



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

АЭС С РУ БН-1200М. ПРОЕКТНО - КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ, ПЕРЕХОД К ИХ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Васяев А.В. ¹, Гулевич А.В. ², Дягилев А.М. ³, Егоров С.В. ³, Камаев А.А. ²,
Керекеша А.В. ¹, Марова Е.В. ¹, Перегудов А.А. ², Троянов В.М. ², Шепелев С.Ф. ¹,
Яшкин А.В. ³

¹ АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация

² АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск, Российская Федерация

³ АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Готовность технологии БН к коммерческому освоению



- Основание для рекомендации сооружения энергоблока №5 Белоярской АЭС с РУ БН-1200М - результаты разработки материалов проекта энергоблока в рамках анализа его конкурентоспособности и технического проекта РУ
- Конкурентоспособность: характеристики безопасности и надежности, технико-экономические показатели ядерных реакторных технологий на уровне показателей электрогенераций на органическом топливе при учете всех затрат на жизненном цикле электростанций, в том числе и замкнутого ядерного топливного цикла
- Концепция достижения углеродной нейтральности в области энергетики
- Прогноз МАГАТЭ и Международного энергетического агентства по удвоению ядерных мощностей к 2050 году
- Увеличение производства электроэнергии при повышении уровня безопасности, продления срока эксплуатации до 60 и более лет, но и расширения возможностей по применению ядерных технологий в смежных областях, таких как теплоснабжение или производство водорода

Основные требования к проекту



- **Безопасность:** исключение необходимости эвакуации или отселения населения при любых авариях, обеспечение суммарной вероятности тяжелого повреждения активной зоны не более 10^{-6} на реактор в год, удержание поврежденных элементов активной зоны в пределах корпуса реактора в постулированной тяжелой аварии, эффективное использование свойств внутренней самозащищенности и пассивных систем безопасности, гарантированное исключение течей радиоактивного натрия
- **Надежность:** назначенный срок службы основного оборудования – не менее 60 лет, КИУМ - не менее 0,9
- **Экономика:** удельная металлоемкость РУ - не более 5,7 т/МВт(э), LCOE - 2,35 руб./кВт·ч (цены 2017 г.), КПД брутто более 43 %
- **Экологичность:** компактно размещенное де-карбонизированное производство с минимумом потребления водных и топливосодержащих ресурсов, уменьшенными объемами оборота дизельного топлива для системы аварийного энергоснабжения, замыкание ЗЯТЦ, включая дожигание МА

Становление технологии БН – основа готовности технологии к коммерциализации

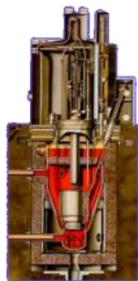
Первый в Европе экспериментальный реактор на быстрых нейтронах



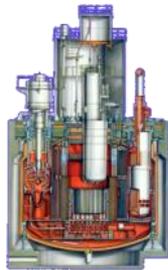
Действующий исследовательский реактор



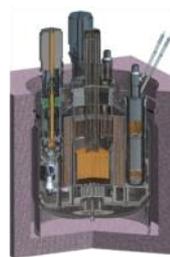
Первый в мире опытно-демонстрационный энергетический реактор на быстрых нейтронах



Успешно работающий ~ 40 лет опытно-промышленный реактор



Промышленный реактор для отработки технологического замыкания ядерного топливного цикла



Многоцелевой исследовательский реактор



Коммерческий энергоблок для работы в ЗЯТЦ



БР-5/
БР-10 1958

БОР-60 1969

БН-350 1973

БН-600 1980

БН-800 2015

МБИР 2025

БН-1200 2031

Технологии натриевого теплоносителя, конструкционных материалов, эксплуатации и ремонта оборудования реактора

Обоснование работоспособности твэлов с различными видами топлива (диоксид урана и плутония, карбид и нитрид урана)

