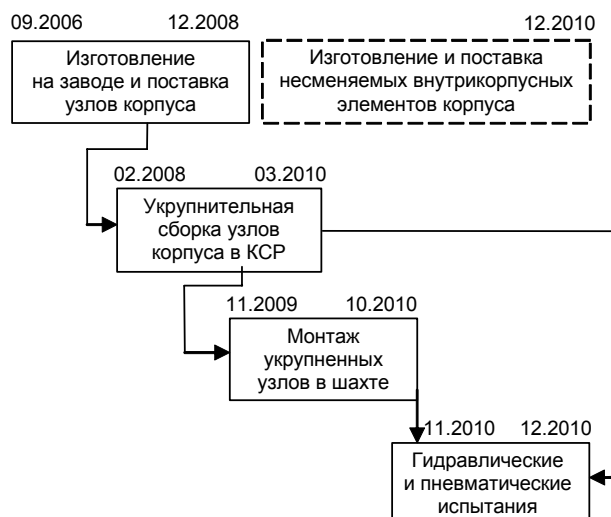




Р и с. 5. Укрупненный график работ по изготовлению корпуса реактора

2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поплавский В.М. Быстрые реакторы. Состояние и перспективы. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 5, с. 327—335.
2. Mitenkov F.M., Saraev O.M. BN-800: a key part of Russia's nuclear strategy. — Nucl. Engng Intern., 2005, v. 50, № 608, p.10—12.
3. Ошканов Н.Н., Говоров П.Г., Кузнецов А.В. 28 лет эксплуатации. — Бюл. Росэнергоатома, 2008, № 8, с. 34—37.
4. Сараев О.М. Мы вновь на правильном пути. — Там же, 2008, №11, с. 12—14.
5. Ватулин А.В., Целищев А.В. Конструкционные стали для активной зоны реакторов на быстрых нейтронах. — Материаловедение и термическая обработка металлов, 2004, № 11, с. 13—19.
6. Носков Ю.В. Второе рождение БН-800. — Бюл. Росэнергоатома, 2008, № 11, с. 15—17.

УДК 621.039.526

КОНЦЕПЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЭНЕРГОБЛОКА С БЫСТРЫМ НАТРИЕВЫМ РЕАКТОРОМ БН-1200

Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М., Багдасаров Ю.Е. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск), Васильев Б.А., Каманин Ю.Л., Осипов С.Л., Кузавков Н.Г. (ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород), Ершов В.Н., Аширметов М.Р. (ОАО «СПбАЭП», г. Санкт-Петербург)

Будущее ядерной энергетики России и большинства других стран, ее развивающих, связывается с использованием быстрых реакторов и замкнутого топливного цикла. К настоящему времени только быстрые реакторы с натриевым теплоносителем готовы для широкомасштабного промышленного внедрения. В нашей стране имеется более чем 50-летний опыт

Целевые показатели проекта реакторной установки и энергоблока. При разработке энергоблока должны быть достигнуты следующие цели, соответствующие предъявляемым к реакторам и АЭС нового поколения требованиям:

конкурентоспособность с перспективными энергоблоками на основе реакторов другого типа и энергоблоками на органическом топливе;

повышение безопасности до уровня, исключающего необходимость принятия мер для защиты населения за пределами площадки АЭС при любых возможных авариях;

достижение коэффициента воспроизводства на уровне от 1,2 (1-й этап) до 1,3—1,35 (2-й

их создания и успешной работы: БР-5 (1959) → БР-10 (1973—2002) → БОР-60 (1969 — эксплуатируется) → БН-350 (1973—1998) → БН-600 (1980 — эксплуатируется) → БН-800 (сооружается). Разрабатывается проект перспективного энергоблока с быстрым натриевым БН-1200 как основа для начального этапа серийного сооружения реакторов этого типа.

этап) при использовании смешанного оксидного топлива и 1,45 — на нитридном топливе;

сокращение продолжительности строительства серийных энергоблоков до 48 мес.;

возможность ввода серии реакторов через 2—3 года после пуска головного энергоблока.

