

4. Поплавский В.М., Цибуля А.М., Камаев А.А. и др. Перспективный натриевый быстрый реактор БН-1800, удовлетворяющий требованиям ядерной энергетики XXI века. — См. наст. вып., с. 335—342.
5. Зродников А.В., Читайкин В.И., Тошинский Г.И. и др. Свинцово-висмутовые реакторы на быстрых нейтронах для атомной энергетики России. — В сб.: 3-я научн. конф. Минатома России «Атомная энергетика. Состояние и перспективы» Москва, 5 июня 2002 г., с. 123.
6. Беззубцев В.С., Емельянов В.С., Адамов Е.О. и др. Инновационный проект АЭС с реактором БРЕСТ и пристанционным топливным циклом для площадки Белоярской АЭС. — Там же, с. 85.
7. Oka Y., Koshizuka S. Design concept of once-through cycle supercritical — pressure light water cooled reactors. — In: Proc. of the First Intern. Symp. on Supercritical Water-Cooled Reactors. Nov. 6—9, 2000. Tokyo, Japan, Rep. 101, p. 1—22.
8. Кириллов П.Л. Переход на сверхкритические параметры — путь совершенствования АЭС с водоохлаждаемыми реакторами. — Теплоэнергетика, 2001, № 12, с. 6—10.
9. Hejzlar P., Dricoll M., Todreas N. A modular, gas turbine fast reactor concept (MFGR-GT). — Trans. Am. Nucl. Soc., 2001, v. 84, p. 239.
10. Kouchi D. Possibility of highly efficient uranium utilization with pebble-bed fast reactor. — An. Nucl. Energy, 2002, v. 27, № 12, p. 1139.
11. Hejzlar P., Dricoll M., Todreas N. The long-life modular gas turbine fast reactor concept. — In: Intern. Congress on Advanced Nuclear Power Plants. Hollywood, Florida, June 9—13, 2002, p. 321.

УДК 621.039.526

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ НАТРИЕВЫЙ БЫСТРЫЙ РЕАКТОР БН-1800, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЙ ТРЕБОВАНИЯМ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ XXI ВЕКА

*Поплавский В.М., Цибуля А.М., Камаев А.А., Багдасаров Ю.Е.,
Кривицкий И.Ю., Матвеев В.И. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского),
Васильев Б.А., Будыльский А.Д., Каманин Ю.Л., Кузавков Н.Г.,
Тимофеев А.В., Шкарин В.И. (ОКБМ), Сукнев К.Л., Ершов В.Н., Попов С.В.,
Знаменский С.Г. (СПб АЭП), Денисов В.В., Карсонов В.И. (ОКБ «Гидропресс»)*

Основные принципы и направления разработки БН-1800. Разработка БН-1800 базируется на максимально возможном использовании апробированных научно обоснованных и отработанных технических решений, реализованных на БН-350, -600 и -800, применении новых технических решений, повышающих безопасность и экономичность. К апробированным могут быть отнесены следующие технические решения:

выбор в качестве теплоносителя натрия;

трехконтурная схема энергоблока — натрий в первом и втором контурах, рабочее тело — вода/пар. Данное техническое решение позволяет обеспечить высокий уровень безопасности, в частности, вывести аварии парогенераторов из разряда радиационно опасных;

интегральная компоновка первого (радиоактивного) контура с основным и страховочным корпусами.

Экономические показатели и характеристики безопасности энергоблока совершенствуются за счет:

повышения мощности энергоблока и основного оборудования;

увеличения к.п.д. паросилового цикла до 45,5—47% вследствие повышения температуры теплоносителя трех контуров, использования рабочего тела 3-го контура с закритическим давлением, применения схемы с натриевым промежуточным перегревом пара, оптимизации конструкции и схемы турбоустановки;

повышения проектного срока службы энергоблока до 60 лет, увеличения ресурса сменяемого оборудования в 1,5—2 раза по сравнению с достигнутым в БН-600;

