

УДК 621.039.52

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.01>

Обзор / Review

НИОКР по РУ БН-1200 как фундамент для реализации проекта

А.В. Гулевич¹, А.А. Камаев¹, А.В. Керекеша², А.Н. Крюков², Ю.А. Кузина¹, Е.В. Марова²,
А.М. Маслов², А.А. Перегудов¹, С.А. Рогожкин², В.М. Троянов¹, М.Р. Фаракшин²,
С.Ф. Шепелев²

¹ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

² АО «ОКБМ Африкантов»,
603074 Россия, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

Реферат. Цель – представление состояния обоснования проекта реакторной установки с реактором БН-1200М для головного коммерческого энергоблока нового поколения 4 в составе двухкомпонентной ядерной энергетической системы с замкнутым ядерным топливным циклом. В проекте БН-1200М применены референтные технические решения, хорошо показавшие себя при эксплуатации энергоблоков БН-600 и БН-800, и новые технические решения по оборудованию и системам реакторной установки. В обоснование технических решений проводятся расчетные и экспериментальные исследования конструктивного исполнения активной зоны и ее компонентов, работоспособности смешанного уран-плутониевого топлива, системы аварийного отвода тепла и ее элементов, главных циркуляционных насосов, холодных ловушек, парогенератора, элементов системы перегрузки, а также безопасности эксплуатации, новых конструкционных материалов, организации ядерного топливного цикла и др. Результаты НИОКР позволили обосновать новые технические решения, повысить уровень безопасности, надежности и экономичности по отношению к проектам-предшественникам и перспективным энергоисточникам, обеспечить удовлетворение системных требований к ядерным энергоисточникам. Результаты выполненных работ заложили фундамент коммерческого освоения технологии быстрых натриевых реакторных установок и готовность проекта головного энергоблока с реакторной установкой БН-1200М к реализации в составе энергоблока № 5 на площадке Белоярской атомной электростанции.

Ключевые слова: БН-1200, реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, замыкание ядерного топливного цикла, конкурентоспособность, натриевый теплоноситель, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), обоснование технических решений, реакторная технология, реакторная установка (РУ), энергоблок, БН-800, БН-600, цифровизация.

© Гулевич А.В., Камаев А.А., Керекеша А.В., Крюков А.Н., Кузина Ю.А., Марова Е.В., Маслов А.М., Перегудов А.А., Рогожкин С.А., Троянов В.М., Фаракшин М.Р., Шепелев С.Ф., 2026

Для цитирования: Гулевич А.В., Камаев А.А., Керекеша А.В., Крюков А.Н., Кузина Ю.А., Марова Е.В., Маслов А.М., Перегудов А.А., Рогожкин С.А., Троянов В.М., Фарахшин М.Р., Шепелев С.Ф. НИОКР по РУ БН-1200 как фундамент для реализации проекта. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:7–28. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.01>

Введение

Реализация проекта БН-1200 отвечает «Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года» [1] (далее Стратегия) в аспекте создания двухкомпонентной ядерной энергетической системы (ЯЭС) на базе быстрых и тепловых реакторов нового поколения в обеспечение устойчивого топливообеспечения, обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами [2 – 9].

В проекте БН-1200 (БН – быстрый натриевый) применены референтные технические решения, хорошо показавшие себя при эксплуатации энергоблоков БН-600 и БН-800, а также новые технические решения [4 – 11].

Для подтверждения правильности выбора инновационных технических решений с учетом новизны по отношению к проектам-предшественникам условий эксплуатации энергоблока, ужесточения требований нормативной документации, требований повышения точности расчетного прогнозирования и в обеспечение конкурентоспособности проекта БН-1200 по технико-экономическим показателям в сравнении с перспективными реакторными технологиями и альтернативными энергоисточниками проводится значительный объем НИОКР [7 – 14].

К настоящему времени разработаны технический проект реакторной установки (РУ), материалы анализа конкурентоспособности энергоблока (ЭБ), завершены основные обосновывающие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР). В апреле 2025 г. получена лицензия на размещение ЭБ № 5 с РУ БН-1200 (вариант проектного решения для площадки Белоярской атомной электростанции). Проводятся инженерные изыскания, разрабатываются проект энергоблока, отчет по обоснованию безопасности (ООБ) на стадии сооружения, вероятностные анализы безопасности: ВАБ-1 и ВАБ-2.

Ключевое событие Дорожной карты реализации проекта – физический пуск в 2034 г. обуславливает высокую значимость задачи завершения подтверждающих НИОКР до 2030 г. и, как следствие, форсирования их проведения, поскольку их результаты необходимы для завершения разработки ООБ, изготовления топливной загрузки и изготовления оборудования РУ.

Основные направления НИОКР, выполняемых в настоящее время, включают в себя обоснование новых технических решений по оборудованию и системам РУ (пробковый индикатор, система аварийного отвода тепла (САОТ), парогенератор (ПГ)), активной зоне и ее компонентам, новым конструкционным материалам и их сварным соединениям, ядерной и радиационной безопасности.

НИОКР обусловили необходимость модернизации имеющейся и разработки новой стендовой базы, непрерывной работы по совершенствованию и валидации расчет-

ных программ, подходов при расчетном и экспериментальном моделировании, при конструировании и реализации проекта на всех стадиях его жизненного цикла.

Результаты разработки технологий изготовления металлопродукции, топливных композиций, элементов оборудования обеспечивают задел для развития производства на российских предприятиях при реализации серийных энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах (РБН).

Требования к проекту и состояние его разработки как постановка задач для НИОКР

Технологии натриевого теплоносителя, топливных и конструкционных материалов, эксплуатации и ремонта оборудования реактора последовательно отрабатываются при эксплуатации исследовательских и промышленных реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН) [2 – 7, 10, 14, 15]. За почти семь десятилетий эксплуатации реакторов типа БН различного назначения (более 150-ти реакторо-лет) создана проектно-конструкторская, научно-исследовательская, производственная и эксплуатационная инфраструктура, что стало основой для дальнейшего развития направления:

- освоена технология натриевого теплоносителя;
- разработаны и обоснованы конструкционные материалы в обеспечение ресурса основного оборудования до 60-ти лет (парогенератора до 30-ти лет);
- отработаны технологии изготовления, эксплуатации и ремонта оборудования РУ;
- получен опыт эксплуатации твэлов с разными видами топлива (основные – урановое оксидное (до 14,8% т.а.), смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (до ~12% т.а.), урановое и смешанное уран-плутониевое нитридное топливо (до 8,2% т.а.);
- отработана интегральная компоновка реактора;
- отработана конструкция прямотрубных парогенераторов;
- отработана транспортно-технологическая часть.

В настоящее время Россия имеет в парке ядерных энергоблоков наибольшее в мире количество реакторов БН. Это действующий исследовательский реактор БОР-60 и реакторы БН промышленного уровня мощности – БН-600 и БН-800. Их назначение – не только генерация электроэнергии в регионе, но и обеспечение ресурсного обоснования новых конструкционных материалов (КМ) и видов топлива, освоение технологий замыкания ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Опыт эксплуатации реактора БН-600 в течение 45-ти лет и БН-800 около 10-ти лет обусловил готовность технологии быстрых натриевых реакторов к коммерческому освоению в двухкомпонентной ЯЭС, создание которой определено в Стратегии.

Результаты анализа Стратегии в контексте «организации скоординированного стратегического планирования отрасли в ближнесрочном, среднесрочном и долгосрочном периодах» с учетом целей развития ядерной энергетики (ЯЭ) демонстрируют корреляцию между разрабатываемыми проектами РБН большой мощности и сроками их реализации согласно Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 г., утвержденной в 2024 г. правительством России. В части коммерческого БН цели и требования к проекту в зависимости от стадии реализации Стратегии [1] представлены в табл. 1.