Разработка БН-1200 базируется на максимально возможном использовании апробированных научно и инженерно-отработанных технических решений, реализованных в проектах БН-350, -600, -800 [1, 2]. Вместе с тем будут применены и новые технические решения, которые повысят безопасность и позволят обеспечить приемлемую экономичность энергоблока и

увеличение объемной доли топлива в активной зоне до 0,47 для повышения внутреннего коэффициента воспроизводства, что снижает потерю реактивности на выгорание и, следовательно, требуемую эффективность органов СУЗ;

увеличение диаметра твэлов с 6,9 для БН-600, -800 до 9,3 мм и размера чехла ТВС «под ключ» с 96×2 для БН-600, -800 до 181×3,5 мм, что снижает затраты на изготовление топлива и время на операции, связанные с транспортировкой и перегрузкой ТВС;

увеличение числа гнезд во внутриреакторном хранилище для выдержки ТВС в течение 2 лет, что позволяет снизить их мощность при выгрузке из реактора и отказаться от такой сложной и дорогостоящей части транспортно-технологического тракта, как барабан отработавших сборок с натриевой системой охлаждения.

Основные эксплуатационные характеристики активной зоны следующие:

Тепловая мощность, МВт . . .	2900
Кампания ТВС активной зоны, год . . .	4—6
Масса топлива в активной зоне, т . . .	46,9
Массовая доля плутония в топливе, % . . .	18,1
Коэффициент воспроизводства . . .	1,2
Максимальное выгорание топлива, % тяж. ат. . .	14—20
Максимальная повреждающая доза на ТВС, смещ./ат. . . .	140—200
Максимальная линейная мощность твэлов, кВт/м . . .	46,5
Максимальная температура оболочки твэлов с учетом неопределенности параметров, °С . . .	670
Гидравлическое сопротивление активной зоны, МПа . . .	0,5

Технические решения по повышению безопасности реакторной установки. Значительное внимание при разработке проекта БН-1200 было направлено на усиление свойств самозащищенности. Для этого приняты следующие решения:

ликвидируются внешние натриевые трубопроводы первого контура путем размещения холодных фильтров-ловушек в баке реактора, что исключает наиболее опасный класс проектных аварий с течами радиоактивного натрия;

аварийный отвод тепла от реактора осуществляется системой, подключенной непосредственно к первому контуру через автономные теплообменники, встроенные в бак реактора. Система включается и работает на пассивном принципе (естественная циркуляция теплоотво-

дящих сред по всем контурам). Благодаря этому надежность системы аварийного отвода тепла повышена более чем в 10 раз по сравнению с БН-800;

предусматривается пассивная аварийная защита, срабатывающая при повышении температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, дополнительно к пассивной системе на гидравлически взвешенных стержнях, которые вводятся в активную зону при останове ГЦН первого контура.

Установка оснащена средствами локализации аварийных выбросов из корпуса реактора при запроектных авариях. После аварии и необходимой выдержки газ сбрасывается в систему спецвентиляции.

Как показал анализ, указанные решения позволяют снизить до 10^{-6} 1/год вероятность тяжелого повреждения активной зоны по сравнению с требованиями действующих нормативных документов, а также уменьшить эффективную дозу облучения персонала и населения при нормальной эксплуатации и авариях в соответствии с требованиями INPRO (Innovative Projects) и GEN-4 (Generation-4) к реакторным блокам АЭС 4-го поколения.

Технико-экономические и эксплуатационные показатели энергоблока. Требования к целевым экономическим показателям БН-1200 направлены на достижение конкурентоспособности с серийными ВВЭР по стоимости производства электроэнергии. Основные пути для достижения этой цели в проекте следующие:

усовершенствование, оптимизация и укрупнение основного оборудования, минимизация протяженности натриевых трубопроводов второго контура, упрощение транспортно-технологического тракта загрузки-выгрузки ТВС, упрощение и сокращение вспомогательных систем и систем аварийного энергоснабжения;

уменьшение строительных объемов и материалоёмкости энергоблока;

увеличение срока службы до 60 лет;

повышение коэффициента использования мощности до 90%;

повышение выгорания топлива.