увеличения интервала между перегрузками до 1,5—2 лет и достижения КИУМ 0,9;

интегрирования натриевых систем и оборудования первого контура в корпусе реактора;

применения корпусных парогенераторов;

использования новых схемно-конструктивных решений в перегрузке топлива с исключением промежуточных барабанов хранения ТВС;

оптимизации вспомогательных систем первых двух контуров;

использования систем безопасности, основанных на пассивном принципе действия: реализация системы аварийного расхолаживания на естественной циркуляции по всем контурам, создание пассивно срабатывающих по изменению расхода и температуры на выходе из активной зоны систем воздействия на реактивность, пассивно срабатывающих систем защиты от превышения давления в первом и втором контурах, оптимизация систем безопасности, локализирующих последствия проявления химической активности теплоносителя (системы автоматической защиты парогенератора, тушения возгораний натрия);

применения нитридного топлива, обеспечивающего выполнение условий, важных для безопасности (коэффициент воспроизводства активной зоны — около 1, натриевый пустотный эффект по активной зоне в целом — около нуля). Достижение выгорания нитридного топлива 13% тяж. ат. и более;

реализации экономичного топливного цикла, обеспечивающего сжигание актиноидов и технологическую поддержку режима нераспространения — исключение стадии топливного цикла с выделением плутония в чистом виде.

Описание энергоблока. Оборудование первого контура находится в корпусе реактора и состоит из активной зоны, шести промежуточных теплообменников и трех циркуляционных насосов. Циркуляционный тракт первого контура выполнен коллекторным: все насосы первого контура имеют общую всасывающую полость после теплообменников и через напорные трубы параллельно соединены с общей напорной камерой.

Каждая из шести петель второго контура включает в себя промежуточный теплообменник, парогенератор, циркуляционный насос второго контура и трубопроводы. Каждый парогенератор состоит из двух корпусов, один из которых является испарителем и пароперегревателем, второй осуществляет промежуточный перегрев пара после цилиндра высокого давления турбины.

Параллельно основным корпусам парогенератора в каждой петле второго контура установлен воздушный теплообменник, выполняющий функции аварийного расхолаживания реактора при потере основных источников электроснабжения.

В каждом корпусе парогенератора предусмотрена установка сбросных устройств по второму контуру с отводом среды в бак аварийного сброса первой

ступени, из которого газовая составляющая отводится в бак второй ступени и уже из него через сбросные устройства в атмосферу.

Третий контур состоит из паропроизводительной части парогенераторов, главных паропроводов, одного турбоагрегата, его вспомогательного оборудования и обслуживающих систем, оборудования деаэрации, подогрева и подачи питательной воды в парогенераторы (рис. 1, 2).

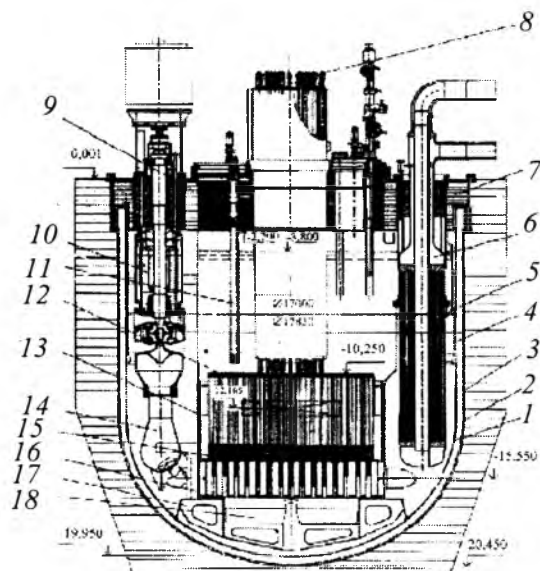
Основные характеристики блока БН-1800 следующие:

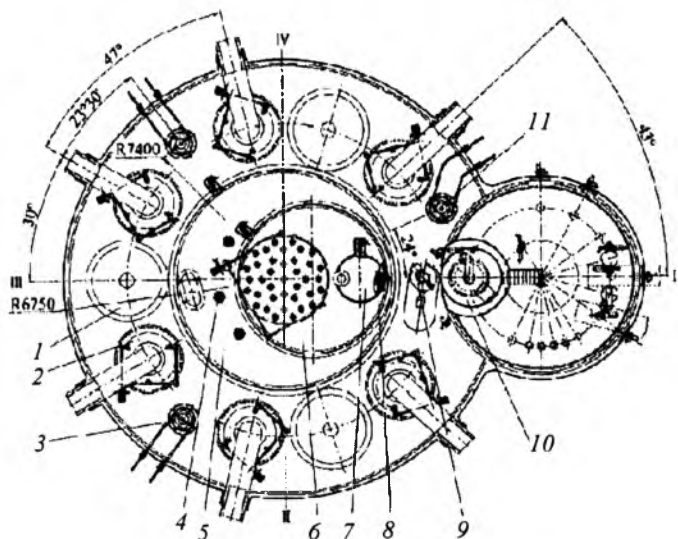
Мощность, МВт:	
тепловая . . .	4000
электрическая . . .	1800
К.п.д. брутто/нетто, % . . .	46,2/42,4
Температура натрия первого контура, °С:	
на входе в активную зону . . .	410
на входе в промежуточный теплообменник . . .	575
при перегрузке . . .	250
Число ГЦН первого контура . . .	3
Число промежуточных теплообменников . . .	6
Внутренний диаметр корпуса реактора, м . . .	17
Объем натрия в режиме перегрузки, м ³ . . .	2620
Давление газа в первом контуре, МПа:	
номинальный режим . . .	0,05
режим перегрузки . . .	0,005
Интервал между перегрузками, сут . . .	560
Число петель второго контура . . .	6
Промежуточный перегрев пара . . .	Натриевый

Активная зона. Обеспечение основных требований к активной зоне и топливному циклу. Натриевый пустотный эффект реактивности снижается за счет уплощенной формы активной зоны в сочетании с размещенной над ней натриевой прослойкой и верхним поглощающим экраном. По результатам предварительного анализа нескольких вариантов активной зоны принят вариант с использованием топлива одного обогащения. Такая компоновка имеет следующие особенности:

использование топлива одного состава значительно упрощает схему топливного цикла и сокращает номенклатуру твэлов до одного типа;

Р и с. 1. БН-1800 — разрез по главному циркуляционному насосу первого контура и промежуточному теплообменнику: 1 — корпус; 2 — облицовка шахты реактора; 3 — теплоизоляция; 4 — тепловой экран; 5 — внутренний корпус; 6 — промежуточный теплообменник; 7 — крыша корпуса; 8 — комплект исполнительных механизмов СУЗ; 9 — поворотная защита; 10 — главный циркуляционный насос первого контура; 11 — блок внутрикорпусных ионизационных камер; 12 — активная зона; 13 — отражатель; 14 — напорный трубопровод; 15 — комплект коллекторов; 16 — напорная камера; 17 — опорная конструкция активной зоны; 18 — устройство для сбора топлива





Р и с. 2. БН-1800 — вид сверху:
 1 — главный циркуляционный насос первого контура; 2 — промежуточный теплообменник; 3 — фильтр-ловушка; 4 — блок внутрикорпусных ионизационных камер; 5, 6, 7 — большая, средняя, малая поворотная пробка соответственно; 8 — механизм перегрузки; 9 — элеватор; 10 — комплекс вне реакторной перегрузки; 11 — система контроля примесей в натрии

относительно низкая теплонапряженность активной зоны допускает формирование распределения нейтронного поля по радиусу с выраженным повышением в центральной части;

формирование нейтронного поля с максимумом в области размещения регулирующих стержней обеспечивает их высокую эффективность;

ограниченный диаметр зоны размещения стержней позволяет, несмотря на увеличенный радиус активной зоны, сохранить умеренный диаметр центральной колонны;

повышенная утечка нейтронов из центральной области снижает натриевый пустотный эффект реактивности и позволяет немного увеличить высоту активной зоны;

благодаря стабильности распределения тепловыделения в процессе работы удается обеспечить оптимальное распределение расхода теплоносителя, несмотря на относительно высокий коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу;

для повышения эффективности использования топлива кампания периферийных ТВС увеличена соответственно их меньшей нагруженности.