Требования к проекту БН-1200 из положений Стратегии

Объект	Срок	Цели	Требования к проекту
АЭС большой мощности с РБН (Поколение IV) и замкнутым ЯТЦ для их дальнейшего тиражирования	2035	Экономическая конкурентоспособность. Референтность технологических решений. Двухкомпонентность в аспекте сочетания с реакторами на тепловых нейтронах	Экономическая конкурентоспособность по отношению к ВВЭР-ТОИ (в перспективе 2030 г.) и с альтернативной генерацией. Обоснованность технических решений в ходе НИОКР. Обеспечение использования плутония и МА из ОЯТ ВВЭР и БН
Развитие мощностей ЯЭ	2050	Достижение доли не менее 25% в общей генерации электроэнергии к 2045 г.	Надежная эксплуатация в составе ЯЭС и тиражирование при условии подтверждения конкурентоспособности
ЯЭС	2100	Надежная топливообеспеченность развития ЯЭ	Надежная эксплуатация и гарантированное топливообеспечение всех компонентов ЯЭС

Следует отметить, что в Стратегии определено, что «среднесрочная стратегия подчинена задачам топливообеспечения дальнесрочных целей и опирается на двухкомпонентную ЯЭ с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах».

Проект БН-1200, разрабатываемый в настоящее время с учетом результатов разработки, эксплуатации, снятия с эксплуатации реакторов БН-350, БН-600, на уровне заложенных в Техническом задании (ТЗ) на РУ и ТЗ на ЭБ требований отвечает целям Стратегии и направлен на достижение следующих основных целевых показателей [4]:

- по безопасности – 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;
- по надежности – обеспечение назначенного срока службы основного оборудования – не менее 60-ти лет, КИУМ – не менее 0,9;
- по экономике – удельная металлоемкость РУ – не более 5,7 т/МВт(э); удельная приведенная стоимость электроэнергии (LCOE) – 2,35 руб/кВт·ч (цены 2017 г.); КПД брутто не менее 43%;
- по экологичности – компактно размещенное декарбонизированное производство электроэнергии, замыкание ЯТЦ, включая выжигание минорных актинидов (МА).

В настоящее время определены более жесткие требования к оборудованию и системам ЭБ и РУ и подходы при их разработке, определяющие из которых максимальная ориентация на пассивный принцип действия систем безопасности с учетом функционирования в условиях повышенных температур, минимизация мощности системы аварийного электроснабжения и сокращение стоимости сооружения.

В проекте заложено использование смешанного уран-плутониевого топлива на основе плутония из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Физические особенности активной зоны реактора БН-1200 обеспечивают возможность расширенного воспроизводства плутония и использования плутония различного изотопного состава из ОЯТ БН и ВВЭР, фактически «всеядности» по топливу с плутонием различного изотопного состава, «облагораживания» и «са-

мооблагораживания» плутония при облучении в реакторе БН для его последующего использования в ВВЭР-С и запуска других БН, что определяет потенциал удовлетворения системных требований по эффективному топливообеспечению для обоих типов реакторов [5, 16, 17]. В процессе облучения в БН-1200 с боковым экраном исходный изотопный состав плутония изменяется в сторону наилучшего из возможных равновесных составов, что не только улучшает изотопный состав плутония и минимизирует его количество в самом реакторе БН, но также обеспечивает дополнительные рециклы рефабрицированного топлива в ВВЭР-С.

В проекте БН-1200 применены референтные технические решения, хорошо показавшие себя при эксплуатации энергоблоков БН-600 и БН-800, а также новые технические решения. Изменения системных требований, в первую очередь в части технико-экономических показателей, что, в частности, зафиксировано в Решении по проектной деятельности об организации работ по проекту, диктуют постоянное развитие проекта.

Ключевые технологические развилки проекта пройдены на стадии разработки базового проекта БН-1200 к 2015 г. Начиная с 2016 г. проведена дальнейшая оптимизация технических решений для повышения конкурентоспособности проекта по отношению к перспективным ВВЭР и альтернативной электрогенерации [2]. В таблице 2 представлены некоторые базовые технические решения, которые задали облик проекта РУ, уровень безопасности и технико-экономические показатели (по отношению к БН-800).

Таблица 2

Некоторые базовые технические решения

Мощность реактора	Не менее 2800 МВт(т) / 1200 МВт (э)
Конструкция реактора	Полное интегрирование в корпусе реактора систем и оборудования первого контура
Компоновка реактора	Четырехпетлевая схема
Основные типоразмеры ТВС и твэл	ТВС с увеличенным размером «под ключ» и твэл увеличенного диаметра
Тип топлива	Смешанное уран-плутониевое топливо
Принцип срабатывания температурочувствительной пассивной защиты активной зоны	Исполнение на основе плавкого элемента
САОТ	Непосредственно подключена к реактору
Оптимизация ГЦН-1	Сокращение элементов системы маслоснабжения
Оптимизация ХЛ-1	Увеличенная емкость
Компоновка второго контура	Идентичные петли
Парогенератор	Корпусный, крупно-модульный
Способ компенсации температурных перемещений трубопроводов второго контура	Использование сильфонных компенсаторов
Оптимизация ГЦН-2	Сокращение элементов системы маслоснабжения
Оптимизация ХЛ-2	Увеличенная емкость
Схема обращения с отработавшими ТВС	Отказ от барабана отработавших сборок вследствие увеличения внутриреакторного хранилища
Эlevator	Вертикальный эlevator

Необходимо отметить, что одна из ключевых позиций вклада ЯЭ в достижение национальных целей развития Российской Федерации и целей устойчивого развития согласно Стратегии – «осуществление деятельности по достижению научно-технологического лидерства в области технологий ЯЭ за счет реализации фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ, а также внедрения современных цифровых решений», чему отвечает развитие проекта БН-1200 и Программа НИОКР в его обоснование.

Требования Стратегии, этапы сооружения ЭБ № 5 Белоярской АЭС, требования ТЗ на РУ, ТЗ на ЭБ и Решения по проектной деятельности, принятые технические решения по конструкции оборудования и систем, их компоновке определили перечень НИОКР по их дальнейшему обоснованию и по модернизации стендовой базы.

Обоснование технических решений по активной зоне и ее компонентам

Технические решения по активной зоне (а.з.) и ее компонентам (рис. 1), примененные в БН-1200, существенно улучшили ее характеристики [3 – 5, 7, 10, 15] по сравнению с БН-800 (табл. 3) и предопределили перечень основных НИОКР по активной зоне. Увеличение кампании тепловыделяющих сборок (ТВС), снижение годового потребления тепловыделяющих элементов и ТВС обеспечили существенное снижение топливной составляющей стоимости.

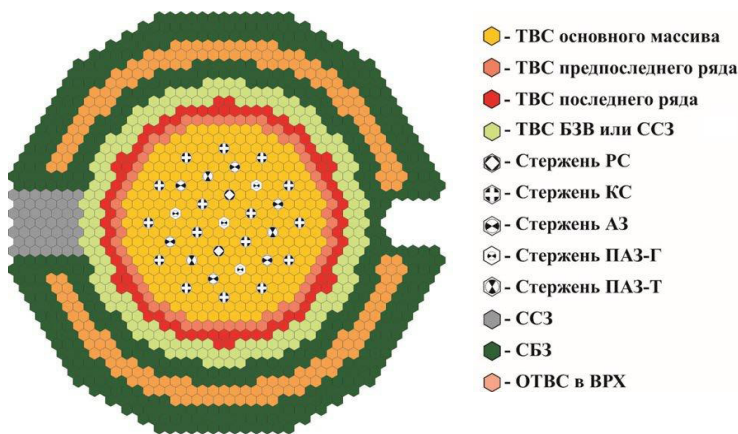


Рис. 1. Поперечное сечение активной зоны

Изучение основных нейтронно-физических характеристик активной зоны со СНУП-и МОКС-топливом, малым отношением высоты к диаметру активной зоны, достаточно высокой интерференцией стержней, неопределенностями многопозиционной системы контроля нейтронного потока последовательно проводится при ее моделировании на вновь создаваемых критических сборках уникального стенда БФС-2 (введен в эксплуатацию в 1969 г.). Выполняются экспериментальные исследования натриевого пустотного эффекта реактивности, радиального и аксиального распределения скоростей реакций деления реакторных нуклидов, спектральных индексов, эффективности и интерференции макетов органов СУЗ, плотности потока нейтронов по показаниям

