



ФЭИ
РОСАТОМ

Основные технические решения энергоблока БН-350, повлиявшие на развитие направления БН

Доклад на торжественном заседании НТС АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», посвященном
50-летию энергопуска реактора БН-350
Камаев Алексей Альфредович
Начальник инженерно-технического департамента ОЯЭ

14.07.2023

Основные задачи этапа опытно-промышленного освоения технологии натриевых быстрых реакторов БН (1)



Важным этапом развития РУ БН в нашей стране после ввода БР-5 стал этап опытно-промышленного освоения натриевой технологии, а именно: разработка проекта, создание, ввод и эксплуатация реактора БН-350.

При создании БН-350 был сделан гигантский шаг от маленького исследовательского реактора БР-5 мощностью 5 МВт(т) к реакторной установке промышленного масштаба – 1000 МВт(т).

Сравнение масштабов реакторных установок

Характеристики	БР-5	БН-350
Тепловая мощность, МВт	5	1000
Объем натрия в первом контуре, м ³	1,7	520
Расход натрия в первом контуре, м ³ /ч	240	31000
Диаметр корпуса реактора, мм	300	6000
Диаметр трубопроводов, мм	100	500 и 600

Причины такого увеличения мощности:

- при меньшей мощности экономика реакторной установки по производству энергии и вторичного горючего была бы убыточной;
- строительство реактора меньшей мощности не решало задачи овладения натриевой технологией в промышленном масштабе.

Основные задачи этапа опытно-промышленного освоения технологии натриевых быстрых реакторов БН (2)



Задачи, стоявшие перед БН-350

1. Подтверждение принципиальных решений по конструкциям оборудования, по построению технологических систем, по принципам обеспечения безопасности, по эксплуатационным режимам и т.д.
2. Получение реального опыта ввода в эксплуатацию промышленной установки, ведения эксплуатационных режимов, пусков и остановов, перегрузки топлива, ремонтов и текущего обслуживания, понимания правильности предусматриваемых мер предосторожности или их избыточности, оптимизации режимов и действий персонала в различных ситуациях и т.д.
3. Накопление статистики по отказам оборудования, узлов, механизмов, средств автоматики и защитных устройств, по типовым нарушениям режимов и ошибкам персонала, по влиянию этих отказов или нарушений на безопасность и работоспособность установки.
4. Наконец, опыт подготовки и обучения персонала для эксплуатации реактора нового типа с достаточно экзотическим теплоносителем.

Основные задачи этапа опытно-промышленного освоения технологии натриевых быстрых реакторов БН (З)



Скачок масштаба установки при переходе к РУ БН-350 и поставленные перед установкой задачи потребовали тщательного анализа технических решений и принципов, касающихся натриевой технологии, учета масштабного фактора.

В свете поставленных задач при создании БН-350 заново рассматривались и оценивались многие вопросы, казалось бы, уже подтвержденные опытом БР-5, в том числе такие, как:

- число тепловыделяющих петель;
- предотвращение разрыва контура циркуляции;
- необходимость запорной арматуры на петлях первого контура;
- направление движения натрия в реакторе;
- место ГЦН в контуре, влияние конструкции ГЦН на ПТО;
- стабильность уровней и давлений;
- опорная температура, ее поддержание;
- количество сливных баков первого и второго контуров, средства для заполнения контуров и т.д.

С другой стороны, принципиальные решения по установке БН-350 были выбраны консервативно, с учетом имеющегося на начало 1960-х годов опыта и знаний, а также назначения реактора как трехцелевого (производство электрической и тепловой энергии и наработки вторичного ядерного горючего – плутония). В проекте БН-350 были сохранены характерные параметры (в частности, средняя энергонапряженность активной зоны, максимальная температура теплоносителя), уже освоенные на БР-5, что позволяло надеяться на надежную работу оборудования новой установки.

Основные задачи этапа опытно-промышленного освоения технологии натриевых быстрых реакторов БН (4)



Несмотря на хорошую работу реактора с его механизмами, главных циркуляционных насосов, промтеплообменников, арматуры большого диаметра и других элементов технологической схемы множественные течи воды в натрий в парогенераторах привели к тому, что реактор так и не был выведен на номинальную мощность. Максимально достигнутая мощность составляла 75 % номинальной при несколько пониженных параметрах.

Характеристики реакторной установки БН-350

Параметр	Режим	
	проектный	максимальный достигнутый
Мощность тепловая, МВт	1000	750
Температура натрия первого контура:		
– на входе в реактор, °С	300	288
– на выходе из реактора, °С	500	437
Температура натрия второго контура:		
– на входе в парогенератор, °С	450	420
– на выходе из парогенератора, °С	270	260
Перегретый пар:		
– давление, МПа	5,0	4,5
– температура, °С	435	405
– расход, т/ч	1400	1070

Разработка БН-350 осуществлялась в период практического отсутствия нормативных документов обеспечения безопасности АЭС. После пуска реактора БН-350 начали разрабатывать нормативные документы, в том числе ОПБ и ПБЯ. Это потребовало при эксплуатации БН-350 анализировать отступления от постоянно меняющихся требований НТД и доказывать, что при этих отступлениях безопасность эксплуатации энергоблока обеспечивается.

Основные задачи этапа опытно-промышленного освоения технологии натриевых быстрых реакторов БН (5)



Указанная работа имела положительные результаты с точки зрения опытно-промышленного освоения технологии БН:

- она подтвердила жизнеспособность технологии БН в условиях все более ужесточающихся требований НТД;
- обеспечила большим объемом знаний разработку новых блоков.

К наиболее важным результатам эксплуатации БН-350, относятся:

- надежность полномасштабного оборудования энергетического блока, работающего в среде натрия;
- отработка технологии приготовления больших объемов натрия (~ 1000 м³), подготовки емкостей, корпуса реактора, разветвленных трубопроводов и другого крупногабаритного оборудования к заполнению натрием и технология их заполнения;
- определение наведенной активности натрия в первом контуре энергетического блока (~ 20 Ки/л) и радиационной обстановки на работающем энергоблоке и при ремонтах оборудования;
- хорошее совпадение расчетных и измеренных физических характеристик активной зоны, что впервые позволило проверить методы их предсказания для энергетических реакторов;
- отсутствие накопления газа в активной зоне реактора по измерениям барометрического эффекта реактивности;
- малый гидродинамический эффект реактивности активной зоны при изменениях расхода натрия;
- эффективность мер обнаружения утечек натрия, средств тушения горения натрия и уборки продуктов горения.

Главные технические решения, внесенные в проекты БН-600 и БН-800 по результатам разработки, создания и эксплуатации реактора БН-350:

- интегральная компоновка первого контура;
- поглощающие органы компенсации изменения реактивности от выгорания топлива;
- ГЦН-1,2 с регулированием частоты вращения;
- прямоточный секционно-модульный парогенератор;
- повышенные параметры натриевых контуров и паросилового цикла.

Основные задачи этапа опытно-промышленного освоения технологии натриевых быстрых реакторов БН (6)



Основные характеристики отечественных быстрых натриевых реакторов

Параметр	Установка				
	БР-5	БН-350*	БН-600	БН-800	БОР
Год начала проектирования	1956	1960	1963	1974	1964
Тепловая мощность, МВт	5 (8) ^{*****}	1000	1470	2100	60
Электрическая мощность, МВт	–	350 ^{**}	600	880	12
Компоновка первого контура	петлевая	петлевая	баковая	баковая	петлевая
Топливо	PuO ₂	UO ₂	UO ₂	PuO ₂ -UO ₂	UO ₂
Число ТВС в активной зоне	–	224	369	565	114
Энергонапряженность активной зоны, кВт/л		500	400 ^{***}	440	
Температура на выходе из реактора, °С	500	500	550	547	530
Температура на входе в реактор, °С	430	300	377	354	330
Температура свежего пара, °С	–	435	505	490	430
Давление свежего пара, МПа	–	4,9	13,7	13,7	9,0
Промежуточный перегрев пара	–	–	натриевый	паровой	–
Объем натрия в первом контуре при t = 250 °С, м ³	1,7	520	820	1000	17
Объем натрия в петле второго контура при t = 250 °С, м ³	1,2	70	320	300	13
Число теплоотводящих петель	2	6 ^{****}	3	3	2

* Приведены проектные параметры для мощности 1000 МВт(т).

** Условно, без учета расхода тепла на опреснительные установки.

*** Данные 2005 г. – после модернизации активной зоны.

**** В том числе одна резервная.

***** – в скобках: после реконструкции реактора.

Основные вехи проектирования, создания и эксплуатации реактора БН-350 (1)



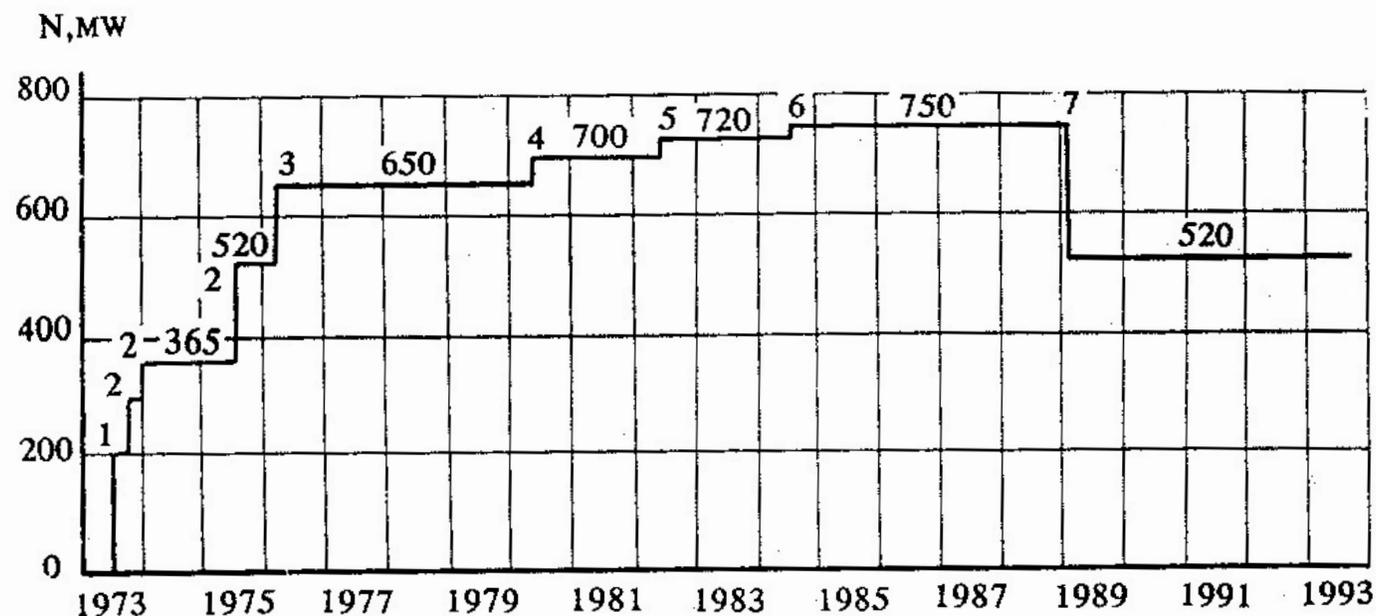
- 25 августа 1960 г. – Постановление Совета Министров СССР о разработке промышленного двухцелевого реактора БН-350 $N_T=1000$ мВт
- 12 апреля 1961 г. – утвержден на заседании НТС Минсредмаша эскизный проект реакторной установки
- середина 1963 г. – завершены проекты РУ и АЭС с реактором БН-350;
- 1964 г. – защита проектов и начало строительства реакторного здания;
- начало 1971 г. – смонтированы корпуса ПТО, ГЦН-1, ГЦН-2, ПГ
- конец 1971 г. – завершены основные строительные-монтажные работы
- май 1972 г. – введены в эксплуатацию вспомогательные системы, обеспечивающие работу основных контуров установки
- сентябрь 1972 г. – разогрев реактора с оборудованием первого контура и проведена заливка 490 м^3 натрия, прошедшего полную очистку
- октябрь 1972 г. – завершились пуско-наладочные работы на основных контурах и системах установки; выполнена серия экспериментов с имитационной активной зоной
- 13 ноября 1972 г. – началась загрузка топливных пакетов (сборок)

Основные вехи проектирования, создания и эксплуатации реактора БН-350 (2)



- 28 ноября 1972 г. – реактор выведен в надкритическое состояние и заглушен
- 29 ноября 1972 г. – официально осуществлен физический пуск реактора БН-350; реактор стабилизировали на мощности 1 кВт
- до марта 1973 г. – исследования физических характеристик реактора (этап «Физический пуск»)
- 16 июля 1973 г. – осуществлен энергетический пуск первого промышленного реактора БН-350; мощность 203 МВт(т), пар направлен на турбогенератор № 5 ТЭЦ-2
- 1973 – 1975 гг. – работа на уровне мощности до 300 МВт(т)
- с марта 1975 г. – работа на мощности 650 – 750 МВт(т) с выработкой электроэнергии 150 МВт(э) и 100000 т/сутки опресненной воды (в 1977 г. КИУМ=86 %)
- к 1976 г. – достигнуто проектное выгорание топлива 5 % т.ат., а затем 5,8 % т.ат.; дальнейшее увеличение выгорания ограничено значительным формоизменением топливных пакетов
- январь 1996 г. – июнь 1998 г. – работа на мощности 420 МВт(т) (50 МВт(э) и опреснение 45000т/сутки)
- 22 апреля 1999 г. – окончательная остановка реактора