Состав активной зоны. Активная зона состоит из 1686 сборок разного типа, установленных со средним шагом 188 мм. Центральная часть активной зоны сформирована 642 ТВС с топливом одного обогащения, 6 стальными сборками и 37 ячейками с регулирующими стержнями. Далее по радиусу сформирована боковая защита из одного ряда стальных сборок и трех рядов сборок с карбидом бора. За боковой защитой размещено внутриреакторное хранилище, емкость которого с некоторым запасом достаточна для размещения всех отработавших ТВС, выгружаемых за одну перегрузку. За внутриреакторным хранилищем в трех рядах ячеек размещены сборки с карбидом бора для формирования дополнительной заменяемой боковой защиты.

Основные технические характеристики активной зоны следующие:

Полная загрузка нитридного уран-плутониевого топлива, т . . .	86,3
Полная загрузка плутонием и его дочерними элементами, т . . .	12
Диаметр активной зоны, мм . . .	5167
Размер шестигранного чехла, мм . . .	184×3,5
Сталь чехла . . .	ЭП 450
Число твэлов в ТВС . . .	331
Диаметр и толщина оболочки твэла, мм . . .	8,6×0,55
Сталь оболочки твэла . . .	Модифицированная хромистая
Эффективная плотность топлива, г/см ³ . . .	11,5
Интервал между перегрузками, эф. сут . . .	500
Число ТВС, обновляемых за одну перегрузку . . .	200
Максимальное выгорание топлива, % тяж. ат . . .	12,2
Суммарный расход натрия через активную зону, т/с . . .	19,1
Перепад давления на активной зоне, МПа . . .	0,5
Высота, мм:	
активной зоны . . .	800
натриевой прослойки . . .	400
верхней борной защиты . . .	650
нижнего стального экрана . . .	450

Схема перегрузки и организация топливного цикла. В активной зоне принята равномерная частичная перегрузка ТВС. Для выравнивания глубины выгорания топлива длительность работы в двух периферийных рядах ТВС установлена повышенной — четыре интервала между перегрузками против трех интервалов для остальных ТВС. Отработавшие ТВС выдерживаются во внутриреакторном хранилище в течение одного интервала между перегрузками, затем выгружаются из реактора для переработки во внешнем топливном цикле. Топливо отработавших ТВС после необходимой выдержки и переработки используется для фабрикации новых ТВС.

Характеристики топливного цикла активной зоны получены, исходя из такой схемы внешнего топливного цикла, по которой из отработавшего топлива извлекаются только продукты деления и после восполнения соответствующей убыли массы природным ураном получается загружаемое топливо. Во внешнем топливном цикле предусматриваются выдержка 2 года и потери топлива 0,5%.

Сборки пассивной аварийной защиты обеспечивают независимое от систем управления экстренное снижение мощности реактора при нарушении нормальной эксплуатации с уменьшением расхода теплоносителя в первом контуре ниже половины номинального и повышении температуры теплоносителя на выходе из активной зоны.