Натриевая технология в части контроля и очистки от примесей, отработки средств контроля параметров натрия, включая контроль радиационных характеристик

Обеспечение испытаний топлива, основного оборудования, включая ПГ

Опыт эксплуатации на тепловой мощности до 750 МВт

Поведение конструкционных материалов под облучением

Верификация ресурсных характеристики оборудования

Опреснение воды

Использование натриевой технологии в промышленном масштабе

Отработка оборудования РУ

Внедрение интегральной компоновки

Реакторное обоснование различных видов топлива (МОКС и СНУП) и конструкционных материалов

Восстановление компетенций при изготовлении оборудования

Поддержание компетенций в конструировании, изготовлении и поставке оборудования

Развитие компетенций при изготовлении оборудования

Поддержание компетенций в конструировании, изготовлении и поставке оборудования

Развитие компетенций в конструировании, изготовлении оборудования

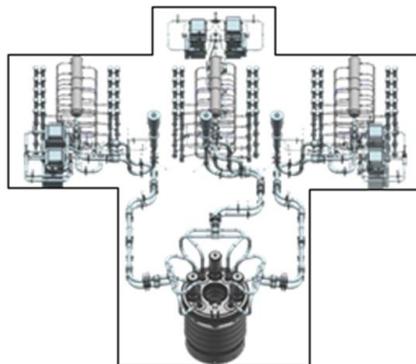
Развитие технологий замыкания ЯТЦ

Развитие технологий расчетного моделирования и проектирования

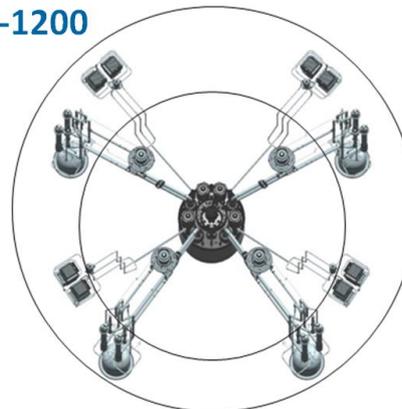
Инновационные технические решения – основа конкурентоспособности энергоблока БН-1200 (1)

Установка	БН-800	БН-1200	БН-1200М
Мощность, МВт (тепл./электр.)	2100 / 885	2800 / 1220	
Реактор	Оборудование и трубопроводы системы очистки натрия первого контура вне бака реактора	Полное интегрирование в бак реактора оборудования и систем, содержащих радиоактивный натрий	
Количество петель второго контура	3	4 (идентичные)	
Количество петель САОТ	3 (подключены к 2 контуру)	4 (подключены к 1 контуру)	
Количество ПТО	2 на петлю	1 на петлю	
Количество модулей ПГ	60	8	
ГЦН-2	Со свободным уровнем натрия	Со свободным уровнем натрия	Герметичный, размещен на ПТО
Масса, т	6017,9	6298,4	5487,3
Назначенный срок службы незаменимого оборудования, лет	45	60	
КПД АЭС (брутто/нетто), %	41,9 / 38,8	43,6 / 40,5	
КИУМ, отн. ед.	0,85	0,9	