Эффективность технических решений по активной зоне БН-1200 с МОКС-топливом

Техническое решение	Улучшенная характеристика	Эффективность БН-1200 по сравнению с БН-800*
Пониженная теплонапряженность а.з.	Микрокампания	Больше в два (3,2) раза
	Кампания	Больше в 2,7 (4,3) раза
	КИУМ	Больше на 5 (8)%
Укрупнение твэлов и ТВС	Удельное число ТВС в а.з.	Меньше в два раза
	Годовое потребление ТВС	Меньше в 5,7 (8,9) раза
	Годовое потребление твэлов	Меньше в 2,7 (4,2) раза
Гетерогенная компоновка топливного сердечника	Снижение запаса на реактивность	Меньше в три раза
Увеличение объема ВРХ	Соотношение количества ячеек ВРХ и ячеек а.з.	Больше в ~1,5 раза БОС исключен
Использование на периферии а.з. сборок борной защиты с исключением внутрикорпусной защиты	Масса внутриреакторной защиты	Меньше в 30,7 раз

* На начальном (на перспективном) этапе эксплуатации

нейтронных детекторов, расположенных на разных позициях критической сборки, эффективной доли запаздывающих нейтронов. Расчетное обоснование характеристик проводится перед и после экспериментов в ходе прецизионных расчетов методом Монте-Карло и инженерных расчетов при использовании математических моделей критических сборок, характеризующихся высокой гетерогенностью.

Особенности топливной композиции, в первую очередь применение смешанного уран-плутониевого топлива (СНУП- или МОКС-топливо), новых конструкционных материалов аустенитного и феррито-мартенситного класса для оболочек твэлов, укрупнение диаметра твэла, изменение компоновки топливного сердечника, глубокое выгорание топлива потребовали разработки технологии изготовления твэлов и их комплектующих нового типоразмера, проведения многолетних реакторных испытаний в действующем реакторе БН-600. В связи с принятым в 2025 г. решением по выбору МОКС-топлива для головного блока БН-1200 актуальным является проведение реакторных испытаний в обоснование работоспособности сборок с МОКС-топливом и аксиальной прослойкой из обедненного урана. В обеспечение пуска БН-1200 и с учетом выбранного типа топлива для стартовой загрузки в первой половине тридцатых годов запланировано завершить серию реакторных испытаний экспериментальных ТВС (ЭТВС) с МОКС-топливом до максимальных выгораний и повреждающей дозы на ~ 20% выше, чем в БН-800.

Введение в проект дополнительной пассивной аварийной защиты температурного принципа действия определило кропотливую работу по подбору специальных плавких материалов, выбору работоспособной конструкции устройства самосрабатывающего температурного (УС-Т) с проведением комплекса расчетных и экспериментальных исследований на вновь созданных рабочих участках на воздухе и в натрии. Специфика выбора материала срабатывания и конструктивного исполнения определяется

высокой требуемой скоростью срабатывания, высокой температурой срабатывания и обеспечением стойкости в натриевом теплоносителе.

Эксперименты обеспечены стендовой базой для обоснования нейтронно-физических, теплогидравлических, прочностных характеристик, конструктивного исполнения УС-Т, сборок активной зоны. Необходимо отметить, что принципиальных изменений стендов под задачи активной зоны не требуется.

По мере повышения внимания к топливообеспечению реактора для его старта и работы в начальный период повышенного внимания требуют нюансы, связанные с «всеядностью» реактора в части изотопного состава плутония. Для стартовой загрузки, когда в наибольшей степени сосредотачиваются все неопределенности в характеристиках активной зоны и ее топливообеспечения, признано желательным – ориентироваться на подбор наиболее стабильных составов плутония и необходимым – оценить масштаб дополнительных неопределенностей в запасе реактивности, которые могут явиться следствием распада нестабильных изотопов плутония за время возможного внепланового смещения момента пуска реактора.

Открытым для проработки является вопрос подготовки к физпуску, запланированному в 2034 г. Действующая нормативная документация оставляет неопределенности в регламентации этой процедуры. С одной стороны, физпуск относят к компетенции эксплуатирующей организации на стадии подготовки к пуску реактора. С другой стороны, обоснование безопасности и достаточной представительности соответствующих измерений может быть выполнено только разработчиками проекта РУ. Данное обоснование уместно в составе НИОКР по активной зоне. Работы по некоторым частным техническим вопросам с учетом особенностей конструкции активной зоны предусмотрены и проводятся, но в целом концептуальные вопросы физического пуска требуют внимания. Имеющийся опыт энергоблока с РУ БН-800 позволяет провести «работу над ошибками» и оптимизировать как стадию его подготовки, так и мероприятия при его проведении.

Обоснование технических решений по оборудованию и системам первого и второго контуров

При переходе от БН-800 к БН-1200 разработчики отошли от прямого масштабирования технических решений по конструкции и компоновке, поскольку такой подход не отвечает решению задачи существенного повышения безопасности и улучшения экономических показателей (определяет порядка 20%-е превышение капитальных затрат на АЭС-2006). Основные технические решения, принятые в проекте и определяющие безопасность и экономику проекта, а также направления НИОКР, приведены в табл. 4.

В проекте БН-1200 оборудование первого контура, включая холодную ловушку (ХЛ-1), полностью интегрировано в блок корпусов реактора, который состоит из основного и страховочного корпусов (рис. 2) [4, 7, 10]. Интегральный реактор формирует петлевую компоновку второго контура (рис. 3). Интегральная компоновка первого контура с локализацией всего радиоактивного натрия внутри основного корпуса реактора исключает внешние трубопроводы с радиоактивным натрием, максимально снижает вероятность его выхода за пределы первого контура.

Сравнение основных технических характеристик реакторных установок типа БН

Технические характеристики	БН-800	БН-1200	Направления НИОКР по БН-1200
Мощность тепловая/электрическая, отн. ед.	1 / 1	1,33 / 1,38	Активная зона и ее компоненты. Теплообменники и ПГ. Безопасность
Оборудование реактора (первого контура)	Частичное интегрирование в бак реактора*	Полное интегрирование в бак реактора	Оборудование и системы реактора. Конструкционные материалы
Число петель второго контура	3	4 (идентичные)	Оборудование и системы РУ
Число петель САОТ	3 (подключены ко второму контуру)	4 (подключены к первому контуру)	Оборудование и собственно САОТ
Число ПТО	2 на петлю	1 на петлю	ПТО
Число модулей ПГ	60	8	ПГ. Технология изготовления, ремонта, замены
Удельная металлоемкость, отн. ед.	1	0,54	Проработка конструктивных и компоновочных решений. Разработка и обоснование новых КМ. Сильфонные компенсаторы. Снятие консерватизма для теплообменников и САОТ
Срок службы, лет	45	60	Технологические НИОКР
КПД АЭС, отн. ед.	1	1,04	Проработка конструктивных и компоновочных решений.
КИУМ, отн. ед.	1	1,06	Обоснование КИУМ с учетом надежности оборудования и систем

* Оборудование и трубопроводы системы очистки натрия первого контура вне бака реактора.