Основные эффекты и коэффициенты реактивности, % $\Delta k/k$:

Изменение реактивности при выгорании топлива за 500 эф. сут . . .	-0,3
Натриевый пустотный эффект реактивности . . .	0,2
Натриевый плотностный коэффициент . . .	0
Температурно-мощностной эффект реактивности . . .	-0,9
Максимальный запас реактивности (с учетом погрешности расчета) . . .	1,9

Первая система воздействия на реактивность (19 компенсирующих стержней) . . .	3,7
Вторая система воздействия на реактивность (13 стержней аварийной защиты) . . .	2,03
Третья система воздействия на реактивность (5 стержней пассивной аварийной защиты) . . .	0,77
Все стержни без наиболее эффективного стержня . . .	4,95
Эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$. . .	0,0036

Парогенераторы. Парогенератор представляет собой прямоточный теплообменный аппарат корпусного типа со сверхкритическими параметрами по пароводяному тракту. В состав парогенератора входят испаритель-перегреватель и промежуточный пароперегреватель, объединенные трубопроводами обвязки по теплоносителю. Оба включены по теплоносителю параллельно. Движение сред (теплоноситель, рабочее тело) — противоточное.

Концепция корпусного парогенератора позволяет снизить его удельную металлоемкость более чем в 5 раз по сравнению с соответствующим показателем секционно-модульного парогенератора.

Для обеспечения работоспособности в течение назначенного ресурса приняты следующие решения:

в качестве материала теплообменных труб испарителя-перегревателя применяется высоконикелевый сплав с содержанием 21% Cr и 32% Ni;

в качестве материала теплообменных труб промежуточного пароперегревателя используется либо аустенитная сталь X18H9, либо высоконикелевый сплав 21% Cr, 32% Ni;

относительный шаг пучка теплообменных труб испарителя-перегревателя увеличен (по сравнению с шагом пучка модуля парогенератора БН-600) до 2—2,2. Это означает, что при диаметре 16 мм расстояние между трубками составит 16—19 мм против 12 мм в испарителе БН-600. Относительный шаг пучка промежуточного пароперегревателя сохранен таким же, как для модулей БН-600;

скорость теплоносителя в межтрубном пространстве пучка длинномерных труб испарителя-перегревателя и промежуточного перегревателя 2—2,5 м/с, дальнейшее ее увеличение нецелесообразно вследствие вероятности вибрационного износа металла теплообменных труб.

В совокупности перечисленные меры позволяют существенно увеличить время образования сквозных отверстий в соседних трубах в широком диапазоне возможных течей воды в натрий в дефектной трубе.

Характеристики парогенератора БН-1800:

	Испаритель-перегреватель	Промежуточный пароперегреватель
Тепловая мощность, МВт . . .	536	131
Пар на выходе:		
давление, МПа . . .	25	3,5
температура, °C . . .	525	525
Температура рабочего тела на входе, °C . . .	270	275
Температура теплоносителя, °C:		
на входе . . .	540	540
на выходе . . .	370	370

Паропроизводительность, кг/с . . .	257,55	214,87
Расход теплоносителя, кг/с . . .	2472,3	603,2
Теплообменные трубы:		
размер, мм . . .	16×2	25×2
число . . .	1921	823
материал . . .	03X21H32M3Б	03X21H32M3Б, 09X18H9
длина, м . . .	28	21
шаг размещения в треугольной решетке, мм . . .	33	33
Внутренний диаметр и толщина пароводяных камер, мм . . .		
	1800×205	1500×40
Толщина трубной доски, мм . . .	500	200
Материал пароводяных камер . . .	03X21H32M3Б	03X21H32M3Б
Материал корпуса . . .	09X18H9	09X18H9
Масса оборудования, т . . .	114	48

Безопасность реакторной установки. На данном этапе проектирования БН-1800 отсутствуют детальные проработки по управляющим, обеспечивающим и локализирующим системам безопасности энергоблока, что не позволяет построить реальные сценарии развития запроектных аварий с последующей оценкой их последствий. Поэтому для оценки безопасности при запроектных авариях применен следующий метод рассмотрения — определены некоторые предельные состояния, характеризующиеся частичным или полным отказом активных систем и элементов безопасности.

Были рассмотрены следующие исходные события:

полная потеря системного и надежного электроснабжения со срабатыванием и без срабатывания исполнительных механизмов СУЗ при работе на 100%-ной мощности;

ошибочное извлечение ТВС из активной зоны при перегрузке;

разрыв полного сечения натриевого трубопровода второго контура;

взаимодействие натрия с водой в парогенераторных боксах.