Основные вехи проектирования, создания и эксплуатации реактора БН-350 (3)



1. 16 июня – энергопуск БН-350, мощность 200 МВт(т).
2. Повышение мощности по мере выполнения ремонтных работ на парогенераторах.
3. Март 1976 г. – завершение ремонтных работ на ПГ.
4. Май 1980 г. – запуск в эксплуатацию чешского ПГ «Надежность-1».
5. Июнь 1982 г. – запуск в эксплуатацию чешского ПГ «Надежность-2».
6. Июль 1984 г. – выход на максимальный разрешенный уровень мощности 750 МВт(т)
7. Январь 1989 г. – снижение мощности из-за течи чешского ПГ «Надежность»

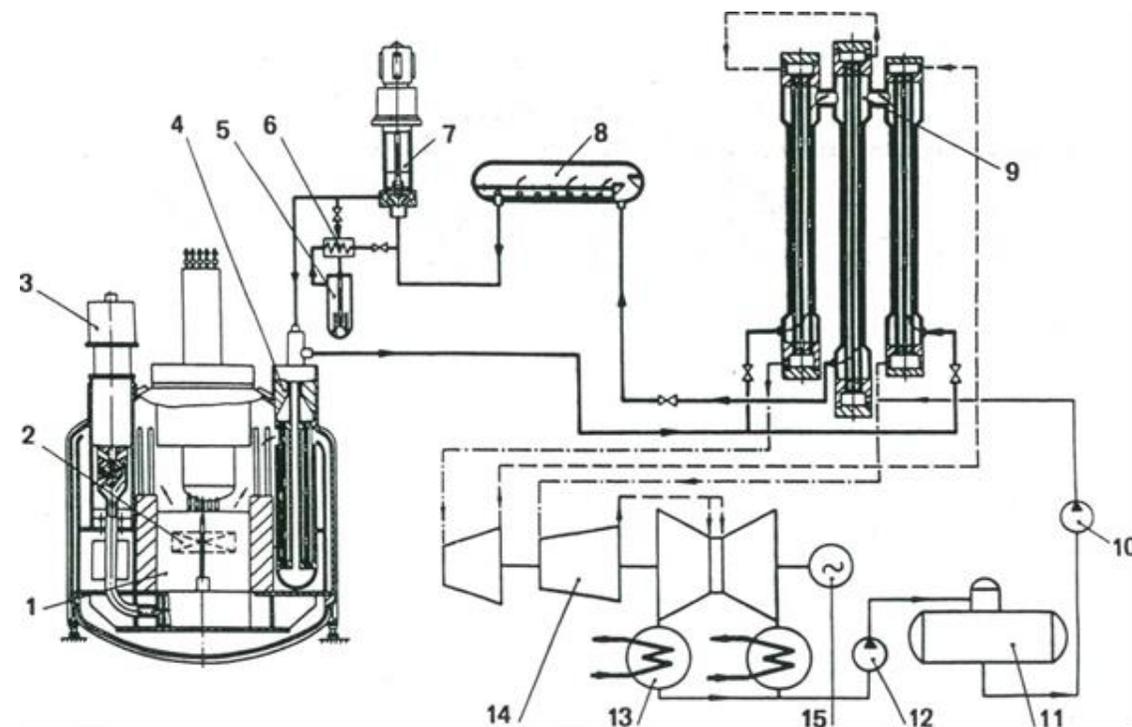
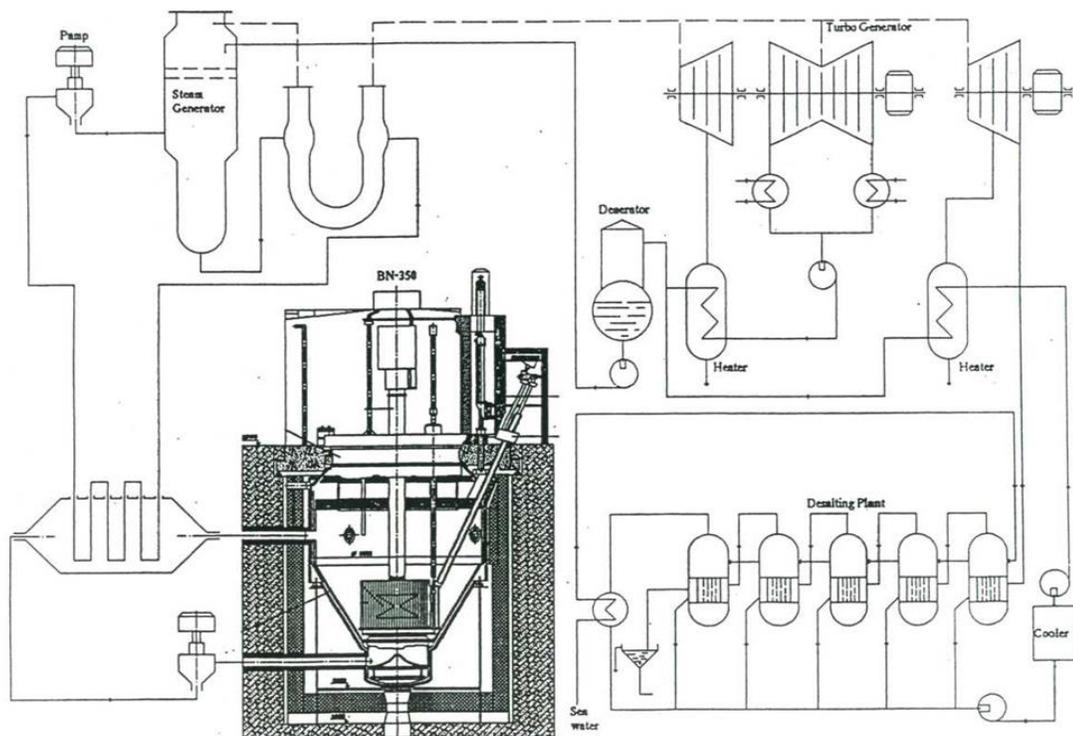
Изменение тепловой мощности реактора БН-350 за период его эксплуатации

Одно из преимуществ жидкометаллического теплоносителя (высокие температуры) – обеспечивает возможность использования паротурбинных установок обычной теплоэнергетики с высокими параметрами пара. Необходимость получения большего количества опресненной морской воды и обеспечения теплоснабжения г. Шевченко привела к использованию в проекте АЭС противодавленческих турбин на пониженные параметры пара из числа выпускаемых турбостроительными заводами.

По проекту перегретый пар, вырабатываемый шестью парогенераторными установками, поступает в общий паропровод и из него на три турбины мощностью по 50 МВт. Таким образом, АЭС с БН-350 стало трехцелевой электростанцией, которая решает вопросы снабжения электроэнергией, теплом и дистиллятом.

Для следующих отечественных энергоблоков с реакторами типа БН от многоцелевого назначения установки отказались, что позволило существенно повысить КПД паросилового цикла и экономику АЭС. Стала применяться тепловая схема энергоблока, ориентированная в первую очередь на выработку электроэнергии и, частично, на теплофикацию.

Схемно-компоновочные решения БН-350 (2)



Принципиальная тепловая схема установки с реактором БН-350

1 – реактор; 2 – активная зона; 3 – ГЦН-1; 4 – ПТО; 5 – холодная фильтр-ловушка; 6 – рекуператор; 7 – ГЦН-2; 8 – буферная емкость; 9 – парогенератор; 10 – питательный насос; 11 – деаэратор; 12 – конденсатный насос; 13 – конденсатор турбины; 14 – турбина; 15 – генератор

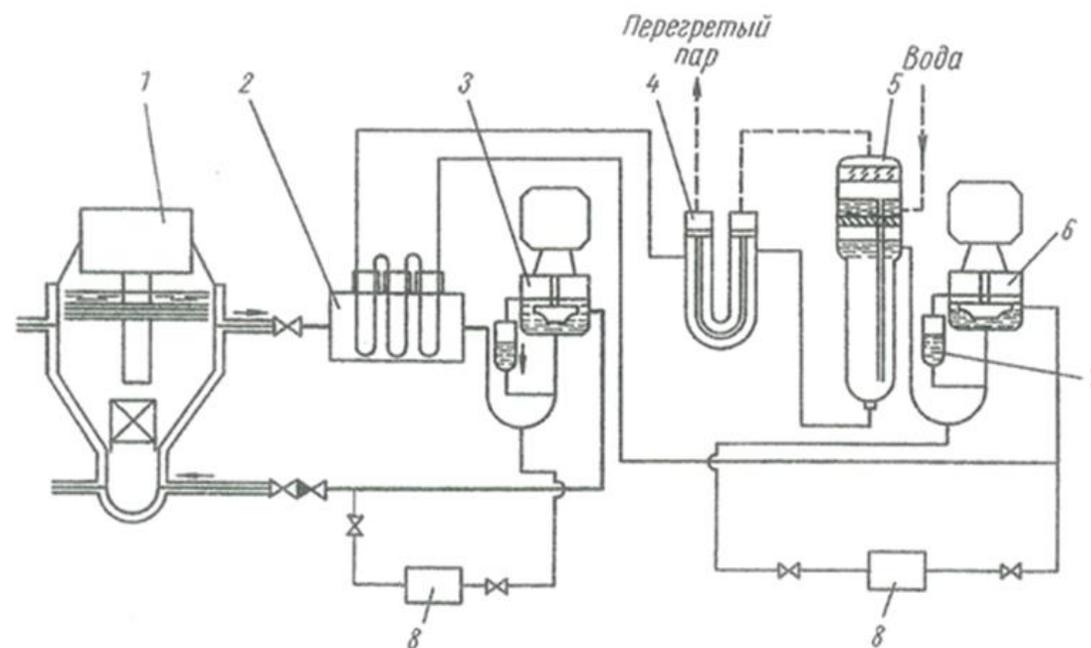
Тепловая схема энергоблока с реактором БН-600

Схемно-компоновочные решения БН-350 (3)

Общим элементом петель первого контура является реактор. Все насосы работают на общий напорный коллектор, расположенный под активной зоной. Из напорного коллектора натрий поступает на охлаждение активной зоны, экранов и корпуса реактора, и далее с температурой 500 °С поступает в ПТО.

Кроме ПТО и ГЦН в каждой петле первого контура предусмотрены обратные клапаны на напоре ГЦН и отсечные задвижки на всасывающей и напорной линиях.

На схеме показана также периодически работающая система очистки теплоносителя. Она является общей для всего контура и подключается к напорным и всасывающим трубопроводам двух ГЦН.



Принципиальная технологическая схема жидкометаллических контуров реактора БН-350

Схемно-компоновочные решения БН-350 (4)



Все петли второго контура полностью независимы. Натрий, проходя ПТО, с температурой 450 °С поступает в парогенератор. Пройдя последовательно пароперегревательные и испарительные секции, натрий охлаждается до 270 °С. Далее ГЦН-2 нагнетает его обратно в ПТО.

Во втором контуре также предусмотрены системы очистки теплоносителя, отдельные для каждой петли.

Гидравлическая схема петель первого и второго контуров получилась сложной из-за большого количества газовых полостей с уровнем натрия: первый контур – 13 уровней, второй контур – 4 уровня на петлю.

Питательная вода третьего контура поступает в парогенераторы из регенеративной системы турбин с температурой 158 °С. Получаемый в испарительных секциях насыщенный пар с параметрами 5,1 МПа и 267 °С перегревается в пароперегревателях до 435 °С и направляется в турбины.

Реактор с механизмами СУЗ и перегрузки топлива (1)

Корпус реактора – это бак переменного диаметра, выполненный из нержавеющей стали X18H9. Максимальный диаметр 6 м, минимальный – 2,2 м, толщина стенки 20 мм, полная высота 13 м. В районе напорной камеры толщина стенки увеличена до 40 мм.

Корпус является несущей конструкцией и воспринимает вес активной зоны реактора с коллектором, верхних вращающихся пробок, биологической защиты, тепловой защиты, натрия, механизма перегрузки и механизмов управления.

