

## ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ РЕАКТОРОВ. СОЗДАНИЕ РУ БН-800

**Д.Л. Зверев, Б.А. Васильев, В.Ю. Седаков, Н.Г. Кузавков**  
*ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород*



Основная цель создания реактора БН-800 – отработка технологии замкнутого ядерного топливного цикла. Сделан акцент на мерах по повышению надежности, безопасности и улучшению экономических показателей БН-800 по сравнению с его предшественником БН-600.

**Ключевые слова:** U-Pu-топливо, замкнутый цикл, подготовка к коммерческому применению, снижение материалоемкости.

**Key words:** U-Pu-fuel, closed cycle, preparation to the commercial application, reduction in consumption of materials.

### ВВЕДЕНИЕ

Созданию технологии быстрых реакторов уделялось большое внимание во всех развитых странах с начала 1950-х гг., поскольку было ясно, что только с их помощью можно решить проблему топливообеспечения атомной энергетики на длительную перспективу. В России работы по быстрым реакторам были начаты в Физико-энергетическом институте под руководством А.И. Лейпунского в начале 50-х гг. В эти годы была создана исследовательская база – реакторы БР-1 (1955 г.), БР-5 (1958 г.) → БР-10 (1983 г.) и опытный реактор БОР-60 (1969 г.). С самого начала в качестве теплоносителя для быстрых реакторов был выбран натрий [1].

Дальнейшая разработка и реализация более крупных проектов энергетических натриевых реакторов БН-350 (1973 г.) и БН-600 (1980 г.) позволили перейти к промышленному освоению данной технологии. Важнейшим этапом промышленного освоения технологии является создание реактора БН-800, сооружение которого ведется на Белоярской АЭС [2].

В 2010 г. принята Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» (ФЦП ЯЭНП), в рамках которой предусматривается проведение НИОКР по проекту перспективного быстрого натриевого реактора нового поколения. Основными разработчиками (ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО «СПб АЭП», ГНЦ РФ-ФЭИ) предлагается в рамках ФЦП ЯЭНП разработать проект реактора электрической мощностью 1200 МВт – БН-1200.

Освоение технологии реакторов БН осуществляется под научным руководством ФЭИ. Главным конструктором всех энергетических реакторов БН является ОКБМ. Основной Генеральный проектировщик АЭС с реакторами БН – СПб АЭП. Из других предприятий, обеспечивающих разработку технологии БН, следует, в первую оче-

© Д.Л. Зверев, Б.А. Васильев, В.Ю. Седаков, Н.Г. Кузавков, 2011

редь, выделить ОКБ «Гидропресс» – конструкция парогенератора, ВНИИНМ – конструкция твэлов и ЦНИИ КМ «Прометей» – конструкционные материалы оборудования РУ.

### **БАЗА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА РУ БН-800**

В конструкции сооружаемого в настоящее время реактора БН-800 используются основные технические решения БН-600, подтвержденные 30-летним опытом его эксплуатации.

Конструкторские решения по реакторной установке (РУ) с быстрым натриевым реактором первоначально были разработаны в нашей стране для проекта первого в мире прототипного энергетического реактора БН-350. В этом проекте была применена петлевая схема первого контура. Реактор успешно эксплуатировался с 1973 по 1998 гг. (г. Актау, Казахстан) и был остановлен по причинам, не связанным непосредственно с техническим состоянием установки.

В проект БН-600 для энергоблока №3 Белоярской АЭС (г. Заречный Свердловской обл.) было введено радикальное изменение – переход на интегральную компоновку, т.е. размещение оборудования первого контура в едином баке – корпусе реактора. Это потребовало новых компоновочных решений РУ, а также изменений в конструкции основного оборудования первого контура (промежуточных теплообменников и главных циркуляционных насосов), которое было одновременно усовершенствовано с учетом опыта разработки и эксплуатации БН-350.

Кроме того, в проекте БН-600 вместо корпусных парогенераторов с трубами Фильда применена секционно-модульная конструкция с прямыми трубами, которая позволяет при межконтурных течах отключать только дефектную секцию без снижения мощности реактора.

Проект РУ БН-600 оказался весьма успешным несмотря на большое количество новых решений (табл. 1) [3–5].

Очень важным результатом проведенных исследований при обосновании продления срока эксплуатации БН-600 является установление возможности сохранения работоспособности при длительной эксплуатации стали X18H9 – основного конструкционного материала, выбранного для РУ БН еще на начальной стадии разработок. Использование этой стали для оборудования РУ типа БН учтено в ряде специальных нормативных документов. Кроме стали X18H9, большие материаловедческие работы выполнены применительно к стали 1X2M, используемой в парогенераторах БН-600.

Разработка и реализация проектов РУ БН-350 и БН-600 позволили создать эффективную проектно-конструкторскую, производственную и эксплуатационную инфраструктуру, которая явилась базой для дальнейшего развития технологии БН.