В результате анализа показано, что ни в одной из перечисленных аварий пределы безопасной эксплуатации не превышаются.

Основные технико-экономические характеристики БН-1800. Расчеты технико-экономических характеристик выполнены в соответствии с Методикой расчета основных технико-экономических показателей АЭС, АТЭЦ, АСТ Атомэнергопроекта.

Технико-экономические показатели энергоблока БН-1800 (в базовых ценах 1991 г.):

Электрическая мощность энергоблока, МВт . . .	1800
Число часов использования установленной электрической мощности (КИУМ 0,9), ч/год . . .	7896
Коэффициент полезного действия АЭС брутто (с учетом мощности турбопривода), % . . .	46,2
Капитальные вложения в строительство, млн руб. . . .	1529
Численность промышленно-производственного персонала, чел. . . .	750
Штатный коэффициент, чел./МВт . . .	0,42
Себестоимость электроэнергии, коп./(кВт·ч) . . .	1,6

Удельная топливная составляющая себестоимости электроэнергии, коп./(кВт·ч) . . .	0,6
Годовая прибыль от реализации продукции, млн руб. . . .	502.8
Рентабельность производства, % . . .	30
Срок окупаемости капитальных вложений, год . . .	3,4
Стоимость установленного кВт, коп./кВт . . .	860

Анализ показывает, что экономические показатели БН-1800 находятся на сопоставимом уровне с ВВЭР-1000, -1500.

УДК 621.039.534

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКА БН-600 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А. (Белоярская АЭС)

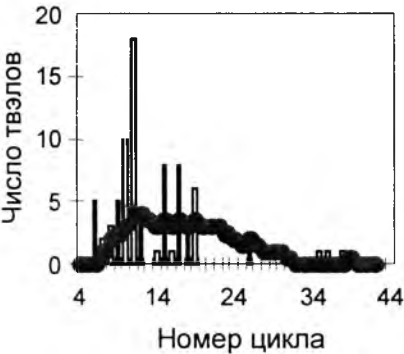
Третий энергоблок Белоярской АЭС с БН-600 введен в действие в начале 1980 г. С 1982 г. он работает на номинальной мощности. За время эксплуатации БН-600 проработал на мощности более 6000 эф. сут, 77% времени он работал, 21% времени было отведено на перегрузку топлива, проведение инспекций и техническое обслуживание. Непланные потери составили 2%.

Основными задачами, которые приходилось и приходится решать при эксплуатации БН-600, явились повышение выгорания топлива, предотвращение и ликвидация последствий натриевых течей, техническое обслуживание уникального натриевого оборудования, вывод показателей эксплуатации на уровень показателей серийных энергоблоков.

Выгорание топлива. Исходная активная зона имела двузонную компоновку (обогащение 21 и 33%, 3-кратная перегрузка через 100 сут) и выгорание 7% тяж. ат. Несмотря на низкое выгорание, наблюдались случаи разгерметизации оболочек твэлов. Первый случай разгерметизации произошел в цикле № 6 ТВС зоны воспроизводства. Максимальной она достигла в цикле № 11, когда разгерметизировались

18 твэлов до контакта топлива с теплоносителем по причине напряжений, возникших в ребристых оболочках твэлов (рис. 1). Поэтому было снижено выгорание, затем проведен переход на гладкие оболочки твэлов зоны воспроизводства.

Второй этап разгерметизации начался в цикле № 15 (восемь негерметичных твэлов с контактом топливо—теплоноситель) и продолжался до цикла № 19 по причине существенного скачкообразного изменения мощности при пере-становках и поворотах ТВС в сочетании со значимым радиационным повреждением оболочек. Поэтому была проведена первая модернизация



Р и с. 1. Разгерметизация твэлов до контакта с теплоносителем: ■ — число твэлов; ● — медиана