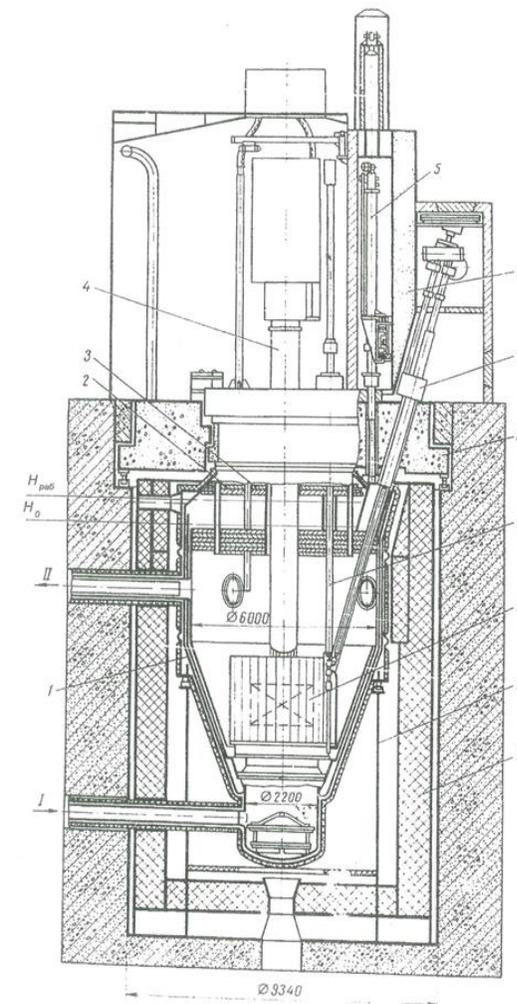
В средней части корпус имеет фланец, которым он опирается на роликовые опоры, установленные на сварную кольцевую металлоконструкцию.

Нижняя часть образует напорную камеру, к которой по шести патрубкам диаметром 500 мм подводится натрий. В верхней части корпус имеет шесть патрубков диаметром 600 мм, по которым натрий отводится от реактора к теплообменникам.

С внутренней стороны корпус облицован листами тепловой защиты из нержавеющей стали общей толщиной 60 мм для снижения термических напряжений в стенке корпуса реактора.

Для снижения температуры верхней части корпуса до ~ 420 °С организован поток натрия из напорной камеры вдоль внутренней стенки корпуса.

Снаружи корпуса имеется страховочный кожух толщиной 10 мм, предотвращающий опорожнение реактора в случае образования течи в корпусе. Зазор между корпусом и кожухом выбран так, чтобы при течи корпуса исключить разрыв контура циркуляции. Пространство между корпусом и кожухом заполнено аргоном.



Реактор БН-350

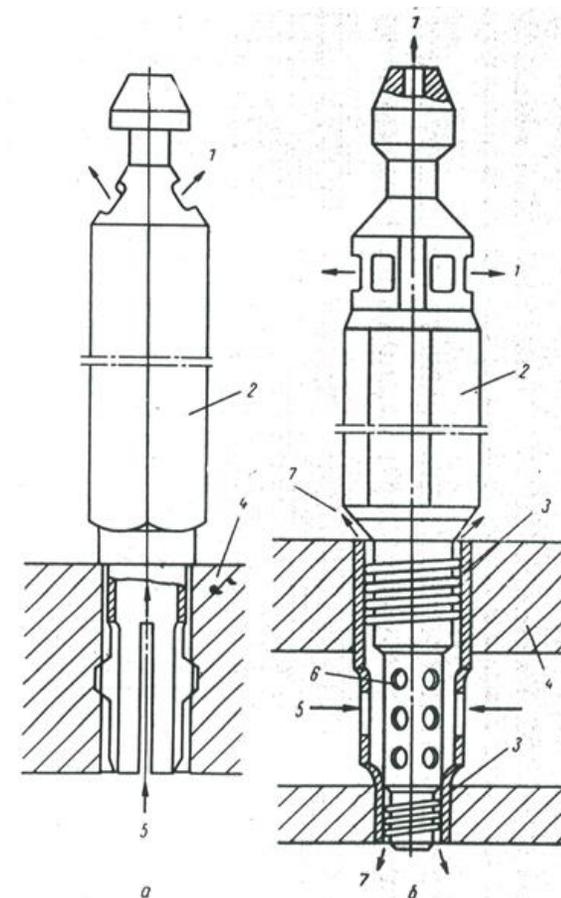
Реактор с механизмами СУЗ и перегрузки топлива (2)



В проекте реактора БН-350 для удержания ТВС от всплытия в потоке теплоносителя применен принцип гидравлической разгрузки с боковым подводом теплоносителя к ТВС (в отличие от реактора БР-5, где реализовано механическое удержание ТВС при осевом подводе теплоносителя).

Технические решения, реализованные в проекте петель первого контура и корпуса реактора, примененные при разработке последующих реакторов типа БН:

- схема удержания ТВС от всплытия в потоке теплоносителя;
- нижнее опирание корпуса реактора;
- организация снаружи корпуса реактора страховочного корпуса с заполнением аргоном пространства между ними;
- организация протока натрия из напорной камеры вдоль внутренней стенки корпуса для поддержания температуры корпуса в горячей зоне ниже $450\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- дросселирование расхода теплоносителя на входе в ТВС для выравнивания распределения подогрева теплоносителя по радиусу активной зоны;
- размещение на напоре ГЦН-1 обратного клапана;
- отдельные натриевые камеры на всасе ГЦН-1 (по петлям).



Закрепление пакетов от всплытия в реакторах БР-5 (а) и БН-350 (б)

Реактор с механизмами СУЗ и перегрузки топлива (3)



В ходе проектирования реактора БН-350 кроме основного варианта (петлевая компоновка оборудования первого контура) был рассмотрен вариант интегральной (баковой) компоновки.

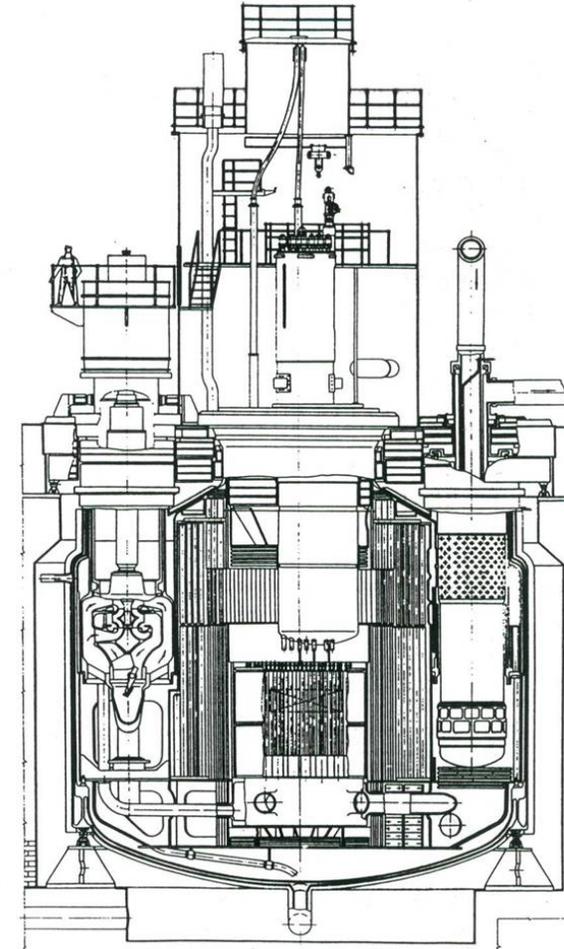
Основные параметры петлевого и бакового вариантов компоновки оборудования первого контура реакторов типа БН-350*

Параметр	Петлевая компоновка	Баковый вариант
Тепловая мощность, МВт	1000	1000
Диаметр собственно реактора (активная зона, зона воспроизводства, нейтронная подпорка, внутреннее хранилище), м	~ 3,5	~ 3,5
Количество петель первого контура	6	6
Диаметр первичного бака (максимальный), м	6	13
Полная поверхность несущих стенок, отделяющих радиоактивный натрий от окружающей среды бокса или страховочного кожуха, м ²	2000	600
Полный вес несущих стенок из нержавеющей стали, отделяющих радиоактивный натрий от окружающей среды, т	1200	250
Объем радиоактивного натрия, м ³	550	550
Площадь здания, занятая первым контуром (с реактором), м ²	2800	320
Объем здания, занятый первым контуром вместе с окружающей его защитой (без центрального зала), м ³	40 000	6400
Вес нейтронной защиты (включая все от края зоны воспроизводства до полости расположения теплообменников в баковом варианте), т	800	2000
Вес бетонной защиты вокруг помещений первого контура, тыс. т	41	4,6

Реактор с механизмами СУЗ и перегрузки топлива (4)

Несмотря на ряд недостатков баковый вариант компоновки оборудования первого контура имеет явные преимущества по многим показателям относительно петлевого варианта компоновки.

Интегральный (баковый) вариант компоновки оборудования первого контура был реализован в проектах реакторов БН-600 и БН-800.



Интегральный вариант компоновки оборудования первого контура РУ БН-600

Тепломеханическое оборудование первого и второго контуров (ПТО) (1)

Промежуточный теплообменник (ПТО) реактора БН-350, разработки ОКБ «Гидропресс», имеет достаточно своеобразную конструкцию, определяемую условиями компоновки первого контура и необходимостью обеспечить:

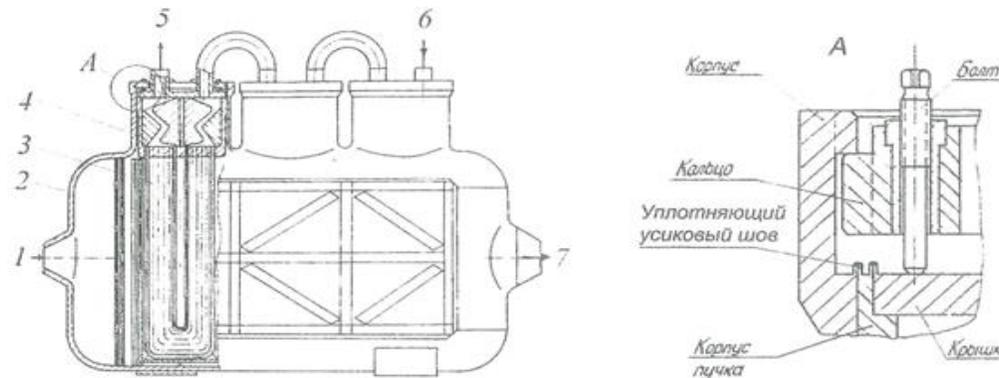
- горизонтальное движение теплоносителя;
- минимальное гидравлическое сопротивление.

ПТО представляет собой кожухотрубную конструкцию из двух секций, включенных параллельно по обоим контурам.

Секция выполнена в виде горизонтального бака (8×3×1 м) с закругленными торцами и с погруженными в него тремя теплопередающими пучками из 343 U-образных труб диаметром 28×2 мм с шагом 35 мм.

По теплоносителю первого и второго контуров пучки в каждой секции включены последовательно. Движение теплоносителей противоточно-перекрестное.

Для равномерной раздачи теплоносителя по ширине корпуса, трубная система каждого пучка дополнена до прямоугольной формы установкой стационарных нерабочих прямых труб.



- 1, 7 – вход и выход натрия 1 контура; 2 – корпус;
3 – выемной трубный пучок; 4 – биологическая защита; 5,
6 – выход и вход натрия 2 контура

Промежуточный теплообменник БН-350 и узел уплотнения трубного пучка (А)

Тепломеханическое оборудование первого и второго контуров (ПТО) (2)



Для создания равномерного потока натрия первого контура на входе в первый пучок предусмотрена выравнивающая решетка.

В целях обеспечения безопасности работ по извлечению трубного пучка в его входной и выходной камерах по второму контуру вмонтирована биологическая защита, имеющая специальные каналы для прохода натрия. Крепление пучка в горловине осуществляется с помощью специального замкового устройства, а уплотнение камер и горловины – сваркой «по усу».

Конструкция теплообменника реактора БН-350 существенно отличается от конструкций ПТО реактора БОР-60.

В ходе пусконаладочных работ и эксплуатации АЭС были проведены измерения температуры и напряжений в различных узлах ПТО.

На основе этих измерений были сформулированы требования к режиму разогрева и выводу на мощность АЭС с учетом получения допустимых нагрузок на узлах ПТО.

В частности, разогрев ПТО из холодного состояния выполняется со скоростью 5 °С/ч ступенями по 20 °С и выдержкой на каждой ступени в течение 5 – 10 ч, а выход на мощность – ступенями по 10 % с выдержкой на каждом уровне мощности.

Начиная с 1973 г. ПТО АЭС с реактором БН-350 работали в различных режимах без каких-либо отказов или повреждений. Проектные характеристики обеспечиваются.

Тепломеханическое оборудование первого и второго контуров (ГЦН)

При проектировании рассматривались различные варианты конструкции главных циркуляционных насосов первого и второго контуров. Был выбран герметичный, малозаглубленный, центробежный насос консольного типа с биологической защитой для ГЦН-1 и механическими уплотнениями.