### **ЦЕЛЬ СОЗДАНИЯ РЕАКТОРА БН-800 И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЕГО РАЗРАБОТКИ**

В качестве топлива в проектах реакторов БН-350 и БН-600 предусматривался оксид обогащенного урана, что было связано с целью максимально быстрого освоения натриевой реакторной технологии. Задачу использования смешанного уран-плутониевого топлива и отработки замкнутого топливного цикла предполагалось решить в рамках нового проекта реактора БН-800. Разработка проекта БН-800 началась сразу после завершения работ по реактору БН-600. Проект прошел следующие основные этапы разработки и лицензирования:

1984 г. – разработан технический проект энергоблока;

1985 г. – согласование Госатомнадзора СССР технического проекта энергобло-

Таблица 1

**Основные показатели эксплуатации БН-600**

Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ)	78% за последние пять лет (близко к КИУМ серийных ВВЭР – 79.9% за тот же период времени), внеплановые потери КИУМ не превышают 0,5%. Плановое время на ППР и перегрузку определяются двумя остановами в год и ремонтом трех турбоагрегатов
Течи натрия	27 течей натрия наружу (из них пять течей радиоактивного натрия) и 12 течей в ПГ. Течи наружу были обусловлены, в основном, отклонениями в качестве изготовления вспомогательных трубопроводов. Последняя течь натрия наружу – в 1994 г., в ПГ – в 1991 г.
Выгорание топлива и продолжительность кампании ТВС	Увеличены среднее выгорание топлива с 42 до 70 МВт-сут/кг, продолжительность кампании ТВС ~ в два раза
Аварийные остановки реактора	Среднее число аварийных остановов реактора на 7000 ч. работы – 0,2 (по АЭС мира – 0.5 – 0.7) за период 2000 – 2009 гг., аварийные остановки реактора отсутствовали
Средний выход радиоактивных газов за последние шесть лет	1% от допустимого уровня (в четыре раза ниже показателя АЭС с ВВЭР за тот же период)
Коллективная доза облучения персонала за последние пять лет	0.54 чел-Зв в год (в два раза ниже аналогичного показателя АЭС с ВВЭР)
Надежность и безопасность	По показателям надежности и безопасности реактор БН-600 конкурентоспособен с серийными тепловыми реакторами
Срок эксплуатации энергоблока	В апреле 2010 г. реактор отработал проектный срок службы 30 лет. Обосновано продление срока службы до 45-ти лет и получена лицензия Ростехнадзора на эксплуатацию до 31.03.2020 г.

ка, начало работ по сооружению двух энергоблоков;

1989–1993 гг. – экологическая экспертиза, экспертизы Госплана, Госсаннадзора, Госпожнадзора, Минэкономики;

1990 г. – экспертиза комиссии Академии наук СССР;

1993 г. – доработка проекта в соответствии с новыми нормативными требованиями (ОПБ-88 и ПБЯ РУ АС-89) и с учетом замечаний комиссии АН СССР;

1994–1997 гг. – экспертиза Госатомнадзора Российской Федерации.

В связи с Чернобыльской аварией работы по сооружению первых двух энергоблоков на площадке Белоярской АЭС и Южно-Уральской площадке были прекращены в 1986 г. Тем не менее, работы по проекту БН-800 продолжались. Технические решения по проекту были окончательно приняты в 1990-е гг. с учетом новых нормативных требований к безопасности АЭС и возможного улучшения экономических показателей. Проведенные в 1990 г. работы в этих направлениях были признаны успешными. В 1997 г. была получена лицензия на возобновление сооружения БН-800 на площадке Белоярской АЭС, а в 1998 г. – лицензия для Южно-Уральской АЭС. Это были первые лицензии на сооружение АЭС в России после Чернобыльской аварии.

В 2006 г. правительством РФ утверждена Федеральная целевая программа «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на период 2007–2010 г. и на перспективу до 2015 г.», в которой важное значение придавалось раз-

виту быстрых реакторов. В этом же году по Решению Правительства РФ было возобновлено сооружение четвертого энергоблока Белоярской АЭС с РУ БН-800 [6].

### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БН-800

В таблице 2 и на рисунке 1 приведены основные технические характеристики РУ БН-800 в сравнении с БН-600 и принципиальная схема РУ.

Компоновка и основные технические характеристики РУ БН-800 незначитель-

Таблица 2

**Основные технические характеристики  
РУ БН-800 в сравнении с БН-600**

Характеристика	Значение	
	БН-600*	БН-800
Номинальная тепловая мощность, МВт	1470	2100
Количество теплоотводящих петель, шт	3	
Температура теплоносителя по первому контуру на входе/выходе ПТО, °С	550/377	547/354
Избыточное давление в газовом объеме реактора, МПа	0,054	0.054
Температура теплоносителя по второму контуру на входе/выходе ПГ, °С	518/328	505/309
Параметры третьего контура		
- температура острого пара, °С	505	490
- давление острого пара, МПа	14	14
- температура питательной воды, °С	240	210
Удельная масса РУ, т/МВт(э)	13,0	9,7
Срок службы РУ, год	45	45
КИУМ	0,77–0,8	0,85

\*Фактические параметры натрия и воды (пара) в петлях теплообмена РУ БН-600 могут незначительно отличаться от приведенных проектных значений в зависимости от условий эксплуатации.

