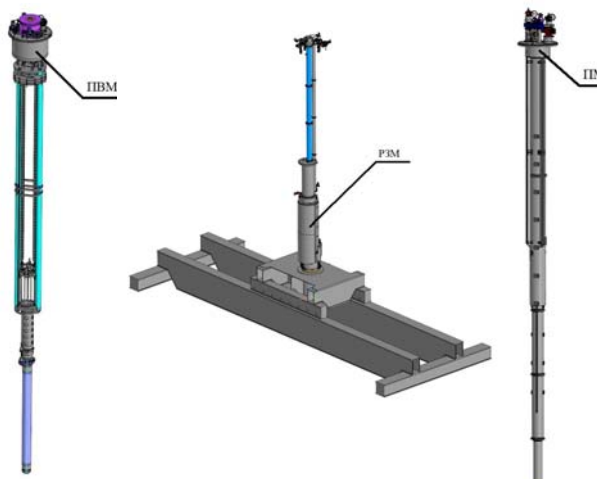
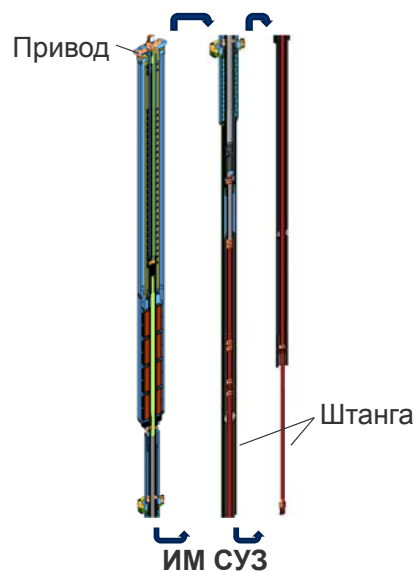
- Бесчехловая конструкция ТВС на каркасе с дистанционирующей решеткой.
- Нежесткое в аксиальном направлении закрепление твэлов.
- Унифицированные габаритные и присоединительные размеры с ТВС БРЕСТ-ОД-300.
- Экспериментально отработана возможность загрузки-выгрузки при проектных отклонениях.



Парогенератор



ГЦНА

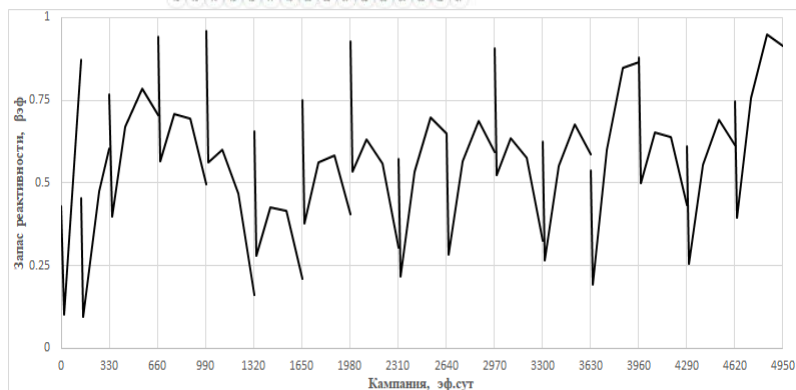
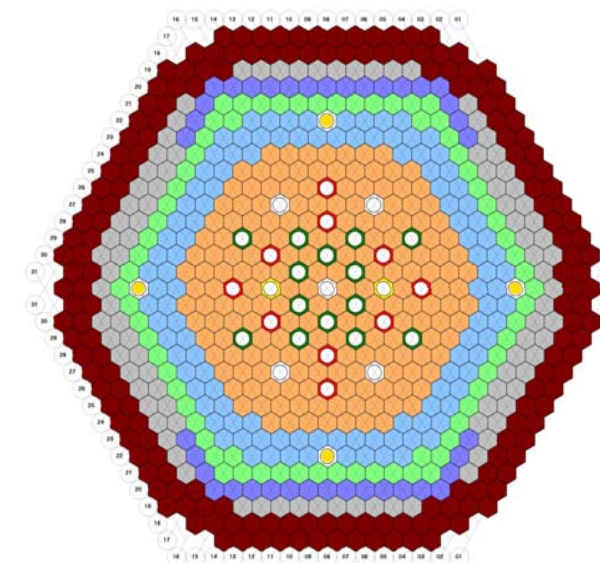


Перегрузочный комплекс

Обеспечивается
преимущество
технических решений
по всем элементам РУ:

- корпус;
- парогенератор;
- ГЦНА;
- ИМ СУЗ;
- перегрузочный комплекс;
- технология теплоносителя.