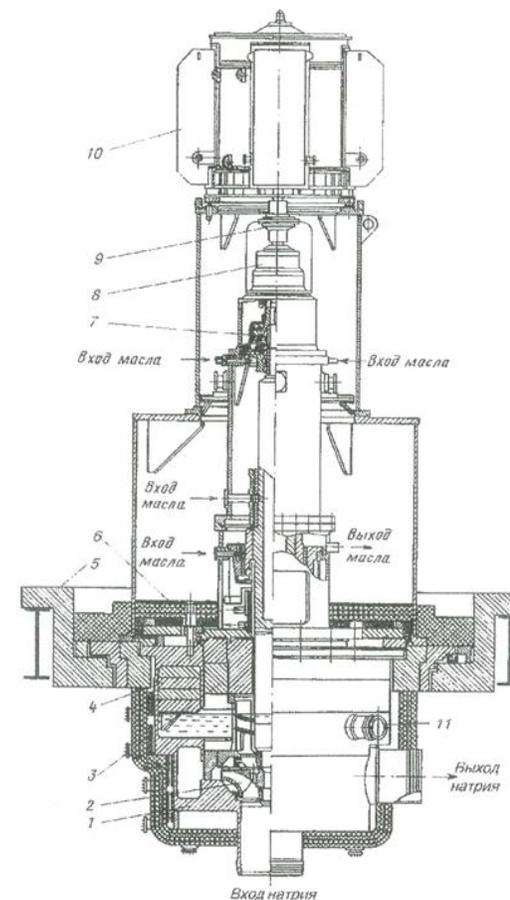
Для привода насосов используется обычный вертикальный, двухскоростной (1000 и 250 об./мин) короткозамкнутый электродвигатель.

Бак насоса является опорой выемной части и соединяется с ней при помощи накидного фланца и шпилек. Вал установлен на одном радиальном и одном радиально-упорном подшипниках скольжения. Расстояние между осями рабочего колеса и нижнего подшипника для главного циркуляционного насоса первого контура (ГЦН-1) равно 2 м. Биологическая защита расположена внутри бака насоса, часть защиты находится в натрии.

Проектные характеристики ГЦН первого и второго контуров БН-350

Параметр	ГЦН-1	ГЦН-2
Подача, м ³ /ч	3200	3500
Напор, м ст. жидкости	140	80
Мощность, кВт	1700	1000
Частота вращения вала, об./мин	1000/250	1000/250
Температура перекачиваемого натрия, °С	300	270

1 – бак насоса; 2 – рабочее колесо; 3 и 4 – съемная и неподвижная биологическая защита;
5 – опорная плита; 6 – шпильки; 7 – радиально-осевой подшипник; 8 – уплотнение вала по газу;
9 – муфта; 10 – электродвигатель; 11 – патрубок слива протечек



ГЦН первого контура РУ БН-350

Опыт разработки, эксплуатации и ремонта парогенератора реактора БН-350 (1)



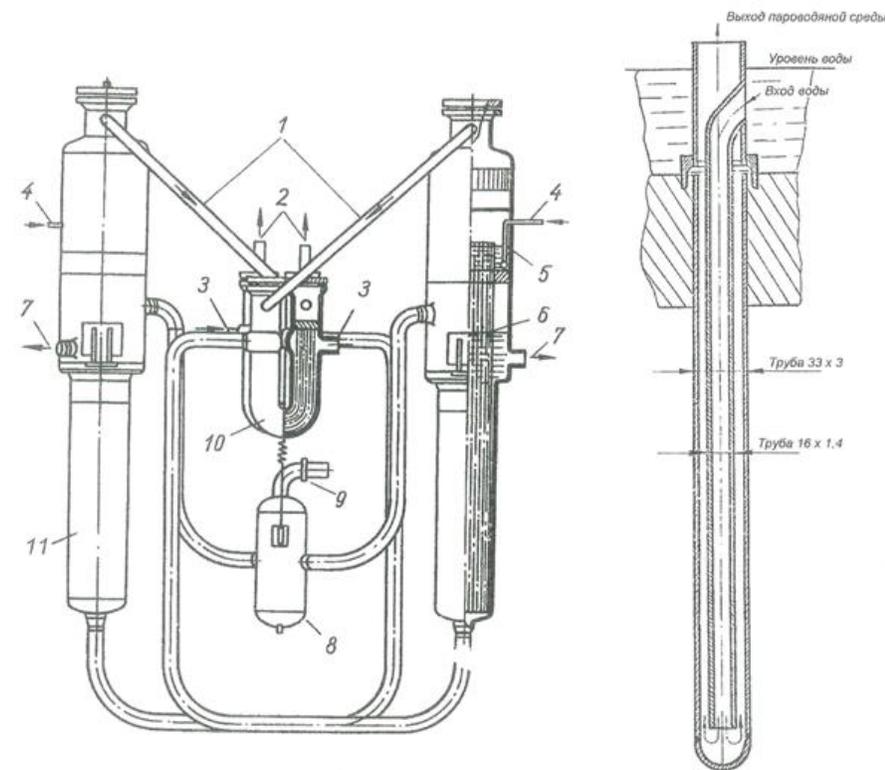
Первый период эксплуатации реактора в энергетическом режиме характеризуется ненадежной работой парогенераторов из-за многочисленных случаев разгерметизации теплопередающих поверхностей испарителей, чем и был обусловлен довольно низкий уровень мощности реактора.

Проведенная замена теплопередающих трубных пучков труб испарителей в 5 из 6 установленных парогенераторов обеспечила устойчивую работу реактора на мощности 650 – 700 МВт.

Один из отремонтированных парогенераторов (5) вышел из строя через 10 дней после ввода в работу из-за большой течи воды в натрий. Этот парогенератор был демонтирован и на его место установлен микромодульный парогенератор чехословацкого производства «Надежность-1».

Вскоре был завершён монтаж второго такого парогенератора. Таким образом, на установке БН-350 были смонтированы четыре парогенератора с трубками Фильда и один парогенератор «Надежность».

Проектный парогенератор установки БН-350 с естественной циркуляцией по пароводяному тракту состоит из двух секций, в каждой параллельно включенной секции один испаритель и один пароперегреватель.



1 – трубопроводы насыщенного пара; 2 – выход перегретого пара; 3 и 7 – вход и выход натрия; 4 – вход питательной воды; 5 – уровень воды; 6 – уровень натрия; 8 – газовая емкость; 9 – предохранительная мембрана; 10 – пароперегреватель; 11 – испаритель

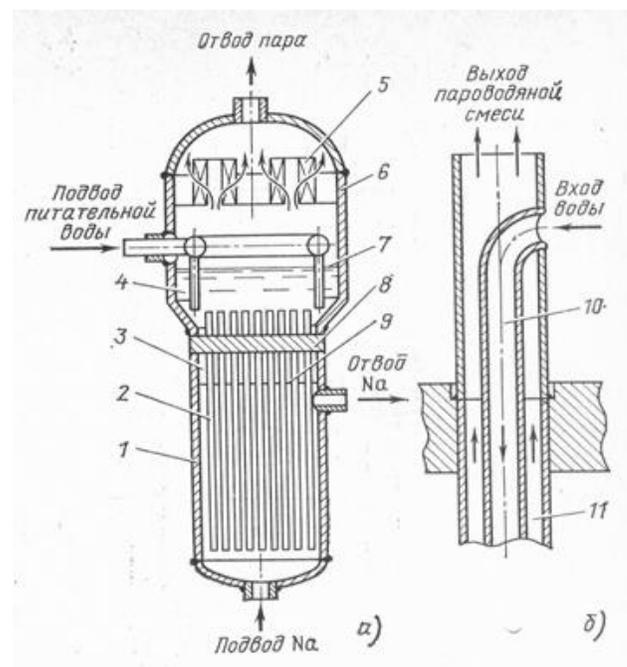
Штатный парогенератор реактора БН-350 и модернизированный канал Фильда

Испаритель представляет собой вертикальный кожухотрубный теплообменный аппарат с трубками Фильда, закрепленными в горизонтальной трубной доске, и с сепарацией пара в паровом объеме испарителя над трубной доской.

Трубка Фильда состоит из наружной трубы 32×2 мм (33×3 мм – установленных после капремонта) с глухим концом и внутренней опускной трубы 16×1,4 мм, верхний конец которой заделан в пароотводящем стекле, устанавливаемом в выточке трубной доски.

Пароперегреватель – U-образный теплообменник с трубками 16×2 мм и верхним расположением камер входа и выхода натрия и пара.

Газовая емкость соединена с газовыми полостями испарителей и представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд, который в нормальном режиме является частью газовой системы парогенератора. В случае аварийного разуплотнения в парогенераторе газовая емкость служит первичным сепаратором продуктов реакции.



- 1 – корпус; 2 – трубы Фильда; 3 – газовая полость;
4 – водяной объем сепаратора; 5 – жалюзийный сепаратор;
6 – сепарационный барабан; 7 – уровень воды; 8 – трубная доска; 9 – уровень натрия; 10 – опускная труба;
11 – пароотводящие каналы

Испаритель (а) и верхняя часть трубы Фильда (б) ПГ АЭС с реактором БН-350

Опыт разработки, эксплуатации и ремонта парогенератора реактора БН-350 (3)



Основные характеристики парогенераторов БН-350

Наименование характеристики	Размерность	Величины	
		Испаритель	Пароперегреватель
Тепловая мощность парогенератора	МВт	162	38
Полная производительность парогенератора	т/ч	276	276
Полный расход натрия по петле	т/ч	3085	3085
Количество единиц оборудования на ПГ	шт.	2	2
Тепловая мощность единицы оборудования	МВт	81	19
Температуры:			
– рабочего тела (вода-пар) на входе/на выходе	°С	158/265	265/435
– натрия на входе/на выходе	°С	419/273	453/419
Давление пара на выходе	МПа	5,1	5,0
Скорость воды, пара	м/с	3,76	21,7
Скорость натрия в межтрубном пространстве	м/с	0,56	2,2
Коэффициент теплопередачи (средний)	кВт/м ² °С	5040	1290
Характеристика трубного пучка:			
– размер трубок	мм	33×3/6900	16×2/5600
– материал	–	1Х2М	1Х2М
– количество труб	шт.	816	805
– геометрия змеевика	–	Фильд	U-образный
Общая площадь теплопередающей поверхности	м ²	820 (на две секции)	454 (на две секции)

Испытания ПГ на герметичность проводились по окончании всех монтажных работ перед заполнением натрием и водой. Проверка герметичности осуществлялась после тщательной отмывки внутритрубных полостей от консервантов, очистки и сушки. Применен вакуумно-гелиевый метод с использованием гелиевых течеискателей.

В результате в парогенераторах были обнаружены неплотности – в основном в сварных швах заделки труб в трубные доски и несколько неплотностей было найдено в сварном шве приварки донышка к трубе 32×2 мм канала Фильда.

Неплотности в заделке были устранены путем дополнительной подварки сварного шва. Трубы с неплотностью в нижней части (их было около 10 штук) были извлечены или заглушены. При исследовании дефектных труб, а также специально извлеченных контрольных труб, выяснилось, что причиной неплотности являются поры в сварном шве и дефекты в металле донышка.

После заполнения контура теплоносителем и включения циркуляционных насосов выявилось, что фактический расход по второму контуру превышает расчетный примерно на 20 %.

В целях снижения расхода в контуре до номинальной величины и устранения возможной разверки уровней натрия между испарителями в выходные патрубки последних были установлены регулирующие заслонки, в дальнейшем зафиксированные в стационарном положении.

Измерения вибрационных характеристик были проведены непосредственно на натуральных парогенераторах при помощи разработанного быстросъемного приспособления. Измерения проводились в трубах первых трех периферийных рядов входных камер пароперегревателей посередине пролета между трубной доской и первой дистанционирующей решеткой, а также на уровне решетки.

Наибольшие виброускорения зафиксированы в трубах первых двух периферийных рядов пароперегревателей. По результатам измерений заглушены трубы, имеющие максимальные амплитуды виброускорений.

Периодический вибрационный контроль труб продолжался по мере наработки ресурса пароперегревателями, но заметного повышения уровня вибраций не наблюдалось. Количество дополнительно заглушенных труб за весь период эксплуатации весьма незначительно.

В начальный период эксплуатации установки в энергетическом режиме (1973 – 75 гг.) на парогенераторах имели место восемь случаев разгерметизации теплопередающих поверхностей испарителей.

В тех случаях разгерметизация приводила к крупным течам воды в натрий и повреждению трубных пучков, из них два случая произошли в 1973 г. на парогенераторах 5 и 6 и один – в 1975 г. вновь на парогенераторе 5 после капитального ремонта последнего.

Причина течей заключалась в низком качестве трубок Фильда, обусловленном недостатками технологии их изготовления. Все течи, в основном, возникали в районе сварного шва донышка и чехловой трубки Фильда.

При тщательном металлографическом анализе достаточно большого числа чехловых трубок в пришовной зоне донышек были обнаружены микротрещины, первопричиной которых является механическая деформация при холодной штамповке донышек.

Поскольку такое состояние теплопередающих поверхностей парогенераторов сдерживало повышение параметров установки, было принято решение о полной замене чехловых трубок Фильда испарителей 32×2 мм на новые размером 33×3 мм.

Технология ремонта испарителей предусматривала прежде всего повышение качества изготовления самих труб, а также усиление контроля за качеством ремонта испарителей в целом.