Возможность достижения высокого коэффициента использования мощности доказана надежной длительной эксплуатацией БН-600 — за 29-летний срок эксплуатации после освоения номинальной мощности его среднее значение составило 75%. В последние годы этот показа-

тель находится на уровне 77% [1]. Представляется возможным дальнейшее повышение коэффициента использования мощности БН-600 до 80%. Учитывая, что заметный вклад в длительность плановых остановов БН-600 вносит ремонт трех турбогенераторов, для БН-800 с одним турбогенератором можно рассчитывать на достижение коэффициента использования мощности ~85%. Возможность дальнейшего его повышения до 90% для серийного БН-1200 связывается со снижением перегрузок топлива в год с двух для БН-600, -800 до одной.

Срок службы серийного БН-1200 установлен в 60 лет. Основанием для этого является опыт эксплуатации БН-600, который уже отработал проектный срок службы 30 лет. В настоящее время срок службы реактора продлен до 45 лет. Дополнительно принимаются во внимание снижение флюенса нейтронов на внутриреакторные конструкции и низкая коррозионная активность натриевого теплоносителя, что подтверждено длительной эксплуатацией БОР-60 и БР-5/10 [3].

Предварительные оценки показывают, что экономические показатели БН-1200 будут находиться на сопоставимом уровне с ВВЭР аналогичной мощности. В перспективе себестоимость электроэнергии БН-1200 должна стать ниже, чем ВВЭР, в связи с ожидаемым ростом цен на природный уран.

Проект БН-1200 может быть разработан в сроки, обеспечивающие его пуск к 2020 г. Наилучшим местом для сооружения головного энергоблока является площадка Белоярской АЭС, на которой эксплуатируется БН-600 и сооружается БН-800. На этой площадке уже имеется (или в ближайшее время будет создана) часть необходимой инфраструктуры для нового энергоблока. Это также позволит уменьшить затраты на сооружение энергоблока.

Замыкание топливного цикла. Это является важнейшей составной частью программы развития ядерной энергетики. При его осуществлении обеспечивается наиболее полное использование ^{238}U и трансураниевых материалов, накапливающихся в облученном топливе. Общее количество плутония, которое будет наработано в отработавшем топливе энергетических ВВЭР к возможному началу серийного ввода быстрых реакторов (2022 г.), составит 120—140 т [4] в зависимости от масштабов развития ядерной

энергетики (40—60 ГВт). Начальная загрузка БН-1200 плутонием составит 7,5 т, ежегодная подпитка — около 1,4 т. Следовательно, имеется возможность ввода и эксплуатации серии БН-1200 в 2020—2030 гг.

Для реализации указанной задачи необходимо создание технологической цепочки: переработка отработавшего топлива ВВЭР — изготовление смешанного уран-плутониевого топлива для быстрых реакторов. По оценкам мощность завода по переработке отработавшего топлива ВВЭР должна составить ~1500 т/год [5], централизованного производства смешанного топлива — около 100 т/год, в том числе первой очереди около 50 т/год для пуска головного и первых серийных энергоблоков. Производство смешанного топлива должно создаваться с учетом унификации оборудования и внедрения мер, обеспечивающих возможность перехода на нитридное топливо после подтверждения его работоспособности при экономически приемлемом выгорании.

Необходимые НИОКР и технологические задачи реализации проекта. Разработка эскизного и технического проектов БН-1200 может быть выполнена в 2010—2012 гг. с полным завершением всего объема НИОКР к 2017 г. По нашим данным изготовление оборудования и сооружение энергоблока могут быть осуществлены в 2014—2019 гг. Основные направления НИОКР в обоснование проекта БН-1200 следующие:

- обоснование корпусного парогенератора, отличающегося от парогенератора БН-600, -800 конструкцией и эксплуатационными характеристиками;

- отработка конструкций нового оборудования реакторной установки (ГЦН-1, -2, фильтровушка, перегрузочный комплекс, сильфонные компенсаторы трубопроводов);

- определение физических и теплогидравлических характеристик активной зоны;

- ресурсные испытания ТВЭЛов до выгорания 20% тяж. ат.;

- отработка систем безопасности пассивного принципа действия (система аварийного отвода тепла, стержни аварийной защиты);

- разработка новых конструктивных материалов для продления срока службы до 60 лет,

повышения ресурса заменяемого оборудования, увеличения выгорания топлива;

техничко-экономические исследования по замыканию топливного цикла (включая трансмутацию Np, Am, Cm и др.).