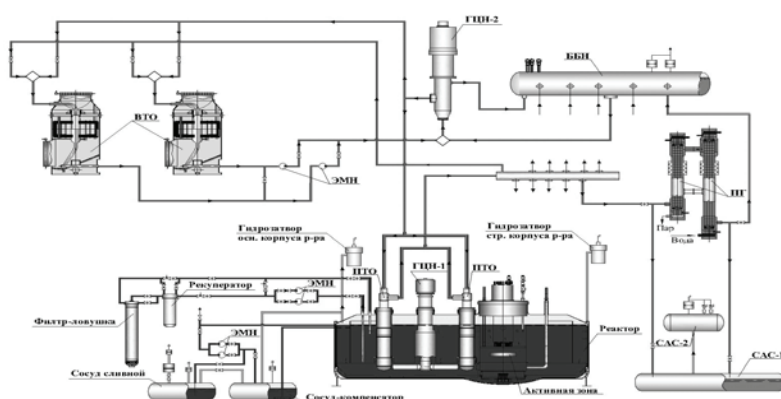


Рис. 1. Принципиальная схема РУ БН-800: ВТО – воздушный теплообменник системы аварийного отвода тепла; ЭМН – электромагнитный насос; ГЦН-2 – главный циркуляционный насос теплоотводящей петли второго контура; ББН – бак буферный натриевый; ПГ – парогенератор; САС-1,2 – сосуды аварийного сброса; ПТО – промежуточный теплообменник; ГЦН-1 – главный циркуляционный насос теплоотводящей петли первого контура

но отличаются от принятых для РУ БН-600. Однако, используя выявленные запасы и некоторые усовершенствования, мощность реактора удалось форсировать на ~ 40%, что обеспечило улучшение технико-экономических показателей энергоблока. Для этой же цели количество турбоагрегатов было уменьшено с трех до одного. Последнее позволяет также рассчитывать на увеличение КИУМ в БН-800 до 0,85.

В проекте БН-800 при сохранении принципа секционности ПГ уменьшено количество модулей путем исключения натриевого промежуточного перегрева, что позволило повысить его надежность, а также упростить разводку трубопроводов подогреваемого пара и использовать стандартную конструкцию пароперегревателя. В целом это решение было признано оптимальным, несмотря на некоторое снижение КПД.

Несколько снижены температуры натрия по контурам в связи с использованием хромистой стали в пароперегревательных модулях вместо нержавеющей стали, которая подвержена межкристаллитной коррозии под напряжением при попадании влаги в теплопередающую поверхность.

Принятые в проекте БН-800 новые решения направлены прежде всего на повышение уровня безопасности и улучшение экономических показателей (табл. 3) [7, 8].

Введенные усовершенствования позволили довести проект БН-800 по уровню

Таблица 3

**Усовершенствования в проекте реактора БН-800**

Мощность реактора, МВт(э)	Увеличена с 600 до 880 МВт (46%) при близком диаметре корпуса реактора по сравнению с БН-600 (~13 м)
Удельная материалоемкость	Снижена на 25% по сравнению с БН-600
КИУМ	Увеличен до 85%, в основном, за счет уменьшения времени на обслуживание и ремонт оборудования (использование одного турбоагрегата вместо трех в БН-600)
Безопасность	<ul style="list-style-type: none"> <li>Введена система аварийного отвода тепла с воздушным теплообменником, подключенным ко второму контуру.</li> <li>Разработана активная зона с натриевым пустотным эффектом реактивности, близким к нулевому значению.</li> <li>Предусмотрены пассивные гидравлически взвешенные стержни аварийной защиты.</li> <li>Встроен поддон под напорной камерой для улавливания кориума при плавлении активной зоны в случае тяжелой аварии</li> </ul>
Обращение с топливом	В системе перегрузки исключены ручные операции со свежими ТВС (с учетом смешанного U-Pu оксидного топлива – МОКС)
Выгорание топлива	Планируется последовательное увеличение с ~70 до 100 МВт-сут/кг и выше по мере освоения новых конструкционных материалов

безопасности до требований, предъявляемых к перспективным ядерным энергоблокам (в частности, неотселение населения при любых авариях, учитываемых в проекте).