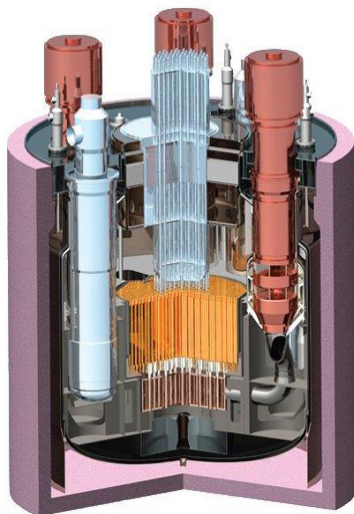


Рис. 2. Реактор. Первый контур

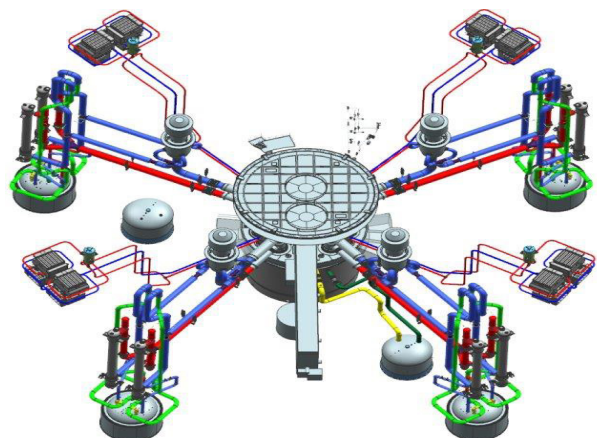


Рис. 3. Реакторная установка. Второй контур

В обеспечение данного решения были выполнены проработки элементов конструкции ХЛ-1 и НИОКР, включая конструкторские, расчетные и экспериментальные исследования макетного образца ХЛ на натриевом стенде, ХЛ с ЭМН и ЭМНД.

Во втором контуре на натриевых трубопроводах применены сильфонные компенсаторы и страховочные кожухи в пределах надреакторного помещения, что в совокупности с сокращением протяженности трубопроводов второго контура по сравнению с проектом БН-800 существенно снижает вероятность течей натрия [3].

В ходе НИОКР отработана технология изготовления и обоснована работоспособность сильфонных компенсаторов, блочной съемной тепловой изоляции.

Необходимо отметить, что размещение первичной защиты в активной зоне определило снижение нейтронного потока на внутрикорпусные конструкции, увеличение срока службы РУ до 60-ти лет, снижение металлоемкости защиты.

Оптимизация габаритных размеров и компоновочных решений по пробковому индикатору вследствие размещения в патрубке крыши корпуса реактора обусловило необходимость изготовления полногабаритного образца и проведение внереакторных испытаний. Полный комплекс работ по разработке, изготовлению опытного образца пробкового индикатора, включая циркуляционный насос, расходомер, вентиль-шайбу, холодильник и термодары, рабочего участка для его испытания, а также проведение испытаний запланированы в Программе НИОКР.

САОТ

Для повышения безопасности эксплуатации БН-1200 система аварийного отвода тепла (САОТ) подключена непосредственно к баку реактора, применен прямой отвод тепла через погруженные в бак реактора автономные теплообменники (АТО) [4, 10].

Технические решения по САОТ были направлены как на повышение безопасности (обеспечение эффективного расхолаживания с обеспечением естественной циркуляции теплоносителя во всех контурах САОТ, применение шибера ВТО пассивного принципа), так и на улучшение технико-экономических показателей (оптимизация мощности, выбор способа расхолаживания). В результате оптимизированы расположение САОТ, мощность петель, снижена масса системы, обоснована ее эффективность. К 2025 г. проведен большой комплекс расчетных и экспериментальных исследований в обоснование эффективности САОТ.

Работоспособность САОТ и его ключевых элементов обоснована в ходе экспериментов, а также при проведении расчетов по проектным и CFD-кодам, которые планируется продолжить. Полномасштабный опытный образец шибера испытан на воздухе. При этом выполненные исследования с использованием теплогидравлической модели сектора реактора и промежуточного контура одной петли САОТ на вновь созданном и оснащенном современной аппаратурой структуроподобном стенде ТИСЕЙ обеспечивают валидацию расчетных программ, используемых в проекте, в частности, FlowVision.

Дополнительно к уже существующим стендам может быть предложено создание нового натриевого стенда для испытаний крупномасштабного оборудования и для замены вырабатывающих свой ресурс стендов. Оптимизация технико-экономических показателей вновь разрабатываемого стенда решается в настоящее время при разработке стенда ФЕНИКС.

Главные циркуляционные насосы

С применением CFD-кодов проведены оптимизационные расчеты по выбору вариантов проточных частей насосов, удовлетворяющих нормальной кавитационно-эрозионной работе и высоким ресурсным характеристикам. Выполнены экспериментальные работы в подтверждение характеристик ГЦН и для валидации CFD-кодов. По результатам испытаний моделей насосов ГЦН-1, ГЦН-2 с модернизированными проточными частями подтверждены их гидравлические и кавитационные характеристики, выбраны упрочняющие покрытия и обеспечено увеличение ресурсных характеристик рабочего колеса. На испытательном стенде подтверждена работоспособность полномасштабных макетов уплотнения вала по газу [4, 10]. Обоснован материал уплотняющих колец. По результатам испытаний опытного образца обоснована конструкция расходомерного устройства для ГЦН-1.

На вновь созданном рабочем участке стенда завершены ОКР в обоснование конструкции, включая испытания полномасштабного макета верхнего подшипникового узла. В результате улучшены архитектурно-строительные решения за счет существенного сокращения обеспечивающего оборудования.

Парогенератор

Переход от традиционных секционно-модульных ПГ, примененных и отработанных в проектах-предшественниках (БН-600 и БН-800), к крупно-модульному исполнению ПГ определил существенное улучшение технико-экономических показателей и по материалоемкости (в 1,7 раз меньше, чем для БН-800), и по строительным объемам (в основном, за счет переноса ПГ из обстройки в реакторное отделение) обеспечено отношение площади БН-1200 к БН-800, меньшее в 2,4 раза.

В рамках расчетных (по проектным и CFD-кодам) и экспериментальных исследований, изготовления моделей элементов конструкции ПГ обосновываются конструктивное исполнение, технология изготовления и ремонта элементов ПГ, характеристики гидродинамических процессов в модулях парогенератора и оборудовании второго натриевого контура РУ, параметры малых и больших течей с разработкой и обоснованием подходов для их обнаружения [4, 8, 10].

Значительное увеличение размеров модуля ПГ требует более детальных исследований по обеспечению водородной безопасности и дополнительного углубленного анализа. В рамках проекта разработана связка аттестованного LP-кода Купол-БН и CFD-кода FlowVision.

Программа НИОКР в обоснование работоспособности ПГ в представленной редакции не содержит испытания прототипа системы защиты парогенератора, что, в частности, может быть реализовано на новом натриевом стенде.

Система перегрузки

Конструкция элементов системы перегрузки во многом референтна. Тем не менее, применение вертикального элеватора, новой машины перегрузочной, разделение бокса перегрузочного на два отделения определило снижение массы оборудования

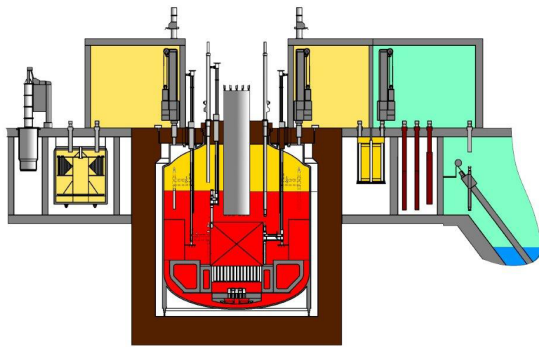


Рис. 4. Система перегрузки

внутриреакторной и вне реакторной перегрузки и сокращение строительных объемов (рис. 4) [4, 8, 10]. В ходе НИОКР обоснованы решения по спецстройству L-образного типа, вертикальному элеватору, задвижке шиберной перегрузочного канала реактора, ванне и ножа гидрозатвора большой поворотной пробки, цепесборнику и опоре поворотной.