По подобной технологии были в плановом порядке отремонтированы испарители всех парогенераторов кроме парогенератора 4, который эксплуатировался без единой течи до сентября 1980 г. В соответствии с ранее принятым решением после наработки 56 000 ч этот парогенератор был демонтирован, а на его место установлен парогенератор «Надежность-2» (запущен в июне 1982 г.).

Трубный пучок из каналов Фильда обеспечивает устойчивую естественную циркуляцию по пароводяной стороне во всем диапазоне эксплуатационных режимов, а также допускает значительную неравномерность тепловых нагрузок по отдельным каналам.

Сама конструкция трубного пучка из прямых труб Фильда представляется совершенной с точки зрения компенсации теплопередающих расширений как трубного пучка в целом, так и каждой трубки в отдельности.

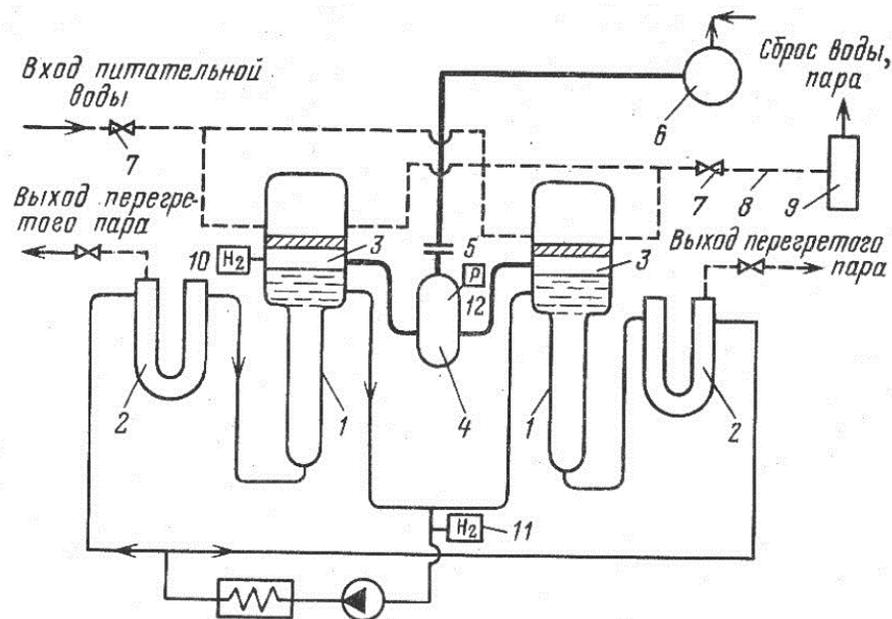
Удачно решен также вопрос температурной стабильности наиболее нагруженного узла – трубной доски испарителя, которая отделена от уровня натрия газовой подушкой и находится, таким образом, в изотермических условиях.

Главным недостатком конструкции теплообменного пучка из трубок Фильда является возможность высаживания примесей из котловой воды в «глухом» конце трубки, на который приходится и наибольшая величина теплового потока (выше 1000 кВт/м²).

Если применением комплексного водного режима высаживание примесей практически устраняется, то сложные теплогидродинамические условия в районе доньшка чехловой трубки канала Фильда делают этот узел при наличии сварного шва наиболее уязвимым, особенно на высоких тепловых нагрузках.

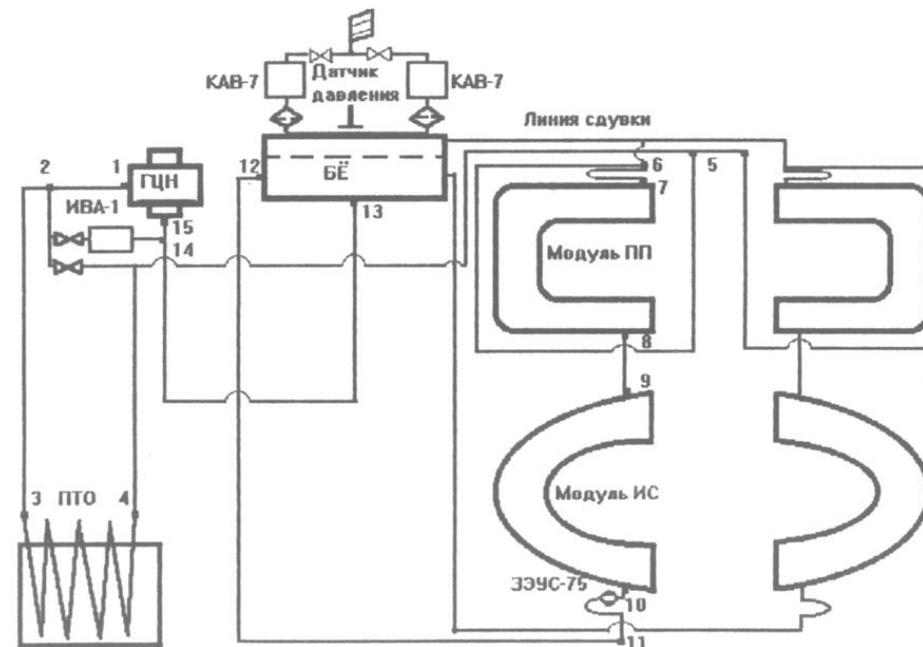
По итогам разработки и эксплуатации на ранних этапах ПГ БН-350 при создании реактора БН-600 предпочтение было отдано секционно-модульной конструкции прямоточного ПГ.

Система аварийной защиты парогенератора (1)



1 – испаритель; 2 – пароперегреватель; 3 – газовый объем;
4 – сепаратор первой ступени; 5 – предохранительная мембрана в газовой полости; 6 – сепаратор второй ступени;
7 – быстродействующая пароводяная арматура; 8 – линия аварийного сброса воды; 9 – расширитель; 10 – индикатор водорода в газе; 11 – индикатор водорода в натрии;
12 – индикатор давления в газовой полости

Схема САЗ ПГ с трубками Фильда АЭС БН-350



Принципиальная схема ПГ «Надежность» и расположение устройств системы индикации течи воды в натрий

Системы аварийной защиты ПГФ и ПГН практически идентичны.

Система аварийной защиты парогенератора (2)



Парогенераторы БН-350 можно отнести к парогенераторам корпусного типа, поскольку все его натриевые и пароводяные коммуникации объединены в один объем без разделяющей арматуры между нами.

Случаи течей воды в натрий, имевшие место в 1973 – 75 гг. в парогенераторах АЭС БН-350, дали возможность получить уникальные данные по характеру поведения всех систем в аварийных условиях.

Наиболее существенным результатом опыта эксплуатации парогенераторов БН-350 является вывод о том, что работа с течами невозможна, так как течи воды в натрий достаточно быстро развиваются из малых в большие.

Этот результат имел серьезные последствия для развития реакторов типа БН, т.к. при проектировании САЗ ПГ БН-350, в частности, при выборе инерционности и чувствительности систем контроля водорода в натрии и газе и пропускной способности аварийных устройств, исходили из возможности работы оборудования в течение какого-то времени при наличии небольшой течи воды в натрий.

Система защиты парогенератора БН-350 спроектирована, исходя из принципа, что при возникновении аварийной ситуации в любой секции испарителя или перегревателя весь парогенератор и петля отключаются и выводятся из работы.

Формирование аварийного сигнала в системе защиты парогенератора происходит в зависимости от величины течи одним из следующих способов:

- 1) В режиме большой течи, когда наблюдаются значительные гидродинамические эффекты в натриевом контуре, аварийный сигнал формируется по повышению давления в газовой полости парогенератора.
- 2) При малой течи воды в натрий аварийный сигнал формируется по изменению концентрации водорода в натрии или газовых полостях второго контура.

Система аварийной защиты парогенератора (3)

Приборы контроля	БН-350 (ПГФ, ПГН)	БН-600	БН-800
Малые течи	<ul style="list-style-type: none"> ИВА-1 КАВ-7 относительное изменение расхода через секцию 	<ul style="list-style-type: none"> ИВА-1 КАВ-7 ИТИ, ИШИТ 	<ul style="list-style-type: none"> ЭХДВ-Н ЭХДВ-Г ИРИС/ТАРАН
	<ul style="list-style-type: none"> отключение ПГ оператором 	<ul style="list-style-type: none"> отключение секции оператором 	<ul style="list-style-type: none"> отключение секции автоматически
Большие течи	<ul style="list-style-type: none"> датчики давления сепаратора (ПГФ) датчики давления в буферной емкости (ПГН) 	<ul style="list-style-type: none"> датчики давления в ББН секционный расходомер 	<ul style="list-style-type: none"> датчики давления в ББН секционный расходомер
	<ul style="list-style-type: none"> автоматическое отключение петли 	<ul style="list-style-type: none"> автоматическое отключение петли 	<ul style="list-style-type: none"> автоматическое отключение петли

Для сброса и сепарации продуктов реакции натрия с водой для двух типов ПГ применена двухступенчатая система, использующая два бака.

Для сброса газообразных продуктов реакции в атмосферу используется гидрозатвор совместно с клапаном обратного действия.

В подсистеме защиты по пароводяному контуру используется схема аварийного осушения в один общий расширитель. В схеме применяется быстродействующая арматура с электроприводом. Управление арматурой осуществляется персоналом в ручном режиме.



Система аварийной защиты парогенератора (4)

На ПГФ (на сепараторе первой ступени) и на ПГН (на буферной емкости) для защиты от превышения допустимого давления во втором натриевом контуре использованы предохранительные разрывные мембраны с принудительным подрывом (МРУ).

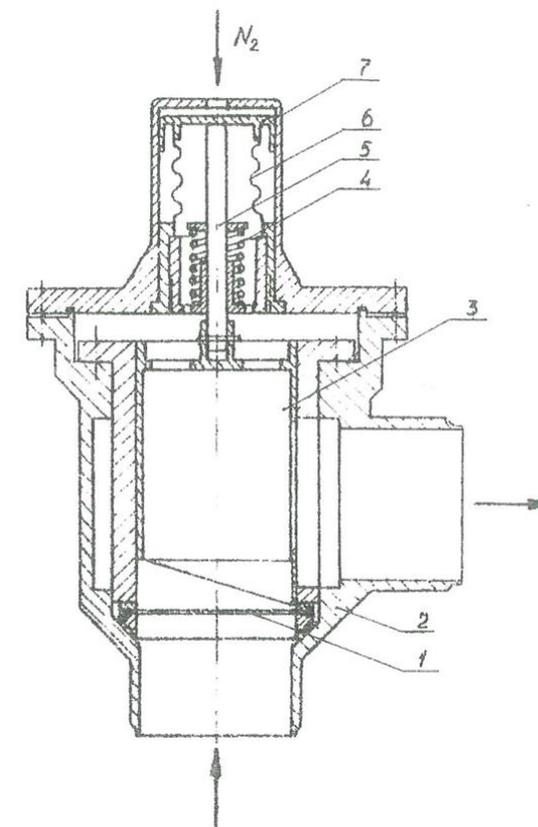
По результатам пуско-наладочных работ наиболее серьезной конструктивной переработке подвергалось мембранно-разрывное устройство (МРУ). Был изменен узел крепления мембраны. Четырехходовой распределитель, подающий азот на пневмопривод МРУ, был заменен на более надежный взрывной клапан.

Опыт работы системы аварийной защиты БН-350 показывает, что существующая система обеспечивает надежную защиту корпусов парогенераторов и всего второго контура от избыточного давления.

Во всех случаях, даже при отказе устройств принудительного воздействия на мембраны и их самопроизвольном разрыве, давление в полости второго контура не выходило за допустимые пределы. Так давление во втором контуре получается ниже расчетного (0,8 МПа) и при нормальной работе МРУ не превышает 0,3 МПа.

Послеаварийные обследования показывали, что аварийный процесс локализовался в пределах зоны действия факела реакции первой дефектной трубки.

Полученный опыт построения и эксплуатации САЗ ПГ БН-350 был применен при создании САЗ ПГ реакторов БН-600 и БН-800.



1 – мембрана; 2 – корпус; 3 – нож; 4 – пружина;
5 – шток; 6 – сильфон; 7 – поршень

Мембранно-разрывное устройство

Система отвода остаточного тепловыделения (1)



- Действующие в СССР в период разработки проекта реактора БН-350 нормативно-технические документы (НТД) не предъявляли достаточно жестких специальных требований к системам аварийного теплоотвода как к системам безопасности.
- При разработке проекта реактора БН-350 пошли по пути использования систем нормального отвода тепла для аварийного расхолаживания установки.
- Первоначально предполагалось использовать в качестве штатного режим с естественной циркуляцией теплоносителя в петлях первого и второго контуров. Для петель 1 контура выполненные эксперименты подтвердили наличие устойчивой ЕЦ. Для петель второго контура была выявлена неустойчивость штатного направления ЕЦ в режиме отвода остаточного тепла через ПГ к 3 контуру.
- В петлях второго контура с ПГ с трубками Фильда (ПГФ) происходило устойчивое опрокидывание ЕЦ теплоносителя, была выявлена и обоснована сильная зависимость направления ЕЦ от характера изменения параметров 3 контура.
- Замена на двух петлях № 4 и 5 ПГФ на чешские микромодульные парогенераторы «Надежность» (ПГН) позволила дополнительно к отводу остаточного тепла через 3 контур предусмотреть систему воздушного охлаждения ПГН (СВО ПГН).
- Как показали проведенные эксперименты, и в петлях с ПГН наряду с «прямой» ЕЦ имели место неоднократные случаи ее опрокидывания.
- В итоге для системы аварийного теплоотвода в реакторе БН-350 в качестве штатного режима был предусмотрен режим с принудительной циркуляцией теплоносителя в петлях 1 и 2 контуров.
- По мере совершенствования НТД возникала необходимость устранения или компенсации имеющихся отступлений проекта БН-350 в части СООТ, т.к. проектная система не позволяла безопасно расхолаживать установку в ряде исходных событий ННЭ.