Проект БН-800 ориентирован на использование МОКС-топлива с обеспечением возможности перехода в перспективе к высокоплотному нитриднему топливу (для начальной загрузки активной зоны с учетом степени готовности производства МОКС-топлива возможно использование гибридной активной зоны, состоящей из ТВС с  $UO_2$  и ТВС с  $PuO_2$ ). За весь период разработки проекта БН-800 был выполнен значительный объем НИОКР по совершенствованию технологий изготов-

ления конструкционных элементов активной зоны, разработке новых материалов и топливных композиций [9]. На первый период работы реактора предусматривается использование оболочек твэлов из освоенной в БН-600 аустенитной стали ЧС-68 х.д., обеспечивающей возможность достижения максимального выгорания 10% т.а. (повреждающая доза при использовании МОКС-топлива около 90 сна). В дальнейшем планируется использовать усовершенствованную аустенитную сталь ЭК-164 х.д., позволяющую увеличить максимальное выгорание до 13% т.а., а затем – стали ферритно-мартенситного класса. Для чехлов ТВС так же, как в реакторе БН-600, будет использоваться ферритно-мартенситная сталь ЭП-450. В обоснование применения новых сталей для оболочек твэлов проводятся соответствующие экспериментальные исследования с использованием реактора БН-600.

Из изложенного следует, что сооружение реактора БН-800 не только обеспечит отработку элементов технологии замкнутого топливного цикла, но и позволит проверить эффективность новых технических решений. Решение комплекса задач, которое обеспечивает реализация проекта БН-800, позволяет перейти к созданию серийного быстрого реактора БН-1200 и промышленной инфраструктуры замкнутого топливного цикла.

#### **РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТА БН-800**

Начало разработки проекта БН-800 основывалось на базе первых редакций специальных норм и правил для атомной энергетики, а также нормативных документов (НД), разработанных для общепромышленных объектов (строительные нормы и правила, государственные стандарты, инструкции).

Накопленный опыт разработки проектов и эксплуатации тепловых и быстрых реакторов (БН-350, БН-600), разработка проектов следующего поколения, включая проект БН-800, и ужесточение требований к обеспечению безопасности предопределили необходимость развития НД. Так, в НД были введены следующие важные требования, которые учитывались в процессе разработки и лицензирования проекта БН-800:

- принцип глубокоэшелонированной защиты;
- классификационные требования по влиянию на безопасность и вытекающие из этого требования к обоснованию элементов разного класса;
- требования по учету внутренних и внешних (природных и техногенных) воздействий;
- учет сейсмических воздействий;
- требования по учету запроектных аварий;
- вероятностные показатели безопасности и требования к выполнению вероятностных анализов безопасности;
- принципы резервирования систем и оборудования исходя из принципа единичного отказа, введены требования по организации многоканальности систем и их физическому разделению;
- требование по предупреждению или защите систем (элементов) от отказов по общей причине;
- рекомендация о предпочтительном использовании пассивных устройств и свойств внутренней самозащищенности;
- требование по организации резервного пункта (щита) управления;
- требование по внедрению средств, с помощью которых исключаются единичные ошибки персонала или ослабляются их последствия.

Учтена специфика быстрых натриевых реакторов в требованиях

- по ядерной и радиационной безопасности (ПБЯ РУ АЭС-89, СП АС-03);



- по проектированию оборудования и трубопроводов (ПН АЭ Г-7-008-89);
- к сварным соединениям и наплавкам и их контролю (ПН АЭ Г-7-009-89, ПН АЭ Г-7-010-89);
- к чистоте деталей, сборочных единиц узлов и комплексов (РД-95.10046-89);
- по определению механических свойств и химического состава металла шва и сварных соединений, методические указания (РД-5.90.2430-86);
- по термической обработке заготовок, деталей и сварных узлов из аустенитных сталей для оборудования атомных энергетических установок с реакторами на быстрых нейтронах (РД-5.90.2509-87);
- к нормам расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПН АЭ Г-7-002-86).

Разработаны «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реакторами на быстрых нейтронах» (НП-018-05).

При выполнении работ по продлению срока эксплуатации реактора БН-600 разработана «Методика расчета прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» (РД ЭО 1.1.2.09.0714-2007).

Совершенствование НД будет осуществляться в дальнейшем по мере возможного ужесточения требований по ядерной и радиационной безопасности и учета специфики БН применительно к перспективным проектам.

В процессе разработки и лицензирования проекта БН-800 было развито также программно-методическое обеспечение:

- усовершенствованы использованные ранее и развиты новые коды для расчетов нейтронно-физических и теплофизических характеристик активной зоны, радиационной защиты и анализа безопасности;
- осуществлен переход на трехмерные коды (ANSIS, Flow Vision, CFD) для расчета распределения температур и напряжений в конструкциях, полей температур и скоростей в натриевых потоках.

### **СООРУЖЕНИЕ ЭНЕРГОБЛОКА БН-800**

Объем освоенных капиталовложений в сооружение энергоблока на настоящее время составляет ~30 % от полных расчетных затрат [8].