Активная зона

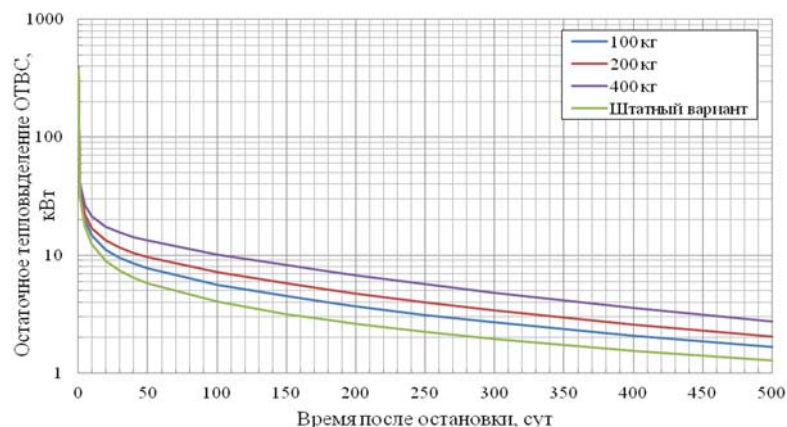


Изменение запаса реактивности

Параметр	Значение
Запас реактивности на номинальной мощности, $b_{эф}$	0,50
Коэффициент воспроизводства	1,11
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, % $\delta K/K$	0,339
Время жизни мгновенных нейтронов, с	7,88E-07
Эффективность РО аварийной защиты, % $\delta K/K$	2,92
Эффективность РО системы экстренного снижения мощности, % $\delta K/K$	3,19
Среднее ежегодное потребление ТВС:	
- на первом этапе ~ 136 ТВС	136
- на втором этапе ~ 102 ТВС	102
- на третьем этапе ~ 71 ТВС	71

- Обоснована возможность поддержания запаса реактивности менее $\beta_{эфф}$.
- Обоснована расчетно- и экспериментально работоспособность элементов а.з. для 1 этапа эксплуатации.

Дожигание МА на примере РУ БРЕСТ-ОД-300, БР-1200



РУ БРЕСТ-ОД-300

Для гомогенного содержания америция в топливе (одинакового для всех ТВС) – добавка к топливу штатного состава 100, 200 и 400 кг америция (0,5% (равновесное), 1% и 2% от массы т.а.).

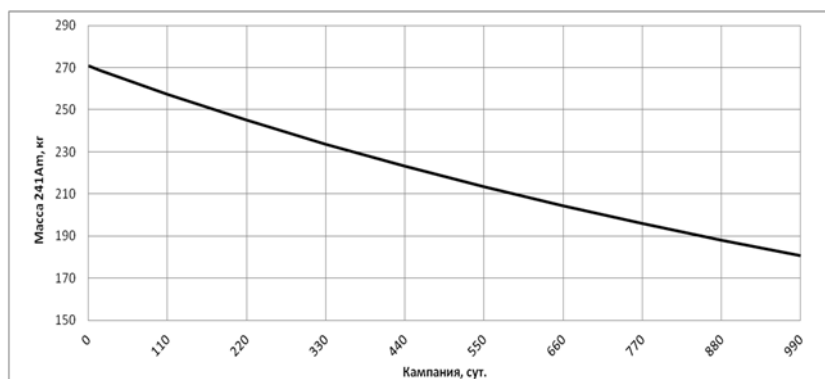
При одном годе выдержки в ВРХ топлива с исходным 1% америция уровень остаточного тепловыделения меньше 3 кВт (допустимо для штатного обращения) с темпом трансмутации 13,3 кг/эф.год.

РУ БР-1200

Вариант с 1% позволяет сжигать и собственный и внешний Am; 0,5% - только собственный из рецикла.

За 60 лет можно сжечь 3780 кг Am (при подпитке сторонним до исходного содержания 1%).

Дополнительный вклад Cm в остаточное тепловыделение - 1,8 и 0,5 кВт (330 и 660 сут. после останова соответственно).