Система отвода остаточного тепловыделения (2)



- Для обеспечения аварийного отвода тепла в условиях течи основного трубопровода (неокожухованный участок) петли первого контура с сопутствующим отказом отсечной арматуры был разработан проект специальной системы аварийного расхолаживания с использованием дренажей первого контура (САРХ-Д).
- Внедрение САРХ-Д в перечень штатных систем, как дополнительной системы расхолаживания для данного исходного события, позволили обосновать допустимость работы БН-350 на уровнях мощности 520 МВт и даже вплоть до 750 МВт.
- Наиболее «узким» местом оказалось обоснование допустимых уровней мощности РУ для случая отказа систем и оборудования 3 контура. Первоначально предполагалось, что в условиях МРЗ отказывают только системы и оборудование 3 контура, в то время как системы надежного энергоснабжения сохраняют работоспособность и обеспечивают работу ГЦН-1,2 на пониженных оборотах.
- В этих условиях аварийное расхолаживание реактора осуществляется за счет тепловых потерь с контуров установки через теплоизоляцию и СВО ПГН.
- В зависимости от конфигурации работоспособных петель, наличия резервных петель и возможности восстановления отказавших петель определены допустимые уровни мощности: 300 – 750 МВт.
- Впоследствии более детальный анализ работоспособности систем надежного энергоснабжения РУ БН-350 показал, что они также могут отказаться в условиях землетрясения, что сопровождается:
 - остановкой ГЦН и переходом на ЕЦ в первом и втором контурах;
 - отказом систем вентиляции шахты реактора и помещений станции.

Система отвода остаточного тепловыделения (3)

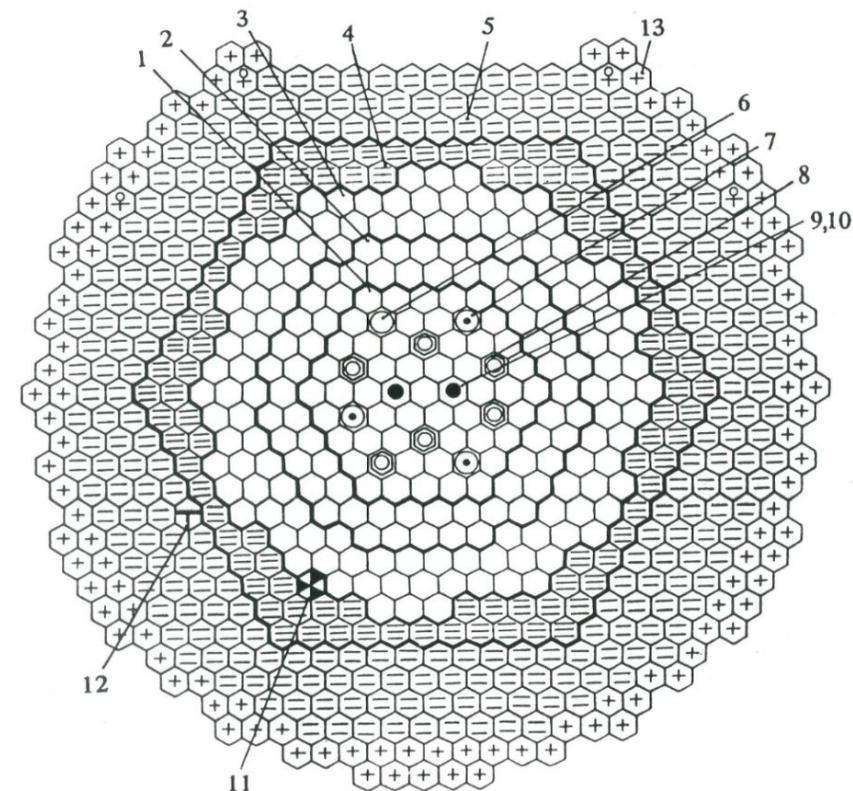


- В условиях ЕЦ натрия в петлях 2 контура опасность его замораживания в ПГН не позволяет использовать СВО ПГН.
- Отвод остаточного тепловыделения в реакторе происходит только за счет рассеивания его в помещения АЭС и шахту реактора через наружную поверхность оборудования и трубопроводов установки.
- Выполненные расчетные исследования показывали наличие устойчивой общеконтурной ЕЦ в петлях 1 контура и отсутствие общеконтурной ЕЦ в петлях 2 контура. Однако безопасные пределы по температуре «холодных» трубопроводов (420 °С) и бетона строительных конструкций в процессе аварийного теплоотвода обеспечиваются за счет того, что значительная часть трубопроводов петель 2 контура вовлекается в рассеивание тепла наружу посредством локальной ЕЦ, возникающей в них.
- Уровень локальной ЕЦ достигает на горизонтальных участках 2 – 3 % номинального расхода, что обеспечивает прогрев этих участков до температуры на входе/выходе ПТО и большой вклад петель 2 контура в уровень рассеиваемого наружу тепла (~ 2/3 от всего тепла).
- Расчеты показывали, что даже при полностью герметичных помещениях петель 1 и 2 контуров обеспечивается не превышение допустимых температур для случая работы РУ БН-350 на уровне мощности 420 МВт на пяти петлях.
- Исследования по режимам отвода остаточного тепловыделения в РУ БН-350 с учетом изменившихся требований НТД позволили обосновать допустимые рабочие уровни мощности реактора. Эти исследования также выявили важность учета явления локальной естественной конвекции в контурах РУ БН-350 при обосновании ее мощности.

Технические решения по активной зоне (1)

Проектный вариант активной зоны

- Тепловая мощность – 1000 МВт
- Количество топливных пакетов в среднестационарном состоянии:
 - в зоне малого обогащения (ЗМО) – 109 шт.
 - в зоне большого обогащения (ЗБО) – 112 шт.
- Число ячеек в активной зоне, занятых органами СУЗ – 12 шт.
- Обогащение свежезагружаемого топлива:
 - в ЗМО – 17 %
 - в ЗБО – 26 %
- Высота активной зоны – 1060 мм
- Загрузка в начальном состоянии – 1260 кг U-235
- Топливный материал:
 - активной зоны – обогащенный UO_2
 - зон воспроизводства – обедненный UO_2



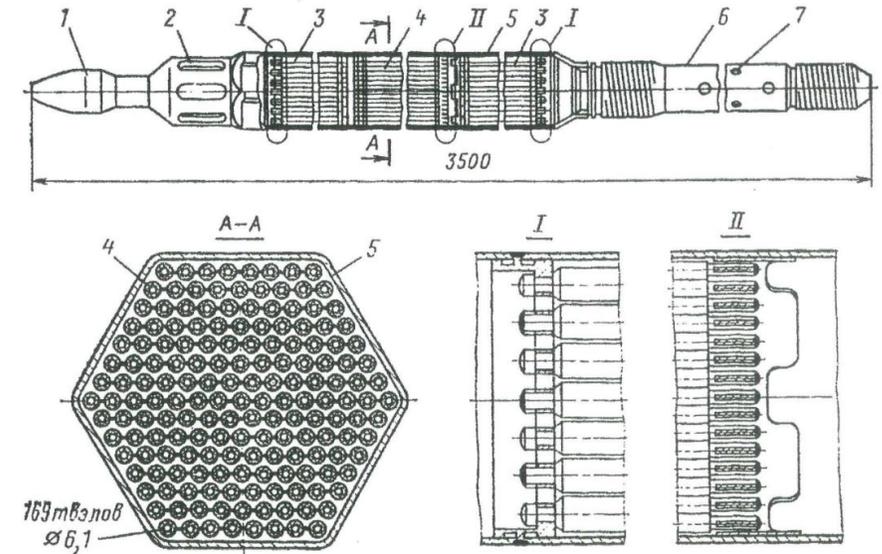
Картограмма модернизированной активной зоны реактора БН-350

Технические решения по активной зоне (2)

- Максимальная удельная мощность в начальном состоянии – 890 кВт/л а.з.
- Максимальная линейная мощность – ~ 410 Вт/см
- Максимальная скорость натрия – 8 м/с
- Максимальное выгорание топливного материала – 50 кг оск./т UO_2
- Длина кампании активной зоны при работе на полной мощности (при 5 %-ном выгорании) – 280 сут.
- Максимальный поток нейтронов – $0,8 \cdot 10^{16}$ н/см²·с
- Температурный изометрический коэффициент реактивности – $\sim 2,4 \cdot 10^{-5}$ 1/°C
- Мощностной коэффициент реактивности – $(0,9 - 1,0) \cdot 10^{-5}$ 1/МВт
- Полная эффективность СУЗ в начале работы – 5,55 % Δ к/к

Топливные пакеты

- Размер пакета под «ключ» – 96 мм
- Шаг расположения пакетов – 98 мм
- Количество твэл в пакете – 169 шт.
- Диаметр твэл по оболочке – $\varnothing 6,1$ мм
- Толщина оболочки твэл – 0,35 мм
- Максимальная температура топливного материала (с учетом факторов перегрева) – до ~ 2100 °C
- Максимальная температура оболочки твэл (с учетом факторов перегрева) – до ~ 685 °C



Тепловыделяющие кассеты активной зоны реактора БН-350

Технические решения по активной зоне (3)

ТЗВ

- Толщина – 60 см
- Количество элементов в пакете – 37 шт.
- Размер элемента – \varnothing 12 мм
- Толщина оболочки элемента – 0,4 мм

Органы СУЗ

- Автоматических регуляторов (АР) – 2 шт.
- Компенсаторов выгорания (КП) – 6 шт.
- Компенсаторов температурного эффекта (ТК) – 1 шт.
- Аварийной защиты (АЗ) – 3 шт.

- Длина и материал поглощающей части:

АР – 800/ B_4C (об. 60%)

АЗ – 1200/ B_4C (об. 60%)

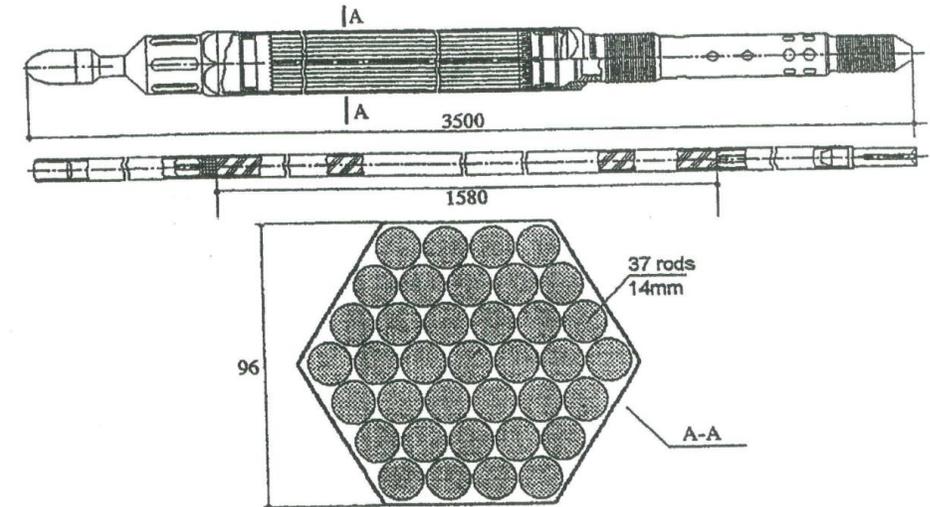
ТК – 1060/ B_4C (об. 60%)

КП – поглощающая часть – 1200/ UO_2 (обедненный)

активная часть – 1066/ UO_2 (об. 17 %)

БЗВ

- Высота – 1980 мм
- Размер пакета БЗВ под «ключ» – 96 мм
- Шаг расположения пакетов – 98 мм
- Количество элементов в пакете – 37 шт.
- Размер элемента – $\varnothing 14,2$ мм
- Толщина оболочки – 0,5 мм



Сборка и стержни боковой зоны
воспроизводства БН-350

При эксплуатации проектного варианта активной зоны (диаметр оболочки твэла 6,1 мм) наблюдалось значительное количество разгерметизаций твэлов (негерметичность по газу). Причина – относительно маленький размер газосборника в топливных и воспроизводящих твэлах ТВС, что приводило к недопустимо большим напряжениям в оболочках твэлов.