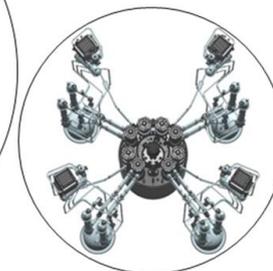
БН-800



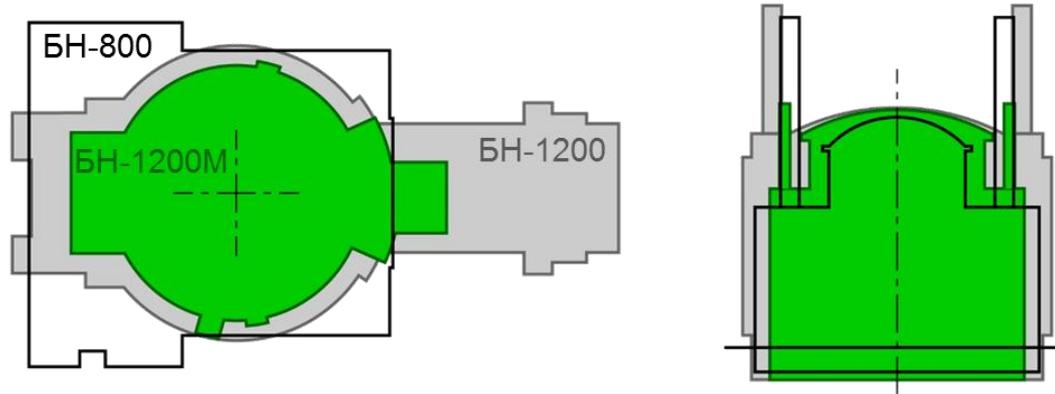
БН-1200



БН-1200М



Инновационные технические решения – основа конкурентоспособности энергоблока БН-1200 (2)



- Площадь застройки БН-1200М сократилась в 1,8 и 1,6 раза, удельный объем – в 2,2 и 1,4 раза по отношению к БН-800 и БН-1200
- **Потенциал:** увеличение мощности РУ до 1250 МВт(э), назначенного срока службы ЭБ с 60 до 80 лет, КИУМ с 0,9 до 0,91, назначенного срока службы ПГ с 30 до 60 лет, изменение конструкции стержней СУЗ и увеличение их ресурса, замена ТВС боковой зоны воспроизводства на сборки стальной защиты, увеличение кампании топлива

Инновационные технические решения – основа конкурентоспособности энергоблока БН-1200 (3)



Реактор	БН-600	БН-800	БН-1200	
Тип топлива	UO ₂	МОКС (на начальном этапе UO ₂ / МОКС)	СНУП	МОКС
Материал оболочки твэл	Аустенитная сталь	Аустенитная сталь	Усовершенствованная аустенитная сталь / Ферритно-мартенситная сталь	
Средняя энергонапряженность активной зоны, МВт/м ³	400	450	~ 230	
Интегрирование оборудования 1 контура	частичное	частичное	полное	
Технические решения по обеспечению безопасности:				
- окужухование тр/пр и корпусов с р/а Na	частичное	частичное	полное	
- системы аварийной защиты	АЗ	АЗ, ПАЗ-Г	АЗ, ПАЗ-Г, ПАЗ-Т	
- система аварийного отвода тепла	В составе 2 и 3 контура	В составе 2 контура	САОТ подсоединена к 1 контуру	
- система локализации кориума	-	+	+	
- помещение для локализации аварийных выбросов при ЗПА	-	-	+	

- Достигнуто значительное снижение вероятности тяжелого повреждения активной зоны для внутренних событий при работе реактора БН-1200 на мощности до $\sim 5 \times 10^{-7}$, что значительно ниже соответствующих величин для БН-600 $\sim 10^{-5}$ и БН-800 $\sim 1,2 \times 10^{-6}$
- В результате детерминистического анализа тяжелых запроектных аварий с масштабным повреждением активной зоны реактора даже в случае отказа всех активных и пассивных систем аварийного останова исключена необходимость эвакуации или отселения населения (доза облучения человека из населения за границей площадки АЭС ниже 50 мЗв за первый год после аварии)
- На совещании Управляющего совета Проектного соглашения Международного Форума Поколение IV (МФП) по системной интеграции и оценке быстрого натриевого реактора в сентябре 2017 г. концепция БН-1200 была принята и одобрена как отвечающая требованиям МФП, предъявляемым к реакторам на быстрых нейтронах Поколения IV



Раб. участок для испытания на воде полномасштабного макета радиально-осевого подшипника ГЦН-2