Обоснование безопасности и обеспечение аттестации расчетных программ

Проект БН-1200 разработан в соответствии с требованиями действующих российских нормативных документов в области безопасности объектов использования атомной энергии. При проектировании используются как детерминистический, так и вероятностный подходы к анализу безопасности [4, 5, 10]. Такая концепция соответствует подходам МАГАТЭ с учетом уроков аварии на АЭС Фукусима.

В обоснование безопасности и в обеспечение валидации и аттестации расчетных программ

- выполнены расчеты режимов НЭ и ННЭ, уточненные расчеты тяжелых аварий ULOF, УТОР и ТИВ с использованием кода нового поколения ЕВКЛИД для двух вариантов активной зоны с МОКС- и СНУП-топливом;
- получены результаты расчетного анализа в обоснование стабильности нейтронных полей в активной зоне, а также неопределенностей расчета нейтронно-физических характеристик вследствие высокой интерференции стержней, применения многопозиционной системы контроля нейтронного потока;
- выполняются расчетные и экспериментальные исследования в обоснование водородной безопасности, включая конструктивные проработки по системе аварийной защиты парогенератора, исследования в обоснование безопасности при малых, промежуточных и больших течах воды в натрий;
- расширяется функционал и валидируются расчетные программы COREMELT, СОКРАТ-БН, ЕВКЛИД, BURAN, КУПОЛ-БН, FlowVision.

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.

Достигнуто снижение вероятности тяжелого повреждения активной зоны для внутренних событий при работе реактора БН-1200 на мощности, которое ниже соответствующих величин для БН-600 и БН-800.

Дефицит экспериментальных данных для верификации тяжелоаварийных кодов определяется трудностями моделирования аварийных процессов, применением в реакторах БН нового поколения перспективного топлива (смешанное уран-плуто-

ниевое – как нитридное, так и оксидное) и конструкционных материалов. Разработка программы НИОКР для верификации расчетных кодов в части анализа тяжелых аварий выполнена с учетом возможностей имеющейся стендовой базы, планируемого ввода в эксплуатацию экспериментального реактора МБИР и сооружения новых стендов (при необходимости).

Технологические НИОКР

Одно из ключевых событий в обеспечении физического пуска – начало монтажа корпуса реактора и оборудования длительного цикла изготовления, риски реализации которого обуславливают форсирование работ по аттестации новых конструкционных материалов и сварных соединений.

В рамках проекта технологические НИОКР выполняются в обеспечение освоения нового сортамента для изготовления трубопроводов САОТ, модулей ПГ, ВТО и удовлетворения требованиям Ростехнадзора по обязательному введению конструкционных материалов и сварных соединений в Сводный перечень документов по стандартизации новых материалов и сварных соединений.

Технико-экономические показатели как результат разработок проекта

Полученные в результате многокритериального анализа, в том числе с использованием инструментов GIF и ИНПРО, показатели ЯЭС с ЭБ БН-1200 позволили сделать вывод о потенциале ее конкурентоспособности по отношению не только к перспективным ядерным энергоблокам, но и к ПГУ, а также ВИЭ.

В дальнейшем в результате выполненных к сентябрю 2021 г. разработок получено, что РУ БН-1200 в принятых конструктивных решениях и компоновке обеспечивает конкурентоспособность ЭБ № 5 Белоярской АЭС и двухблочной АЭС по показателю LCOE по сравнению с ПГУ и ВВЭР-ТОИ [4, 5, 10].

При этом существует потенциал улучшения технико-экономических показателей в части эксплуатационной и топливной составляющей стоимости как результат внедрения в проект дополнительных технических решений, в частности, увеличение мощности РУ до 1250 МВт(э), назначенного срока службы ЭБ с 60-ти до 80-ти лет, КИУМ с 0,9 до 0,91, назначенного срока службы ПГ с 30-ти до 60-ти лет, изменение конструкции стержней СУЗ и увеличение их ресурса, многофункциональное использование ТВС боковой зоны воспроизводства [9], увеличение кампании топлива.

Весьма важным для корректной оценки технико-экономических показателей отдельного блока типа БН-1200 (и пока не нашедшим должного отражения в программе НИОКР) является учет его влияния на системную эффективность замыкания ЯТЦ двухкомпонентной ядерной энергетики, посредством

- внедрения уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах, а затем и в тепловых реакторах;
- создания единого ЗЯТЦ;
- гомогенной и гетерогенной утилизации долгоживущих МА от тепловых и быстрых реакторов;

- переработки ОЯТ и утилизации РАО от зарубежных блоков;
- производства энергетических, технологических и медицинских изотопов;
- неэлектрического применения ядерной энергии.

Таким образом, быстрый натриевый реактор – это не просто конкурентоспособный производитель электроэнергии, но и фундамент топливообеспечения всей будущей системы ЯЭ и утилизатор долгоживущих отходов ЯЭ.

Цифровизация

Расчетная платформа

Расчетная платформа для обоснования проекта РУ БН-1200 объединяет проектные коды, коды нового поколения и коммерческие коды [18].

С учетом высокого уровня освоенности технологии реакторов БН большинство расчетных кодов (проектные коды) разработаны, успешно использовались при обосновании проектных решений и безопасности установок БН-600 и БН-800, верифицированы, часть из них аттестована. Проектные коды обеспечивают оперативные оценки при обосновании проекта РУ по направлениям нейтронная физика, теплогидравлика, радиационные характеристики, прочность, вероятностный анализ, однако характеризуются консерватизмом в используемых приближениях, что частично снимается использованием прецизионных кодов.

Инновационность проекта БН-1200 и все возрастающие требования к точности расчетов и эргономичности интерфейса кодов определяют необходимость модернизации части проектных кодов, применения CFD-кодов, а также создания кодов нового поколения, в которых основной упор сделан на адекватном мультифизическом разномасштабном моделировании, что позволяет повысить предсказательную способность кодов. Для уточнения расчетных теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик реакторной установки все более широко используются интегральные программные средства, разработанные в проекте «Коды нового поколения» – СОКРАТ-БН, ЕВКЛИД. При этом выполняется комплексный анализ динамических процессов, включающий в себя нейтронную кинетику, теплогидравлику, термомеханику твэлов, кипение натрия, плавление и перемещение топлива, образование вторичной критичности, выход продуктов деления из топлива и их перенос в технологических системах первого контура и в помещениях энергоблока, включая выброс в окружающую среду. Использование современных CFD-кодов и высокопроизводительных кластерных вычислительных систем позволит приблизить вычислительный эксперимент к натурному. Однако для замены натурального эксперимента вычислительным при проектировании и оптимизации параметров РУ важным является вопрос проверки (верификации) этих кодов на предмет адекватности реализованных в них моделей реальным физическим процессам.

Информационные технологии

Начиная с 2013 г. в проекте БН-1200 ведется полномасштабное внедрение современных технологий информационной поддержки изделия [10].

Среди основных целей работ определены

- организация единого информационного пространства проекта энергоблока;

- внедрение и сопровождение технологии коллективного параллельного 3D-конструирования при разработке проектов оборудования и систем реакторной установки;
- реализация технологии комплексного использования информации, содержащейся в электронной модели изделия, для решения различных прикладных задач, стоящих в проекте;
- применение системы управления требованиями технических заданий с целью автоматизации контроля за ходом разработки и обоснования проекта, а также исключения коллизий при разработке проекта.

Технология коллективного параллельного 3D-конструирования в проекте БН-1200 позволяет объединить усилия команды разработчиков, работающих над компонентами реакторной установки, соблюсти заданные проектом сжатые сроки разработки, повысить глубину проработки за счет применения методов многовариантного анализа, существенно образом снизить количество ошибок в конструкции изделия и в целом повысить качество проектных решений.