Технические решения по активной зоне (5)

К 1976 году было достигнуто проектное выгорание 5 % т.ат., а затем 5,8 % т.ат. Дальнейшее увеличение выгорания было ограничено значительным количеством негерметичных твэл и большим формоизменением чехла ТВС, обусловленного радиационным распуханием и ползучестью материала.

Для исправления ситуации была выполнена модернизация активной зоны за счет внесения следующих усовершенствований (модернизированная активная зона сформирована в 1977 – 1978 гг.):

- количество твэл в ТВС уменьшено до 127 шт. при увеличении диаметра оболочки до 6,9×0,4 мм;
- топливный столб, а также верхняя и нижняя ТЗВ размещены в одном твэле; в результате при некотором уменьшении нижней ТЗВ значительно увеличилась высота газовой полости твэла;
- материал оболочек твэл в топливных и воспроизводящих сборках Gr16Ni15Mo2+MnTiSi в х.д. состоянии (ранее применялась сталь марки ЭИ-847);
- материал чехла ТВС (сталь марки X18H10T) заменен на сталь марки X18H11M3;
- при сохранении габаритов активной зоны введена зона среднего обогащения (ЗСО) с обогащением 21 %; наличие трех зон обогащения (ЗМО – 17 %, ЗСО – 21 % и ЗБО – 26 %) позволило выровнять распределение мощности по радиусу активной зоны и снизить максимальное объемное энерговыделение и температуру оболочки твэла;
- переход на новый типоразмер оболочки твэл (6,9 мм) и введение ЗСО позволили уменьшить сопротивление активной зоны и давление на чехлы ТВС в среднем сечении активной зоны.

Модернизация активной зоны позволила на порядок сократить количество негерметичных твэлов и обеспечила возможность повышения выгорания топлива.

На реакторе БН-350 был выполнен цикл экспериментальных работ по изучению поведения конструкционных материалов и топлива в условиях высокого флюенса. На экспериментальной ТВС достигнуто выгорание 7,7 % т.ат.

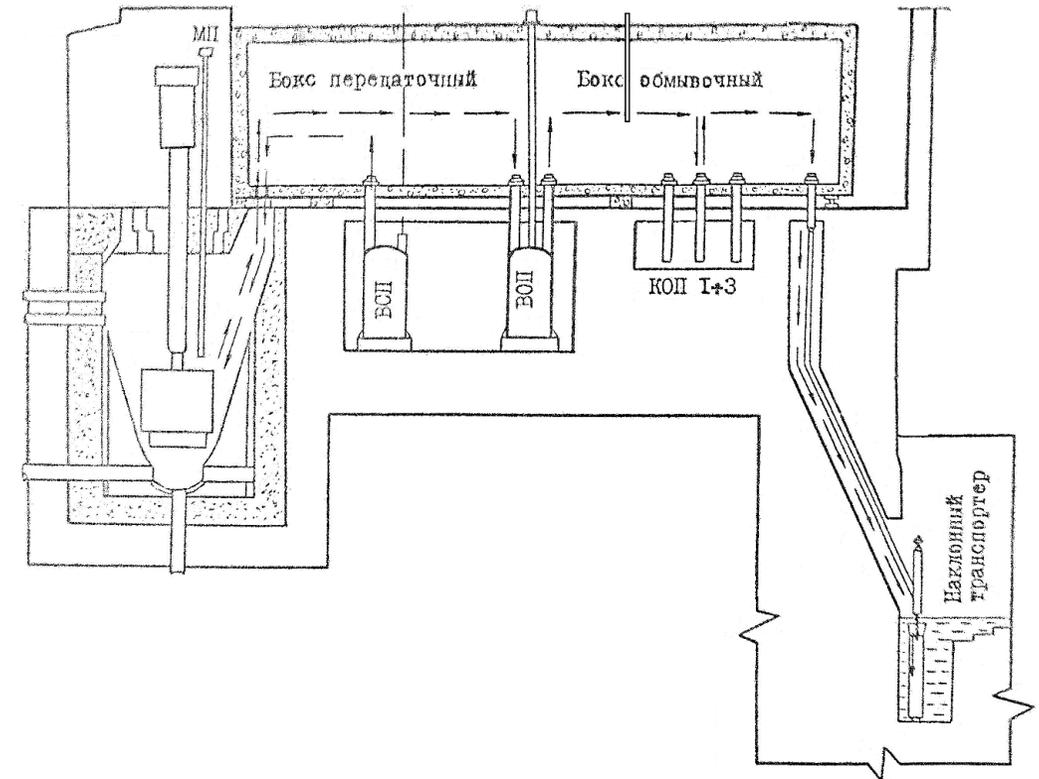
В обоснование эффективных способов выжигания минорных актинидов в реакторе были испытаны 16 сборок со смешанным оксидным уран-плутониевым топливом и 10 сборок с металлическим топливом.

Проектные решения по системе перегрузки (1)

Система обеспечивает загрузку в активную зону и выгрузку из нее сборок различного вида и назначения: тепловыделяющих сборок (ТВС), стержней СУЗ, направляющих гильз стержней СУЗ.

Система перегрузки осуществляет транспортировку свежих ТВС к реактору, загрузку их в реактор; производит внутриреакторные перестановки ТВС, выгрузку из реактора отработавших ТВС, установку их в барабан отработавших ТВС, камеры отмывки и передачу в бассейн выдержки.

Операции по перегрузке сборок внутри реактора осуществляются под слоем натрия, а операции по перегрузке вне реактора производятся в газовой среде стационарных герметичных боксов, внутри которых размещены перегрузочные механизмы.



Тракт перегрузки реактора БН-350

Проектные решения по системе перегрузки (2)

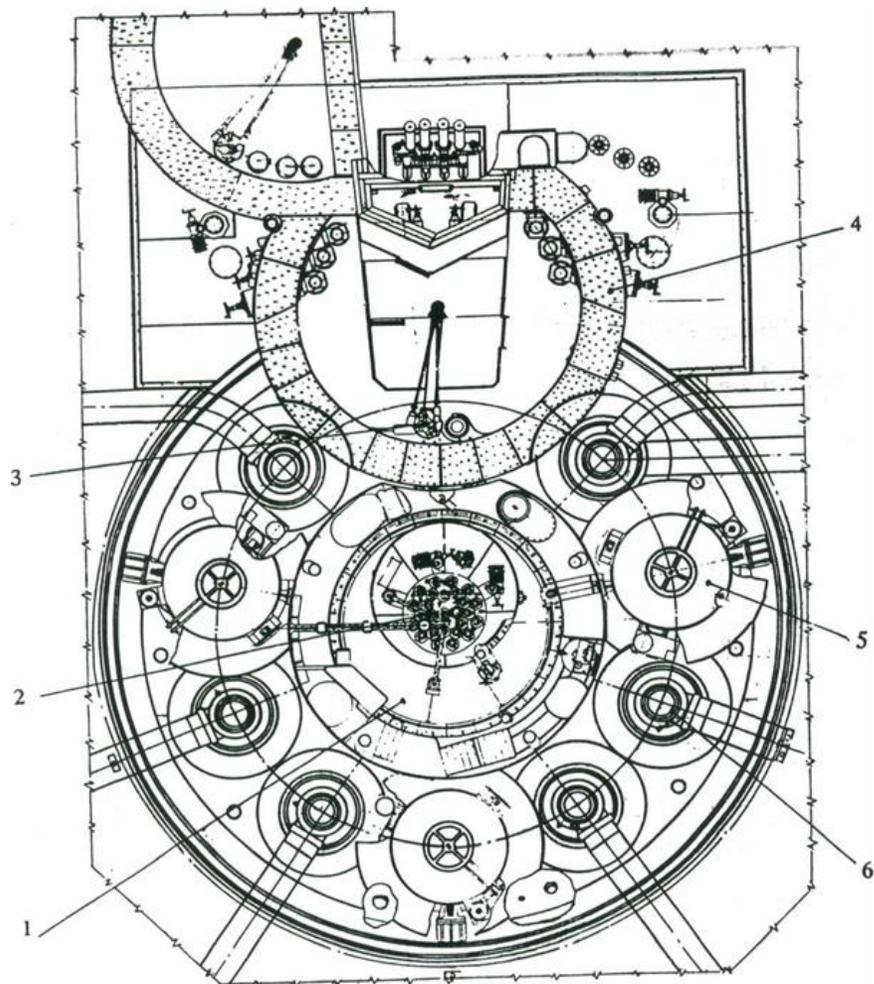
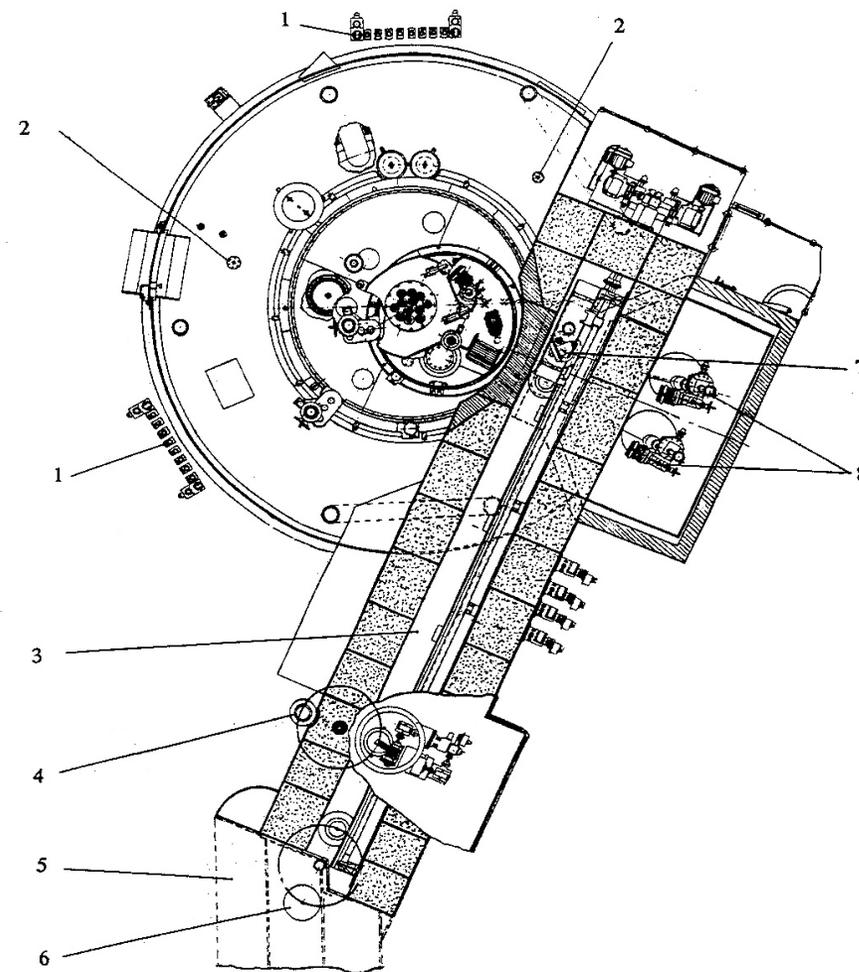


Схема перегрузки реактора БН-600



Система перегрузки ТВС реактора БН-350

Проектные решения по системе перегрузки (3)



К основным преимуществам системы перегрузки реактора БН-350 относятся:

- простота конструкций отдельных механизмов при их высокой надежности в работе и удобстве монтажа и демонтажа;
- выполнение операций опускания и подъема ТВС в реакторе, промежуточных барабанах и камерах отмывки механизмами с вертикальными захватами;
- осуществление загрузки-выгрузки сборок через промежуточные внереакторные хранилища свежих и отработавших сборок;
- высокая степень защиты обслуживающего персонала от радиации при перегрузке реактора;
- обеспечение выгрузки стержней СУЗ, имеющих меньшую длину и диаметр, чем ТВС, а также выгрузку направляющих гильз СУЗ;
- обеспечение минимального времени простоя реактора.

Многолетняя эксплуатация перегрузочного тракта БН-350 показала его надежность, безопасность, правильность основных проектных и конструкторских решений. Тракт полностью обеспечивает выполнение всех эксплуатационных нужд реактора.

Опыт создания и эксплуатации ТТТ БН-350 применен при создании РУ БН-600 и БН-800.

Перед пуском реактора БН-350 основные принципы контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) были отработаны на исследовательских реакторах серии БР (БР-1, БР-2, БР-5): по изотопному составу и активности продуктов деления в технологических средах (теплоноситель и газ в газовой полости реактора).

Вместе с тем на реакторе БН-350 были впервые реализованы новые технические решения по внутриреакторным и вне реакторным системам КГО:

- введена в строй автоматизированная система контроля состояния оболочек твэлов, которая позволяла контролировать поток запаздывающих нейтронов в теплоносителе первого контура от различных секторов активной зоны по числу теплоотводящих петель реактора и прогнозировать в реальном времени состояние оболочек твэлов;
- применены современные технические средства измерений, сбора и обработки информации (германий-литиевые детекторы ионизирующих излучений – в газовых и натриевых петлях; блоки детектирования запаздывающих нейтронов на трубопроводах первого контура);
- разработана и применена методика обнаружения дефектных сборок, предназначенная для поиска негерметичных ТВС на остановленном реакторе, которая в последствии послужила прототипом современных систем (СОДС-Р);
- введена в эксплуатацию вне реакторная система обнаружения дефектных сборок в гнезде отмывки (СОДС-ГО).