Общий вид строительной площадки IV блока БАЭС на май 2010 г. показан на рис. 2

Особенностью БН с интегральной компоновкой является корпус реактора с габаритами, не позволяющими выполнять его изготовление в заводских условиях. В связи с этим на монтажной площадке введен в эксплуатацию в 2008 г. отдельный корпус сборки реактора, в котором ведутся работы по укрупнению узлов корпуса реактора в восемь монтажных блоков. Это дает возможность существенно ускорить монтаж реактора в шахте и одновременно обеспечить требуемое качество сборочно-сварочных работ без задержки сооружения главного корпуса энергоблока.

Работы по укрупнению сборки корпуса реактора иллюстрируются рис. 3. 4. На рисунке 5 показан монтаж шахты реактора, на рис. 6 – транспортировка первого укрупненного узла из корпуса сборки к шахте реактора.

Для обеспечения единого порядка и качества проектирования, изготовления и поставки оборудования, монтажа, наладки и эксплуатации оборудования было принято решение о комплектной поставке оборудования РУ БН-800. Комплектным поставщиком было определено ОАО «ОКБМ Африкантов».

Изготовление оборудования РУ БН-800 ведется целиком на российских предприятиях – всего привлечено около 25-ти крупных заводов.



Рис. 2. Общий вид строительной площадки БН-800



Рис. 3. Укрупнительная сборка днища корпуса реактора

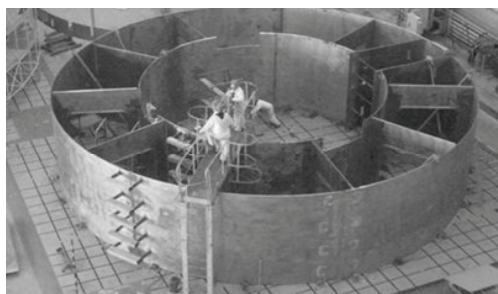


Рис. 4. Укрупнительная сборка опорного пояса

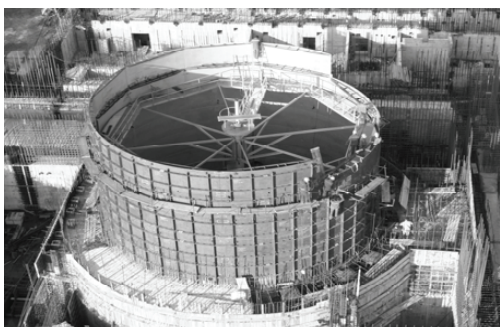


Рис. 5. Монтаж шахты реактора



Рис. 6. Транспортировка блока корпуса реактора

В процессе подготовки производства и при изготовлении оборудования были восстановлены или разработаны вновь уникальные технологии изготовления изделий из стали аустенитного класса:

- горячей штамповки горловин корпуса реактора;
- доизготовления корпуса реактора в монтажные блоки непосредственно на монтажной площадке;
- труб и фасонных деталей большого диаметра ( $\varnothing 600, 800, 900$  мм) и оребренных гнутых труб системы аварийного расхолаживания;
- пространственной гибки (в трех плоскостях) труб для теплообменного оборудования;



- поковок больших размеров (до 2,0 м, толщиной до 250 мм).

Создана промышленная линия по нанесению покрытия методом диффузионного хромирования с последующей нитридизацией.

Восстановлено изготовление электродвигателей с системой управления для насосов I и II контуров мощностью соответственно 5 и 2,5 МВт, электромагнитных насосов для перекачки натрия производительностью до 430 м<sup>3</sup>/ч с естественным воздушным охлаждением.

Положительную роль в восстановлении производственной базы предприятий сыграл проект китайского экспериментального реактора CEFR, разработка проекта которого и поставка большой номенклатуры оборудования осуществлялась по контракту с КНР.

Распределение поставляемого оборудования по заводам-изготовителям приведено в табл. 4.

Таблица 4

**Распределение поставляемого оборудования по заводам-изготовителям**

Предприятие	Номенклатура поставляемого оборудования
ОКБМ	Элементы корпуса реактора, главные циркуляционные насосы, исполнительные механизмы СУЗ, наклонные подъемники, элементы поворотных пробок, элеваторы, механизмы и оборудование системы перегрузки топлива
ЗиО-Подольск	Корпус реактора, баки 150 м <sup>3</sup> , парогенераторы, теплообменники охлаждения барабана отработанных сборок
Балтийский завод	Промежуточные теплообменники I – II контуров
Уралхиммаш	Облицовка шахты, баки 100 и 10 м <sup>3</sup>
Гидросталь	Гидрозатворы, люки, стеллажи
Севмаш	Отдельные элементы пробок поворотных, проходки труб в бетоне шахты
БАСЭТ	Оребренные трубы, ВТО
Красный гидропресс, Энергомаш, ЗиО-Подольск	Трубопроводы второго контура, трубопроводы САРХ, подвески, сильфонные компенсаторы
НИИЭФА	Электромагнитные насосы
ЦКБА	Натриевая арматура, натриевые задвижки Ду300, узлы дистанционного управления арматурой
ФЭИ	Магнитные системы расходомеров, испытания на натриевых стендах арматуры и расходомеров
Машпроект Уральский завод нестандартного оборудования, Полесье	Отдельное оборудование перегрузочного тракта
НПЦ «Элегия»	Подвески ионизационных камер (внутрибаковых, забаковых)
Машзавод, ЗиО-Подольск	Имитаторы ТВС, комплект гильз СУЗ
Кировэнергомаш, Нижегородский машиностроительный завод	Поворотные пробки
Югпромсервис	Фильтры-ловушки, рекуператоры
Уралэнергомонтаж	Теплоизоляция корпуса, перегрузочный бокс