Решение различных прикладных задач, требующих разной степени детализации данных (выявление коллизий, расчетное обоснование конструкции, конструкторско-технологическая подготовка производства и разработка программ для станков с ЧПУ, выпуск чертежей и спецификаций, создание интерактивных электронных технических руководств, контроль процесса конструирования и др.) осуществляется не дублированием данных, а созданием различных сценариев использования базовой конструкторской модели на основе прямых ассоциативных связей.

На рисунке 5 показана схема применения технологии комплексного использования информации, содержащейся в электронной модели изделия в проекте.

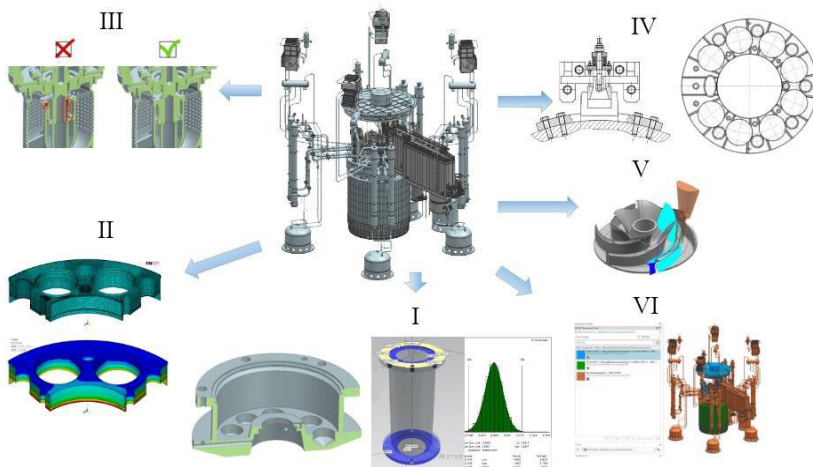


Рис. 5. Применение технологии комплексного использования информации, содержащейся в электронной модели изделия: I – изготовление на базе цифрового макета изделия (перспектива); II – расчетный анализ; III – выявление коллизий; IV – выпуск 2D-документации (конструкторской); V – управляющая программа для станков с числовым программным управлением; VI – контроль процесса

Инженерный тест-симулятор

Очередным шагом на пути к цифровизации стала разработка и верификация комплексной электронной математической модели энергоблока с реакторной установкой

БН-1200 для моделирования режимов работы энергоблока, комплексных сценариев развития аварийных ситуаций, проверки функций оператора, эргономики на виртуальном блочном пульте управления, интерфейса человека и машины.

Подготовлена версия инженерного тест-симулятора и проект его установки на компьютерный стенд. Тестирование тест-симулятора выполнено в уникальных для РУ БН режимах: режимах ОПрЧ с снижением и повышением выдаваемой первичной мощности, режиме участия ЭБ в регулировочном диапазоне нагрузок, режиме срабатывания ПЗ «Отключение оборудования третьего контура».

Заключение

Успешная многолетняя эксплуатация реакторов БН-600, БН-800 и результаты становления натриевой технологии определили высокую готовность к реализации проекта коммерческого энергоблока с РУ БН-1200.

Изменения системных требований, в первую очередь в части технико-экономических показателей, обуславливают развитие проекта БН-1200, включающее в себя разработку новых конструктивных и компоновочных решений, подходов при расчетном и экспериментальном их обосновании, при определении топливной загрузки, моделировании топливных циклов, проработок направлений неэнергетического использования энергоблока с реактором БН.

Большой объем многоплановых НИОКР определяется новизной технических решений по оборудованию и системам РУ, условий эксплуатации энергоблока, ужесточением требований нормативной документации Российской Федерации и международной, а также стадией разработки проекта и включает в себя расчетные и экспериментальные исследования при моделировании физических процессов в обоснование оборудования, элементов конструкции, реакторной установки и энергоблока в целом.

Инновационность проекта БН-1200 и все возрастающие требования к точности расчетов и эргономичности интерфейса кодов определяют модернизацию части проектных кодов, применение, в частности, CFD-теплогидравлических кодов, а также создание кодов нового поколения.

Созданная для обоснования технических решений проектов-предшественников стендовая база модернизируется в части появления новых рабочих участков в обеспечение испытаний на натрии, на воздухе и на воде.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований, прообраз цифрового двойника на основе комплексной электронной математической модели энергоблока, статус аттестации ПС, опыт эксплуатации реакторов-предшественников обеспечивают высокий уровень технологической готовности проекта РУ.

Проект БН-1200 демонстрирует потенциал достижения технико-экономических показателей на уровне показателей альтернативной электрогенерации с учетом всех затрат на всех этапах жизненного цикла электростанций.

Реализация проекта БН-1200 отвечает Стратегии развития ядерной энергетики России по созданию двухкомпонентной ЯЭС на базе быстрых и тепловых реакторов с замкнутым ЯТЦ, определяет потенциал обеспечения энергетической безопасности и устойчивого развития атомной энергетики, отвечает концепции достижения углеродной нейтральности в области энергетики, что обуславливает устойчивое

развитие экономики страны в целом, гарантированное топливообеспечение, снижение экологического обременения при обращении с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, обеспечение экономической конкурентоспособности по отношению к другим видам электрогенерации, расширение отраслевого бизнеса и сохранение мирового технологического лидерства России в области реакторов БН.

Финансирование

Работы выполнялись при финансовой поддержке Госкорпорации «Росатом».

Литература

1. Стратегия-2021: Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года. Москва, 2023.

2. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М., Багдасаров Ю.Е., Васильев Б.А., Каманин Ю.Л., Осипов С.Л., Кузавков Н.Г., Ершов В.Н., Аширметов М.Р. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200. *Атомная энергия*. 2010;108(4):201–205. EDN: LRGPND.

3. Поплавский В.М., Цибуля А.М., Хомяков Ю.С., Матвеев В.И., Елисеев В.А., Цикунов А.Г., Васильев Б.А., Белов С.А., Фаракин М.Р. Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора. *Атомная энергия*. 2010;108(4):206–211. EDN: LRGPXH.

4. Васяев А.В., Керекеша А.В., Крюков А.Н., Марова Е.В., Носов Ю.В., Рогожкин С.А., Сидоров И.И., Смелов А.Ю., Шепелев С.Ф. Проект реакторной установки БН-1200М для реализации в составе энергоблока № 5 Белоярской атомной электростанции. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:28–44. DOI: <https://doi.org/10.26583/jpre.2025.3.02>

5. Babushkin S.V., Vasiliev B.A., Vasyaev A.V., Vorontsov V.E., Dushev S.A., Zverev D.L., Kiryushin A.I., Marova E.V., Sedakov V.Yu., Staroverov A.I., Timofeev A.V., Shepelev S.F. Reactor installations with sodium-cooled fast reactors for two-component nuclear energy. *Atomic Energy*. 2020;129(1):8–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00705-y>

6. Ашурко Ю.М., Гулевич А.В., Клинов Д.А., Васильев Б.А., Васяев А.В., Марова Е.В., Шепелев С.Ф. Реализация критериев для реакторных систем четвертого поколения в проекте БН-1200. *Атомная энергия*. 2018;125(6):351–358. EDN: BBHGVF.

7. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами (под общей редакцией проф. Е.О. Адамова). Москва, 2020, с. 330–342, с. 358–374.

8. Г.Н. Кодочигов, Н.Г. Кодочигов, И.В. Маров, Е.В. Марова, А.М. Маслов, В.В. Петрунин, С.Ф. Шепелев. Физико-технические основы перспектив развития ядерно-энергетической системы России. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы*. 2024;4:5–15. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2024/issue2024-4-5-15.pdf> (дата обращения 15.06.2025). EDN: UYMEXK.