Значительная часть указанных работ может быть выполнена на имеющейся экспериментальной базе. Необходимость создания некоторых дополнительных стендов связана, в основном, с использованием в проекте новых технических решений. Кроме того, для обоснования проекта требуется усовершенствование имеющихся и разработка новых расчетных кодов.

Заключение. Концепция серийного энергоблока БН-1200 базируется на большом положительном опыте разработки и эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и максимально возможном использовании достижений этой технологии. Новые технические решения, примененные в проекте БН-1200, также имеют достаточную степень обоснованности. Вместе с тем для их полного обоснования должны быть проведены необходимые расчетные и экспериментальные исследования.

Принятые эксплуатационные характеристики энергоблока — срок службы 60 лет, коэффициент использования мощности 90% базируются на положительном опыте работы БН-600 в течение проектного срока службы и результатах обоснования продления срока эксплуатации до

45 лет, а также на возможности увеличения в 2 раза интервала между перегрузками активной зоны в сравнении с БН-600, -800. Ожидается, что совокупность примененных технических решений обеспечит конкурентоспособность БН-1200 с ВВЭР аналогичной мощности.

Новые технические решения обуславливают высокий уровень безопасности БН-1200, соответствующий требованиям к АЭС с реакторами 4-го поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ошканов Н., Говоров П., Кузнецов А. 28 лет эксплуатации. Энергоблок с реактором на быстрых нейтронах БН-600: основные технико-экономические показатели. — Бюл. Росэнергоатома, 2008, № 8, с. 34—37.
2. Поплавский В.М., Васильев Б.А., Сукнев К.Л. и др. Перспективный быстрый натриевый БН-1800, удовлетворяющий требованиям ядерной энергетики XXI века. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 5, с. 335—342.
3. Карпов А.В., Кононюк М.Х., Мамаев Л.И. и др. Совместимость конструкционных материалов с натрием по данным 40-летнего опыта работы реактора БР-5/10. — Там же, 2001, т. 91, вып. 5, с. 400—404.
4. Иванов В.Б. Научно-технические проблемы ядерного топливного цикла. — В сб.: 1-я научная конференция «Ядерный топливный цикл». Москва, июнь 2000, с. 3—16.
5. Солонин М.И., Грачев А.Ф., Аден В.Г. и др. Обращение с облученным ядерным топливом. — Там же, с. 17—20.

УДК 621.039.526

АКТИВНАЯ ЗОНА И ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА

*Поплавский В.М., Цибуля А.М., Хомяков Ю.С., Матвеев В.И., Елисейев В.А., Цикунов А.Г.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск), Васильев Б.А., Белов С.Б., Фаракишин М.Р.
(ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)*

В настоящее время в нашей стране разрабатывается перспективный быстрый натриевый реактор, удовлетворяющий требованиям ядерной энергетики XXI века. Первоначально для этого реактора рассматривалась электрическая мощность 1800 МВт [1]. Однако в дальнейшем по многим причинам, в частности, для обеспечения транспортабельности основного оборудования железнодорожным транспортом его мощность была снижена до 1200 МВт. Разработка

БН-1200 базируется на максимально возможном использовании апробированных научно обоснованных и отработанных технических решений, реализованных в БН-350, -600, в проекте БН-800, а также новых технических решений, повышающих экономичность и безопасность.

Активная зона БН-1200. В качестве основного варианта рассматривается использование оксидного топлива, для ближайшей перспективы — нитридного, технология производства кото-