К июню 2010 г. размещено в изготовление 96% оборудования, поставлено 36 единиц оборудования (45%). Поставлены и смонтированы металлоконструкции облицовки шахты реактора, баки-компенсаторы, наклонные подъемники и другое оборудование, обеспечивающее последовательность сооружения энергоблока. В 2010 г. будет поставлена 81 единица оборудования (65%), а поставка остального будет завершена в 2011 г.

ОКБМ координирует также работы по обеспечению разработки и поставки натриевых контрольно-измерительных приборов, перечень которых и распределение по заводам-изготовителям представлены в табл. 5.

Кроме того, реактор оснащается следующими контрольно-измерительными устройствами:

- индикаторами положения элементов корпуса для контроля температурных перемещений оборудования и трубопроводов;

Таблица 5

**Перечень контрольно-измерительных приборов  
и распределение их по заводам-изготовителям**

Номенклатура поставляемого оборудования	Предприятие-поставщик (соисполнитель)
Преобразователи термоэлектрические типа для измерения температуры жидкого натрия	ФГУП «НИИ НПО «Луч», г. Подольск (ОАО «НИКИЭТ им. Доллежалея», г. Москва)
Датчики давления высокотемпературной натриевой среды	ОАО «НИИ Теплоприбор», г. Москва
Индикаторы расхода натрия электромагнитного типа для контроля расхода натрия в трубопроводах	ОАО «НИИ Теплоприбор», г. Москва.
Сигнализаторы наличия или отсутствия натрия в трубопроводах	ОАО «НИИ Теплоприбор», г. Москва
Сигнализаторы течи натрия в корпусах оборудования или страховочных кожухах трубопроводов	ОАО «НИИ Теплоприбор», г. Москва.
Система измерения расхода натрия по петлям первого контура	ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск
Система измерения расхода натрия через ТВС активной зоны при перегрузке	ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск (ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород)
Индуктивный уровнемер для контроля уровня натрия в корпусе реактора, в баках главных циркуляционных насосов I и II контуров	ОАО «НИИ Теплоприбор», г. Москва (ОАО «Пирамида», г. Смоленск, ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород)
Гибкий уровнемер для контроля уровня натрия в баках вспомогательных систем I и II контуров	ПФ ФГУП «НИИ НПО «Луч», г. Протвино (ООО НПП «Флоу-Спектр», г. Обнинск)
Уровнемер для контроля уровня натрия в буферном баке	ПФ ФГУП «НИИ НПО «Луч», г. Протвино (ООО НПП «Флоу-Спектр», г. Обнинск)
Приборы для системы автоматической защиты парогенератора (испытания на стендах ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ): - средства индикации газообразного водорода в натрии; - расходомер для контроля расхода натрия в трубопроводах диаметром до DN300; - блок датчика для контроля концентрации водорода в натрии и в инертном газе	ПФ ФГУП «НИИ НПО «Луч», г. Протвино (ООО НПП «Флоу-Спектр», г. Обнинск) Те же Те же

- системами для контроля состояния твэлов;
- системой контроля за состоянием металла в процессе эксплуатации;
- петлей спектрометрии и пробоотборниками для контроля качества теплоносителя;
- пробоотборниками газа для контроля газа над уровнем теплоносителя.

Вопросы поставки автоматической системы управления (АСУ), вентиляционного, электротехнического и другого оборудования будут решены по аналогии с поставками такого же оборудования для других атомных станций, сооружаемых в настоящее время и пущенных в эксплуатацию в последние годы (Калининская, Волгодонская и др.), поскольку их основой является однотипное оборудование.

Следует отметить, что сооружение БН-800 обеспечивает решение важнейшей практической задачи – восстановление и развитие технологий создания энергетических реакторов БН, что является одним из необходимых условий для перехода к их коммерциализации.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ**

Экспериментальная база развивалась и совершенствовалась по мере развития технологии быстрых натриевых реакторов. Основа этой базы, созданная при разработке проектов БН-350 и БН-600, использовалась для проекта БН-800 и определила ее современное состояние. В таблице 6 представлены основной перечень созданных стендов и их назначение

Для получения служебных характеристик конструкционных материалов оборудования РУ используется экспериментальная база ЦНИИ КМ «Прометей».