9. Кузина Ю.А., Троянов В.М., Гулевич А.В., Бурьевский И.В., Гурская О.С., Декусар В.М., Елисеев В.А., Коробейников В.В., Мосеев А.Л., Исанов К.А., Закиров Н.А., Шагинян Р.А. Пять функций быстрых натриевых реакторов в двухкомпонентной ядерной энергетике. Международная конференция МАГАТЭ FR-26 «Реакторы на быстрых нейтронах и соответствующие топливные циклы: от инноваций к внедрению», Пекин, 2026.

10. Васяев А.В., Зверев Д.Л., Керекеша А.В., Крюков А.Н., Марова Е.В., Рогожкин С.А., Фаракин М.Р., Шепелев С.Ф. Реакторная установка нового поколения БН-1200. Международная конференция МАГАТЭ FR-26 «Реакторы на быстрых нейтронах и соответствующие топливные циклы: от инноваций к внедрению», Пекин, 2026.

11. Керекеша А.В., Линьков С.П., Марова Е.В., Рогожкин С.А., Фаракин М.Р., Шепелев С.Ф. Новые технические решения в обеспечении безопасности в проекте БН-1200. Международная

конференция МАГАТЭ FR-26 «Реакторы на быстрых нейтронах и соответствующие топливные циклы: от инноваций к внедрению», Пекин, 2026.

12. Керекеша А.В., Крюков А.Н., Марова Е.В., Рогожкин С.А., Фарақшин М.Р., Шепелев С.Ф. НИОКР по РУ БН-1200. Международная конференция МАГАТЭ FR-26 «Реакторы на быстрых нейтронах и соответствующие топливные циклы: от инноваций к внедрению», Пекин, 2026.

13. Белов С.Б., Васильев Б.А., Радионьчева А.А., Фарақшин М.Р., Тучков А.М. Опыт использования активной зоны реактора БН-600 для целей экспериментального облучения. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:133–152. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.10>

14. Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Алексеев В.В., Денисова Н.А. Теплофизические исследования – фундамент использования натрия в современных реакторах на быстрых нейтронах. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:112–121. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.08>

15. Васильев А.В., Крюков А.Н., Фарақшин М.Р., Белов С.Б., Шеряков В.С., Кузнецов А.Е., Филин И.А. Использование МОКС-топлива в реакторе БН-800. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:45–59. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.03>

16. Алексеев П.Н., Баланин А.Л., Гулевич А.В., Декусар В.М., Егоров А.Ф., Клинов Д.А., Коробейников В.В., Марова Е.В., Маслов А.М., Мосеев А.Л., Невиница В.А., Теплов П.С., Троянов В.М., Фомиченко П.А., Шепелев С.Ф. Облик двухкомпонентной ядерной энергетической системы на базе ВВЭР и реакторов БН. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*, 2022;3:59–72. EDN: SERQAA. URL: <https://vant.ippe.ru/year2022/4/radiation-technologies/2243-6.html> (дата обращения 28.04.2026).

17. Белов С.Б., Володин Д.А., Гроль А.В., Котов Я.А., Куракин К.Ю., Марова Е.В., Невиница В.А., Павловичев А.М., Пидопригора Е.В., Смирнов А.Ю., Фарақшин М.Р., Фомиченко П.А., Щеренко А.И., Гулевич А.В., Декусар В.М., Елисеев В.А., Клинов Д.А. Влияние быстрого реактора на параметры материальных балансов легководнотеплового реактора в контексте продуктового направления «Сбалансированный ядерный топливный цикл». *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2022;3:83–92. URL: <https://vant.ippe.ru/year2022/3/radiation-technologies/2204-8.html> (дата обращения 28.04.2026).

18. Ашурко Ю.М., Марова Е.В., Мосунова Н.А., Осипов С.Л., Поплавский В.М., Стрижов В.Ф., Шепелев С.Ф. Расчетная платформа для обоснования проекта РУ БН-1200. 10-я Международная конференция (МНТК-2016), Москва, 2016.

Поступила в редакцию 07.05.2026

После доработки 12.05.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

Авторы

Гулевич Андрей Владиславович, начальник департамента физики реакторов, д.ф.-м.н., E-mail: avgulevich@ippe.ru

Камаев Алексей Альфредович, начальник департамента, к.т.н., E-mail: kamaev@ippe.ru

Керекеша Александр Владимирович, начальник отдела, AuthorID 1090249, E-mail: kereksha@okbm.nnov.ru

Крюков Александр Николаевич, заместитель главного конструктора РУ БН, SPIN-код 4619-8065, AuthorID 1280123 E-mail: ankrukov@okbm.nnov.ru

Кузина Юлия Альбертовна, начальник отделения ядерной энергетической, к.т.н., E-mail: ukyzina@ippe.ru

Марова Елена Викторовна, руководитель направления по НИОКР БН, к.т.н.,

Author ID 538379

E-mail: marova@okbm.nnov.ru

Маслов Андрей Михайлович, начальник бюро технического сопровождения НИОКР,

E-mail: maslov@okbm.nnov.ru

Перегудов Антон Александрович, начальник департамента расчетных исследований безопасности АЭС, к.т.н.,

E-mail: aperegudov@ippe.ru

Рогожкин Сергей Александрович, главный конструктор РУ БН, к.т.н., AuthorID 546880,

E-mail: rogozhkin@okbm.nnov.ru

Троянов Владимир Михайлович, научный руководитель, д.т.н.,

E-mail: vmtroyanov@ippe.ru

Фаракшин Мансур Рахимжанович, начальник отдела разработки активных зон реакторов БН, к.т.н., AuthorID 883340,

E-mail: farakshin@okbm.nnov.ru

Шепелев Сергей Федорович, советник генерального директора по РУ БН, к.т.н., AuthorID 882989,

E-mail: shepelev@okbm.nnov.ru

UDC 621.039.52

BN-1200 Reactor Plant R&D as a Foundation for the Project Implementation

Gulevich A.V.¹, Kamaev A.A.¹, Kerekasha A.V.², Kryukov A.N.², Kuzina Yu.A.¹, Marova E.V.², Maslov A.M.², Peregudov A.A.¹, Rogozhkin S.A.², Troyanov V.M.¹, Farakshin M.R.², Shepelev S.F.²

¹ IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

² Afrikantov OKBM JSC,

15 Burnakovsky proyezd, 603074 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

The goal is to present the state of justification of the design of a new 4th generation head commercial power unit with BN-1200M reactor at the Beloyarsk NPP site for the implementation of a two-component nuclear power system with a closed nuclear fuel cycle. The project BN-1200M use reference technical solutions that have shown themselves well during the operation of power units BN-600 and BN-800, and new technical solutions for equipment and systems of the reactor plant. For new technical solutions, a calculated and experimental justification are carried out of the core design, the performance of mixed uranium-plutonium fuel, the emergency heat removal system and its elements, main circulation pumps, cold traps, steam generator, refueling system elements, as well as operational safety, new structural materials, organization of the nuclear fuel cycle, etc. R&D results made it possible to justify new technical solutions, increase the level of safety, reliability and efficiency in relation to predecessor projects and promising energy sources, ensure the satisfaction of the system requirements for nuclear energy sources. The results of the work carried out laid the foundation for the commercial development of the technology of fast sodium reactor plants and the readiness of the design of the head power unit with the BN-1200M reactor plant for implementation as part of power unit No. 5 at the Beloyarsk nuclear power plant site.

Key words: BN-1200, fast neutron reactor with sodium coolant, nuclear fuel cycle closure, competitiveness, sodium coolant, research and development (R&D), substantiation of

technical solutions, reactor technology, reactor plant (RP), power unit, BN-800, BN-600, digitalization.

For citation: Gulevich A.V., Kamaev A.A., Kereksha A.V., Kryukov A.N., Kuzina Yu.A., Marova E.V., Maslov A.M., Peregodov A.A., Rogozhkin S.A., Troyanov V.M., Farakshin M.R., Shepelev S.F. BN-1200 Reactor Plant R&D as a Foundation for the Project Implementation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:7–28. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.01> (in Russian).