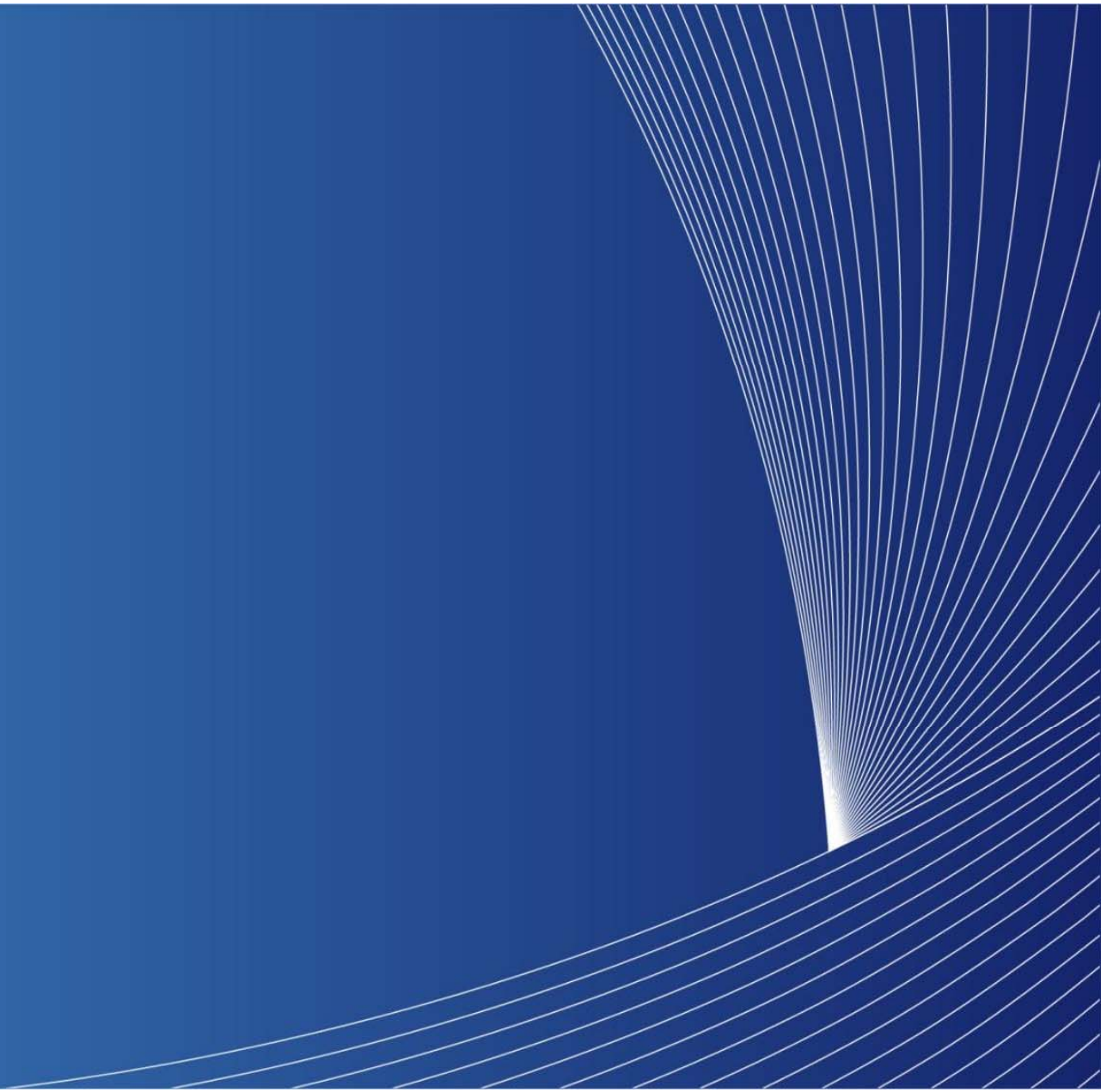


Гетерогенные варианты обременены повышенным остаточным энерговыделением, необходимостью дополнительных гнёзд ВРХ и увеличением количества материала в цикле.

Заключение



1. В соответствие с разработанной документацией и условиями действия лицензии идёт изготовление оборудования, параллельно идёт сооружение энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300.
2. Продолжение НИОКР на стадии сооружения РУ БРЕСТ-ОД-300 связано с необходимостью исполнения требований УДЛ и постановкой на производство несерийного уникального оборудования РУ и опытно-демонстрационным характером объекта.
3. НИОКР по коммерческой РУ реализовываются с учётом полученных для обоснования РУ БРЕСТ-ОД-300 результатов, однако, требуется доаттестация программных средств, увеличение ресурсных испытаний конструкционных материалов и отдельного оборудования.
4. Современное состояние проработки проектов показывает возможность обеспечения необходимого уровня безопасности в соответствии с требованиями ПН «Прорыв» и федеральными нормами и правилами.

A decorative graphic consisting of numerous thin, white, curved lines that originate from a point on the right edge and fan out towards the left, creating a sense of motion or a stylized wave. The background is a solid blue color with a slight gradient.

Лемехов Вадим Владимирович

Главный конструктор РУ БРЕСТ
АО «НИКИЭТ»

Тел.: +7 (499) 263 73 61

E-mail: nikiet@nikiet.ru

www.nikiet.ru

14-17.11.2023