Отработка смешанного уран-плутониевого топлива ведется с использованием экспериментальных установок, имеющихся во ВНИИНМ, НИИАР и ФЭИ.

Уникальные возможности для проведения экспериментальных исследований по РУ БН, в первую очередь, в части испытаний твэлов, обеспечены наличием действующих быстрых натриевых реакторов BOR-60 и БН-800.

Созданная экспериментальная база с проведением необходимой модернизации и доработок, в основном, обеспечит проведение НИОКР по проекту перспективного реактора БН-1200.

При разработке реактора БН-1200, выполненной к настоящему времени на уровне эскизного проекта, сохранена преемственность по принципиальным техническим решениям, положительно зарекомендовавшим себя в БН-600 и примененным в БН-800. Одновременно, для улучшения технико-экономических показателей и повышения уровня безопасности введен ряд новых технических решений [7–12].

Имеющиеся возможности по разработке проекта БН-1200, включая существующую экспериментальную базу, позволяют реализовать этот проект до 2020 г. Степень надежности проекта должна обеспечить условия для коммерциализации проекта с началом серийного сооружения таких энергоблоков непосредственно после 2020 г.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проект БН-800 разработан на основе успешного опыта НИОКР по направлению БН, в первую очередь, опыта создания и эксплуатации реактора БН-600.

Реализация проекта БН-800 является важнейшим этапом в освоении технологии быстрых натриевых реакторов. С учетом работ, выполненных по этому проекту, можно утверждать, что технология быстрых натриевых реакторов готова к коммерческому освоению:

Таблица 6

**Основные стенды для проведения исследований по РУ БН**

Перечень стендов (размещение)	Назначение
БФС (ФЗИ)	Исследования нейтронно-физических характеристик активной зоны
6-Б (ФЗИ)	Исследования процессов теплообмена и гидродинамики в ТВС
СТ - 1545 (ОКБМ)	Исследование гидравлических характеристик сборок активной зоны, измерение протечек через уплотняющие устройства, отработка конструкции гидравлически взвешенных стержней ПАЗ
СПРУТ (ФЗИ)	Исследование парогенераторов
ПРОТВА - 1 (ФЗИ)	Исследование физико - химических процессов в системе Na-конструкционные материалы и отработка методов и приборов контроля содержания примесей в натрии
ТО (ФЗИ)	Отработка и обоснование характеристик комбинированной сборки пассивной аварийной защиты на гидравлическом и тепловом принципах срабатывания
ПОДДОН (ОКБМ)	Исследования по отводу тепла от поддона для улавливания кориума при плавлении активной зоны в случае тяжелой аварии
АР-1 (ФЗИ)	Исследования по кипению натрия
СТ-1421 (ОКБМ)	Испытания модельных ГЦН
СТ-1477 (ОКБМ)	Проведение комплекса полномасштабных испытаний на воде ГЦН первого и второго контуров с одновременным комплексным испытанием и сертификацией электроприводов ГЦН в реальных условиях нагружения при различных режимах работы
СТ-1861 (ОКБМ)	Функциональные и ресурсные испытания ИМ СУЗ АЗ, КС, РС
Стенд САЗ (ФЗИ). Пуск в эксплуатацию планируется в 2011г.	Изучение способов контроля течи воды (пара) в натрий, обоснование эффективности системы автоматической защиты парогенератора при разуплотнении его теплообменной поверхности. Исследование режимов работы основного оборудования и разработка программы управления оборудованием стенда в аварийных ситуациях. Отработка методов интенсивной очистки натриевого контура от продуктов реакции натрия с водой

- разработаны и апробированы технические решения по основному оборудованию и компоновке РУ;
- созданы и обоснованы основные конструкционные материалы, определены направления их дальнейшего совершенствования;
- разработана нормативно-методологическая база, созданы современные расчетные коды для обоснования проектных характеристик и безопасности быстрых натриевых реакторов;
- сохранена в достаточной степени для использования при разработке новых проектов обширная экспериментальная база, созданная в обоснование проектов БН;
- восстановлены или разработаны вновь уникальные технологии изготовления оборудования и специфических контрольно-измерительных приборов, создана устойчивая кооперация российских предприятий по их изготовлению, решаются вопросы кадровой политики.

Основной целью создания реактора БН-800 является освоение смешанного уран-плутониевого топлива, создание основ замкнутого топливного цикла и под-

тверждение технических решений по безопасности, которые намечено использовать и в перспективном проекте БН-1200.

Целью проекта БН-1200 является создание до 2020 г. головного энергоблока с высокими технико-экономическими показателями и показателями безопасности, удовлетворяющего требованиям к установкам IV поколения, для последующего серийного сооружения энергоблоков данного типа.