References

1. Strategy-2021: Strategy for the development of nuclear energy in Russia until 2050 and prospects for the period up to 2100. Moscow, 2023.
2. Rachkov V.I., Poplavskii V.M., Tsiulya A.M., Bagdasarov Y.E., Vasiliev B.A., Kamanin Y.L., Osipov S.L., Kuzavkov N.G., Ershov V.N., Ashimetov M.R. Concept of an Advanced Power-Generating Unit with a BN-1200 Sodium-Cooled Fast Reactor. *Atomic Energy*. 2010;108(4):254–259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9286-z>
3. Poplavskii V.M., Tsiulya A.M., Khomyakov Yu.S., Matveev V.I., Eliseev V.A., Tsikunov A.G., Vasil'ev B.A., Belov S.B., Farakshin M.R. Core and Fuel Cycle for an Advanced Sodium-Cooled Fast Reactor. *Atomic Energy*. 2010;108(4):260–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9287-y>
4. Vasiaev A.V., Kereksha A.V., Kryukov A.N., Marova E.V., Nosov Yu.V., Rogozhkin S.A., Sidorov I.I., Smelov A.Yu., Shepelev S.F. The Design of the BN-1200M Reactor Plant for Implementation as the Part of Power Unit No. 5 of the Beloyarsk Nuclear Power Plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:2025;3:28–44. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.02> (in Russian).
5. Babushkin S.V., Vasil'ev B.A., Vasyaev A.V., Vorontsov V.E., Dushev S.A., Zverev D.L., Kiryushin A.I., Marova E.V., Sedakov V.Y., Staroverov A.I., Timofeev A.V., Shepelev S.F. Reactor installations with sodium-cooled fast reactors for two-component nuclear energy. *Atomic Energy*. 2020;129(1):8–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00705-y>
6. Ashurko Y.M., Gulevich A.V., Klinov D.A., Vasil'ev B.A., Vasyaev A.V., Marova E.V., Shepelev S.F. Gen-IV reactor systems criteria implementation in BN-1200. *Atomic Energy*. 2019;125(6):351–358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00493-6>
7. Nuclear power white paper. Closed NFC with fast reactors (gen. edit. prof. E.O. Adamov, Moscow, 2020, p. 330–342, p. 358–374 (in Russian).
8. Kodochigov G.N., Kodochigov N.G., Marov I.V., Marova E.V., Maslov A.M., Petrunin V.V., Shepelev S.F. Physical and technical foundations of the prospects for the development of the nuclear energy system of Russia. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2024;4:5–15. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2024/issue2024-4-5-15.pdf> (accessed June 15, 2025). EDN: UYMEXK (in Russian).
9. Kuzina Yu.A., Troyanov V.M., Gulevich A.V., Buriensky I.V., Gurskaya O.S., Dekusar V.M., Eliseev V.A., Korobeinikov V.V., Moseev A.L., Isanov K.A., Zakirov N.A., Shaginyan R.A. Five functions of fast sodium reactors in two-component nuclear power. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR26): From Innovation to Implementation. 18–21 May 2026, Beijing, People's Republic of China.
10. Vasyaev A.V., Zverev D.L., Kereksha A.V., Kryukov A.N., Marova E.V., Rogozhkin S.A., Farakshin M.R., Shepelev S.F. BN-1200 new generation reactor plant. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR26): From Innovation to Implementation. 18–21 May 2026, Beijing, People's Republic of China.
11. Linkov S.P., Kereksha A.V., Marova E.V., Rogozhkin S.A., Farakshin M.R., Shepelev S.F. New Engineering Solutions to Secure Safety for the BN-1200 Project. International Conference on

Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR26): From Innovation to Implementation. 18–21 May 2026, Beijing, People's Republic of China.

12. Kereksha A.V., Kryukov A.N., Marova E.V., Rogozhkin S.A., Farakshin M.R., Shepelev S.F. BN-1200 reactor plant R&D. International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR26): From Innovation to Implementation. 18–21 May 2026, Beijing, People's Republic of China.

13. Belov S.B., Vasiliev B.A., Radionycheva A.A., Farakshin M.R., Tuchkov A.M. Experience of Using BN-600 Reactor Core for Experimental Irradiation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:133–152. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.10> (in Russian).

14. Sorokin A.P., Kuzina Yu.A., Alekseev V.V., Denisova N.A. Thermophysical Studies of Sodium Coolant – the Foundation for Sodium Using in Modern Fast Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:112–121. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.08> (in Russian).

15. Vasiliev B.A., Kryukov A.N., Farakshin M.R., Belov S.B., Sheryakov V.S., Kuznetsov A.E., Filin I.A. Use of MOX Fuel in BN-800 Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:45–59. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.03> (in Russian).

16. Alekseev P.N., Balanin A.L., Gulevich A.V., Dekusar V.M., Egorov A.F., Klinov D.A., Korobeynikov V.V., Marova E.V., Maslov A.M., Moseev A.V., Nevinitza V.A., Teplov P.S., Troyanov V.M., Fomichenko P.A., Shepelev S.F. Signature of a two component nuclear energy system on the basis of WWER and BN reactors. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2022;3:59–72. EDN: SERQAA. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2022/issue2022-4-59-74.pdf> (accessed June 15, 2025) (in Russian).

17. Belov S.B., Volodin D.A., Grol A.V., Kotov Ya.A., Kurakin K.Yu., Marova E.V., Nevinitza V.A., Pavlovichev A.M., Pidoprigora E.V., Smirnov A.Yu.2, 5, Pharakshin M.R., Fomichenko P.A., Sherenko A.I., Gulevich A.V., Decusar V.M., Eliseev V.A., Klinov D.A. The influence of the fast reactor on the parameters of the material balances of the light-water thermal reactor in the context of the product line “balanced nuclear fuel cycle”. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2022;3:83–92. URL: <https://vant.ippe.ru/year2022/3/radiation-technologies/2204-8.html> (accessed June 15, 2025) (in Russian).

18. Ashurko Yu.M., Marova E.V., Mosunova N.A., Osipov S.L., Poplasky V.M., Strizhov V.F., Shepelev S.F. Calculational platform for substantiation of the BN-1200 RP project. 10th International Conference (ISTC-2016), Moscow, 2016.

Authors

Andrey V. Gulevich, Head of the Reactor Physics Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
E-mail: avgulevich@ippe.ru

Alexey A. Kamaev, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: kamaev@ippe.ru

Aleksander V. Kereksha, Department Head, AuthorID 1090249
E-mail: kereksha@okbm.nnov.ru

Aleksandr N. Kryukov, Deputy Chief Designer of BN Reactor Plants, SPIN-код 4619-8065,
AuthorID 1280123,

E-mail: ankrukov@okbm.nnov.ru

Yulia A. Kuzina, Head of the Nuclear Energy Department, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: ukyzina@ippe.ru

Elena V. Marova, Leader of the BN R&D direction, Cand. Sci. (Engineering),
AuthorID 538379,

E-mail: marova@okbm.nnov.ru

Andrei M. Maslov, Head of Bureau of R&D Technical Support,
E-mail: maslov@okbm.nnov.ru

Anton A. Peregudov, head of department of calculated safety research of NPP, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: aperegudov@ippe.ru

Sergey A. Rogozhkin, Chief Designer of BN Reactor Plants, Cand. Sci. (Engineering),

AuthorID 546880

E-mail: rogozhkin@okbm.nnov.ru

Vladimir M. Troyanov, Scientific Director, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: vmtroyanov@ippe.ru

Mansur R. Farakshin, Head of Department of the BN Reactor Core Development, Cand. Sci. (Engineering), AuthorID 883340,

E-mail: farakshin@okbm.nnov.ru

Sergey F. Shepelev, Advisor to the General Director for BN Reactor Plants, Cand. Sci. (Engineering), AuthorID 882989,

E-mail: shepelev@okbm.nnov.ru