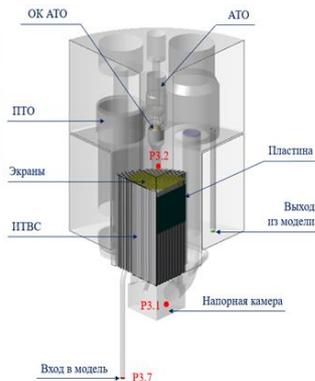
Модель герметичного электродвигателя ГЦН-2



Секторная модель входной камеры ПГ



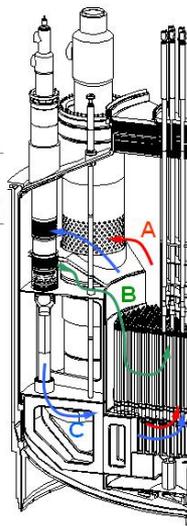
Семитрубная модель ПГ и рабочий участок для ее испытаний



Геометрическая модель имитатора реактора стенда «ТИСЕЙ»



ЭМН САОТ



А – Через ТВС (при расхолаживании через межпакетное пространство)
В – Через межпакетное пространство
С – Через обратный клапан

Варианты расхолаживания САОТ



Гермоввод для высоких температур



Датчики положения ротора электродвигателя ГЦН-2



Модель трубного пучка ПГ

- Реализация Программы НИОКР в обоснование безопасности и инновационных технических решений по оборудованию и системам
- Разработка и корректировка технического проекта РУ
- Использование 3D моделирования, создание информационной модели объекта с учетом этапа жизненного цикла
- Расчетное обоснование по проектным кодам, кодам нового поколения
- Разработка и верификация комплексной электронной математической модели энергоблока

Потенциал замыкания ЯТЦ и реализации двухкомпонентной ядерной энергетической системы



- Стратегия развития ядерной энергетики России по решению задач стабильного топливообеспечения, накопленных проблем в ядерной энергетике страны и мира, расширения отраслевого бизнеса, создания безуглеродной энергетики
- Эффективность натриевых быстрых реакторов в двухкомпонентной ЯЭС
- Синергетическое развитие быстрых и тепловых реакторов с минимальными технологическими и экономическими рисками на основе единых, продемонстрировавших свою работоспособность технологий МОКС топлива и водной переработки ОЯТ, и в рамках существующих требований национального законодательства, а также стандартов и рекомендаций МАГАТЭ
- Физические особенности активной зоны реактора на быстрых нейтронах определяют потенциал многократного (в том числе, расширенного) использования плутония в составе рефабрицированного ядерного топлива за счет изменения в процессе облучения исходного (в составе загружаемого топлива) изотопного состава плутония в сторону равновесного состава, что обеспечивает рециклы топлива не только в реакторах БН, но и в ВВЭР
- Использование в реакторах БН плутония с различным вектором изотопов
- Серийное сооружение реакторов БН-1200М со средним темпом ввода один реактор за два года позволяет приблизительно на 20% сократить ежегодное потребление природного урана на 1 ГВт установленной мощности
- Использование плутония и МА из ОЯТ реакторов различного типа обуславливает сокращение накопленных радиоактивных отходов, их последующее накопление, а также потенциал расширения международного бизнеса Госкорпорации «Росатом» за счет предоставления услуг замыкания ЯТЦ

Заключение

- Успешная многолетняя эксплуатация действующих реакторов БН-600, БН-800 и высокая готовность к реализации проекта коммерческого энергоблока БН-1200, предназначенного для работы в ЗЯТЦ
- Оптимальное сочетание референтных и новых технических решений и результаты выполняемых НИОКР по их обоснованию определяют потенциал развития ядерной энергетической системы в стратегической перспективе как в части энергетической базы устойчивого развития, гарантированного топливообеспечения, снижения экологического бремени при обращении с отработавшим топливом и радиоактивными отходами с учетом экономической конкурентоспособности по отношению к другим видам электрогенерации

**Спасибо
за внимание**

30.05.2022