Накопленный опыт разработки и эксплуатации БН в России свидетельствует о зрелости натриевой технологии и ее способности достичь целей, поставленных ФЦП ЯЭНП: решение проблемы топливообеспечения атомной энергетики на длительную перспективу, создание структуры замкнутого топливного цикла в промышленном масштабе, снижение объемов радиоактивных отходов за счет переработки ОЯТ ВВЭР и использования выделенных из него плутония и младших актинидов.

### **Литература**

1. Поплавский В.М. Быстрые реакторы. Состояние и перспективы//Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 5. – С. 327-335.
2. Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Зродников А.В. и др.//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 191 – 197.
3. Ошканов Н., Говоров П., Кузнецов А. 28 лет эксплуатации. Энергоблок с реактором на быстрых нейтронах БН-600: основные технико-экономические показатели//Росэнергоатом. 2008. – № 8. – С. 34-37.
4. Ошканов Н.Н., Сараев О.М., Баканов М.В. и др. 30-летний опыт эксплуатации натриевого быстрого реактора БН-600//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 186-191.
5. Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А. Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 Белоярской АЭС//Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 5. – С. 342-346.
6. Носков Ю.В. Второе рождение БН-800//Росэнергоатом. – 2008. – № 11. – С. 15-17.
7. Костин В.И., Васильев Б.А. Задачи сооружения БН-800 и возможности создания перспективных быстрых реакторов//Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – Вып. 1. – С. 21-26.
8. Сараев О.М., Носков Ю.В., Зверев Д.Л. и др. Обоснование проекта и состояние сооружения энергоблока БН-800//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 197-201.
9. Шкабура И. Время быстрых//Росэнергоатом. – 2009. – № 12. – С. 6-11.
10. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М., Багдасаров Ю.Е. и др. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 201-206.
11. Васильев Б.А., Каманин Ю.Л., Гладков В.В. и др. Совершенствование оборудования реакторных установок на быстрых нейтронах//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 241-245.
12. Васильев Б.А., Тимофеев А.В., Любимов М.А. и др. Компонировочные и конструктивные решения системы перегрузки перспективного реактора БН//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 246-249.

Поступила в редакцию 14.10.2010



conjugated problem of heat transfer in the pipe at constant heat flux from pipe wall and problem with heat release in the wall.

**УДК 539.1.07:621.384.8**

*Plasma-optical three-division Spent Nuclear Fuel* \V.M. Bardakov, Vo Nhu Dan, G.N. Kichigin, N.A. Strokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

For plasma-optical mass separator POMS-E-3 found the modes in which a separation of spent nuclear fuel into 3 parts, corresponding to two groups of fission products and transuranic elements. Proposed for the same purpose, a new plasma-optical mass separator POMS-CV, which excluded whirler.

**УДК 621.039.5**

*Mastering of the fast sodium reactor technology. Construction of the BN-800 reactor* \D.L. Zverev, B.A. Vasilev, V.Yu. Sedakov, N.G. Kuzavkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 6 tables, 6 illustrations. – References, 12 titles.

The main aim of the BN-800 reactor construction is the perfection of the closed fuel cycle. The measures to improve BN800 reliability, safety and economic performance as compared to its predecessor BN-600 are focused upon.

**УДК 621.314.5**

*Modeling of Unit Power Supply of Nuclear Power Plant* \K.K. Krutikov, V.V. Rozhkov, V.N. Ivanov, E.A. Perfilyev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

In the soft of MatLab the package of the models is developed, allowing to investigate the basic modes of functioning of blocks of units of an uninterrupted food in updating for Nuclear Power Plant. The comparative analysis of units of the uninterrupted food which is let out by different firms is given, results of modeling of one of possible enough difficult scenarios of work of the unit are resulted.

**УДК 621.039.566**

*Radiological Aspects of Nuclear Power Plant Accidents* \V.A. Kutkov, V.V. Tkachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 5 tables, 1 illustration. – References, 24 titles.

The article deals with international recommendations for the protection of the public in radiation emergency. Comparison of the rules and regulations of the Russian Federation, the governing radiation protection of workers and the public in the event of nuclear accidents at NPP, with relevant international guidelines, shows that this national system is not complete and requires a revision of the regulatory framework to bring it into compliance with IAEA safety standards.

**УДК 621.039.548.5**

*Estimation of the WWER-1000 Fuel Element Cladding Damage Parameter Axial Distribution at Day Cycle Power Maneuvering* \M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 6 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

A calculation estimation of the WWER-1000 fuel element cladding damage parameter axial distribution at day cycle power maneuvering, taking into account the fact that the fuel element axial segments and fuel assemblies differ greatly in their local linear heat rate jump and stationary power values, has been done. It has been obtained that on condition that the fuel element length is divided into eight equal axial segments, the sixth (counting from the core bottom) axial segment cladding durability limits the WWER-1000 operation time at day cycle power maneuvering.