Эксплуатация реактора БН-350 создала основу для дальнейшего развития систем КГО на реакторах БН-600 и БН-800. К моменту пуска реактора БН-600 накопленный опыт эксплуатации БН-350 позволил в минимально короткие сроки выполнить большой объем измерений активности технологических сред.

Дальнейшим развитием систем КГО на реакторе БН-600 явилось создание в 1983 – 1984 годах секторной системы КГО по запаздывающим нейтронам, которая в сочетании с усовершенствованной системой СОДС-Р позволила эффективно решать задачу поиска негерметичных ТВС в активной зоне реактора.

Опыт эксплуатации реакторов БН-350 и БН-600 показал, что реакторы с натриевым теплоносителем могут работать в течение определенного времени (длительностью до одной микрокампании) с поврежденными твэлами без нарушения условий и пределов безопасной эксплуатации.

Система противопожарной защиты помещений с натриевым оборудованием (1)



Система	Реактор		БН-350		БН-600		БН-800	
	I контур	II контур	I контур	II контур	I контур	II контур	I контур	II контур
Снижение масштабов течей натрия								
Страховочные кожуха на корпусе реактора и трубопроводах первого контура (до запорной арматуры)	+	–	+	–	+	–	+	–
Системы дренирования натрия из петель	+	+	+	+	+	+	+	+
Системы обнаружения течи и горения натрия:								
– электрообогрев на оборудовании и трубопроводах	+	+	+	+	+	+	+	+
– контактные датчики (оборудование без электрообогрева, кожухи, арматура)	+	+	+	–	+	–	+	–
– дозиметрический контроль воздушной среды (помещение, воздухоотводы)	+	–	+	–	+	–	+	–
– пожарные дымовые извещатели (воздухоотводы)	+	+	+	+	+	+	+	+
– ионизационные детекторы (воздух помещения)	+	–	–	–	–	–	–	–
– контроль технологических параметров (крупные течи)	+	+	+	+	+	+	+	+
Локализация течей натрия								
Противопожарные преграды: пол, стены, потолок из железобетона	+	+	+	+	+	+	+	+
– теплоизоляция								
• пол	+ 1)	+ 1)	+	+	+	+	+	+
• стены	+ 1)	+ 1)	+ 2)	+ 2)	+	+	+	+
• потолок	–	–	–	–	+	+	+	+
– облицовка								
• пол	+	+	+	+	+	+	+	+
• стены	+ 2)	+ 2)	+ 2)	+ 2)	+	+	+	+
• потолок	–	–	–	–	+	+	+	+

Примечания:

1) – воздушная прослойка между облицовкой и бетоном пола и нижней части стен

Система противопожарной защиты помещений с натриевым оборудованием (2)



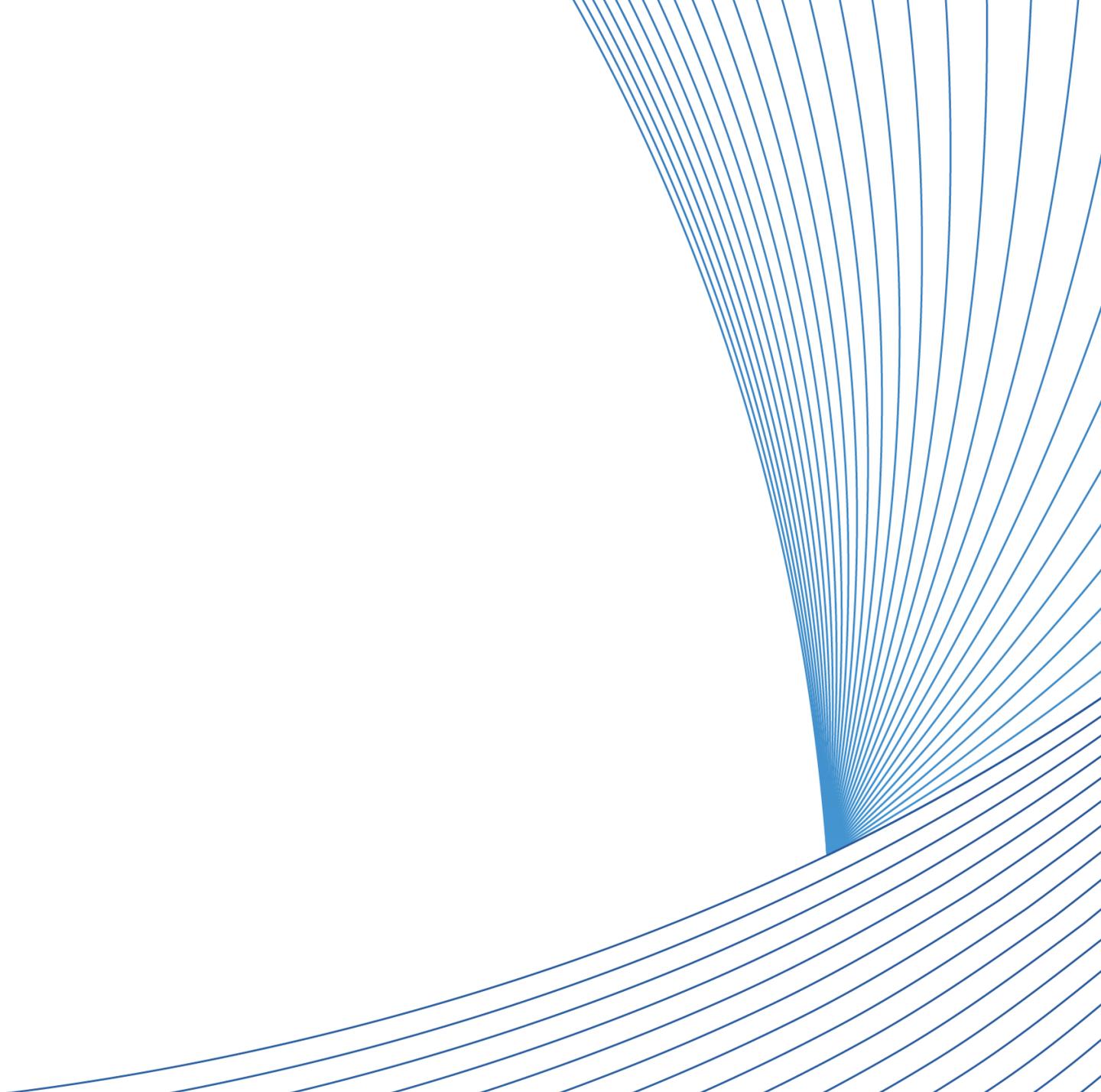
Система	Реактор	БН-350		БН-600		БН-800	
		I контур	II контур	I контур	II контур	I контур	II контур
Локализация последствий горения натрия							
Системы вентиляции: – специальный алгоритм переключения рабочих систем вентиляции – аварийная вытяжная система вентиляции с системой очистки воздуха от АПГН		+ ³⁾	+ ³⁾	+ ³⁾	+	+ ³⁾	+
Активные системы пожаротушения – азотное – порошковое • засыпка очага горения вручную • автоматическая подача порошка под давлением воздуха или азота		+	+	+	–	–	–
Пассивные системы пожаротушения – сливное – поддоны пожаротушения с гидрозатвором		–	+	–	+	–	–
Примечание: ³⁾ – система вентиляции снабжена системой очистки воздуха от АПГН		+	+	–	+	–	–
		–	+	+	+	+	+

Спасибо за внимание

Камаев Алексей Альфредович

Тел.: +7 (484) 399-82-47

14.07.2023



Технология ремонта предусматривала усиление контроля за качеством изготовления элементов испарителя:

- применение точеных донышек вместо штампованных;
- стопроцентный ультразвуковой контроль труб $\varnothing 33 \times 3$ мм на заводе-изготовителе;
- стопроцентный рентгенконтроль и цветная дефектоскопия сварного соединения донышка и трубки;
- испытание готовых чехловых труб Фильда гелием (~ 70 ат).

Технология отмывки натриевых полостей испарителя от остатков натрия и продуктов взаимодействия (начали с ПГФ-1 не имевшего течи):

- разогрев испарителя до 100 °С штатным электрообогревом для исключения конденсации пара;
- горячая паровая отмывка в инертной среде с образованием щелочи и водорода;
- насыщенный раствор щелочи дренировался в специальную емкость;
- полость испарителя постоянно продувалась азотом;
- контроль содержания водорода в газовых полостях испарителя; при снижении до 0,001% (объемных) паровая отмывка прекращается;
- испаритель дважды заполняется водой до полного растворения загрязнений;
- продувка сухим азотом с последующим вакуумированием в течение 20 часов.

Ремонт модулей испарителя ПГФ (2)



Ремонтные операции на модуле испарителя:

- отрезка нижней части корпуса с целью вскрытия трубного пучка на высоту 2,2 м (от донышек);
- промаркированные чехловые трубки \varnothing 32×2 мм срезались на высоту 2,0 м для проведения коррозионных и металлографических исследований; оставшаяся часть трубного пучка удалялась высверливанием трубок из трубной доски;
- трубы \varnothing 33×3 мм выставлялись в трубной доске и вальцевались (5 поясов, ручная механическая вальцовка); плотность вальцованных соединений проверялась подачей азота (0,9 МПа) в натриевую полость (предварительно восстанавливалась нижняя часть корпуса);
- сварка труб с трубной доской;
- контроль сварных соединений:
 - заполнение пароводяной полости гелием (5,3 МПа) в течение часа;
 - заполнение пароводяной полости гелием (4,1 МПа) в течение 24 часов с одновременным вакуумированием натриевой полости испарителя.

С использованием данной технологии в плановом порядке отремонтированы испарители всех ПГ (кроме ПГ-4): всего 10 модулей.

Основные этапы физического пуска (1)



- Перед загрузкой топливных пакетов (взамен пакетов-имитаторов) первый контур заполнен натрием, загружены пакеты БЗВ, стержни СУЗ, компенсаторы выгорания (топливная часть в нижнем положении).
- Организована циркуляция натрия первого контура (два ГЦН-1 по 250 об./мин) при температуре 220 – 230 °С.
- При наборе критической массы и проведении физических измерений реактор оборудован специальной пусковой аппаратурой для надежного контроля с относительно небольшой интенсивности источника ($5 \cdot 10^8$ н/с).
- Критическая загрузка реактора с полностью взведенными борными стержнями (с поправкой на замену пускового источника на топливный пакет) составила 201 пакет (расчет ~ 200 пакетов).
- Эффективность стержней управления и защиты измерена несколькими способами:
 - относительная эффективность определена методом обратного умножения в подкритическом состоянии и методом перекомпенсации в критическом состоянии;
 - абсолютная градуировка проведена по периоду разгона реактора с помощью прецизионного периодомера и по измерению положительных (при разгоне) и отрицательных (при сбросе стержня) изменений реактивности с помощью аналогового реактиметра, настроенного на расчетные параметры запаздывающих нейтронов реактора.
- Измерена интерференция стержней управления (АР, ТК и АР, ТК и АЗ).
- Эффективность топливных пакетов определялась методом перекомпенсации по отградуированному компенсирующему пакету (замена топливного пакета на натрий).

Основные этапы физического пуска (2)

- Натриевый пустотный эффект реактивности (НПЭР) измеряли с помощью специальных пакетов без натрия, устанавливаемых вместо топливных пакетов в разных местах реактора (симметрично от центра 2 – 3 пакета). Далее все борные стержни извлекали в верхнее положение и измеряли период разгона.
- Следующий шаг – извлечение пакетов, их разгерметизация (для заполнения натрием) и установка в те же ячейки реактора; далее измерение периода разгона и определение величины эффекта по разности периодов. Во всех ячейках активной зоны и бокового экрана эффект отрицателен, что достаточно хорошо предсказывали расчеты по теории возмущений для единичного пакета.
- Второй способ измерения НПЭР состоял в том, что вместо топливных пакетов устанавливали чехлы с разными по высоте герметичными газовыми объемами (4 типа чехлов).
- Измерена величина асимптотического температурного коэффициента реактивности в интервале 150 – 240 °С (диапазоны 150 – 180 °С и 200 – 240 °С).
- Многократные изменения давления газа в реакторе (при различных расходах натрия) показали отсутствие барометрического эффекта реактивности, что означает отсутствие накопления газа в активной зоне.
- Измерения эффекта реактивности при включении/выключении ГЦН-1 показали наличие небольшого положительного эффекта реактивности при отключении насоса (величина оказалась примерно в десять раз меньше расчетного значения).
- Активационным методом определено относительное распределение плотности различных реакций по объему реактора с использованием специальных топливных пакетов, в которых вместо центральных ТВЭЛ установлена стальная ампула с набором различных индикаторов по всей высоте.