

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РУ БОР-60

**Ю.М. Крашенинников, Л.Б. Нечаев, А.С. Корольков
ОАО «ГНЦ НИИАР»**

НАЗНАЧЕНИЕ РУ БОР-60

Исследовательская ядерная установка БОР-60 является одной из первых реакторных установок с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

Реакторная установка БОР-60 предназначена для обоснования и экспериментальной проверки основных технических и технологических решений, определяющих параметры перспективных АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

НАЗНАЧЕНИЕ РУ БОР-60

Установка является экспериментальной базой для испытаний топливных элементов различных конструкций, для испытаний топливных, поглощающих и конструкционных материалов в условиях высоких рабочих параметров натриевого теплоносителя, а также для получения опыта технологии радиоактивного натрия.

Установка используется также для наработки изотопной продукции, производства электроэнергии и для нужд теплоснабжения промплощадок ОАО «ГНЦ НИИАР».

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ РУ БОР-60

Начало строительства	1965 г.
Физический пуск	1968 г.
Энергетический пуск (работа на ВТО)	1969 г.
Пуск РУ в режиме АЭС	1970 г.
Пуск ТФУ (теплофикационной установки)	1991 г.

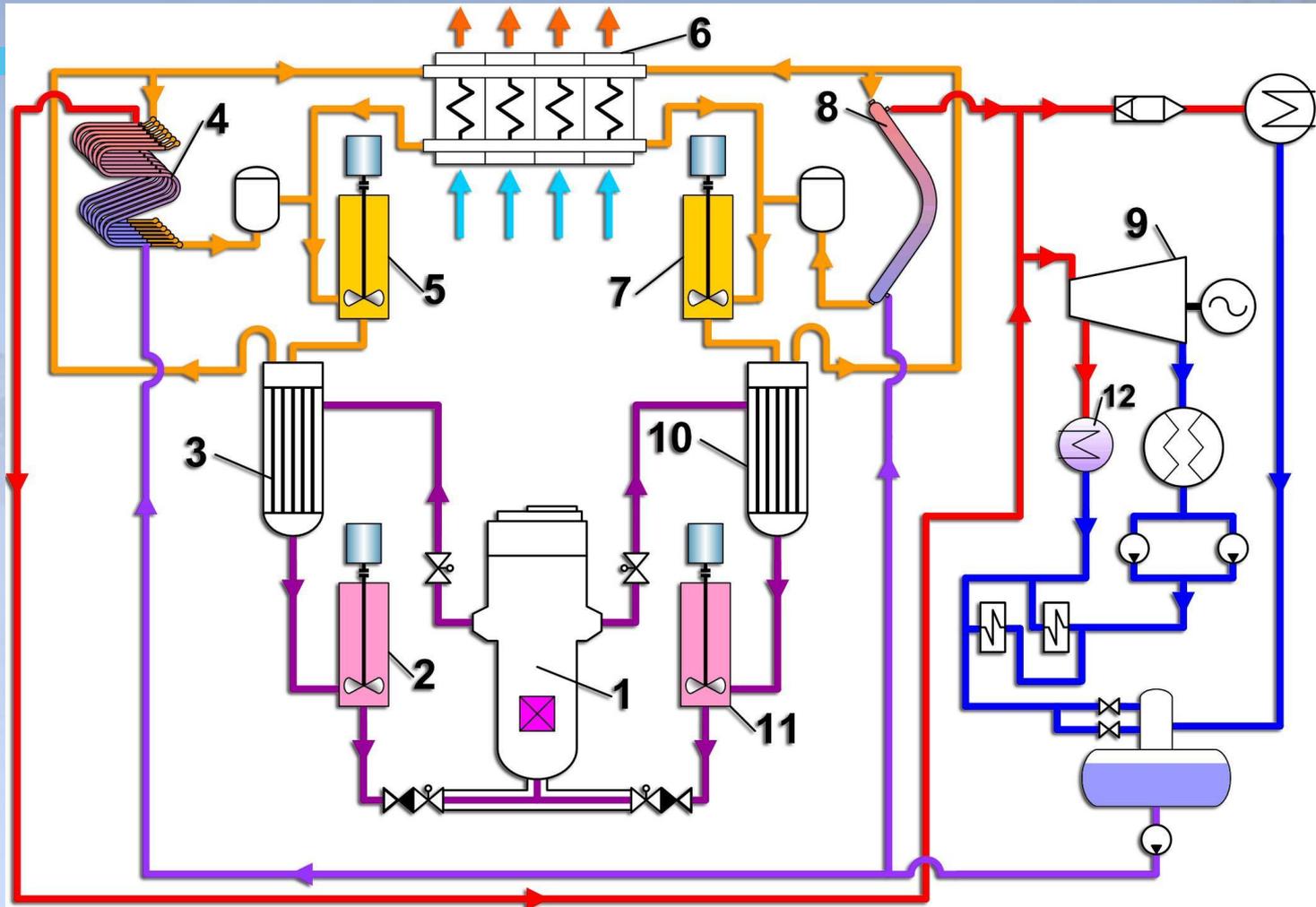
Основные характеристики реактора БОР-60

Характеристика	Величина
Мощность реактора тепловая, МВт	до 60
Мощность электрическая, МВт	12
Мощность теплоснабжения, Гкал/ч	25
Максимальная плотность нейтронного потока, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{15}$
Расход натрия через реактор, $\text{м}^3/\text{ч}$	до 1100
Скорость натрия в активной зоне, м/с	до 8
Температура теплоносителя, °С: на входе в реактор	до 360
на выходе из реактора	до 515
Топливо	UO_2 или $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$

Основные характеристики реактора БОР-60

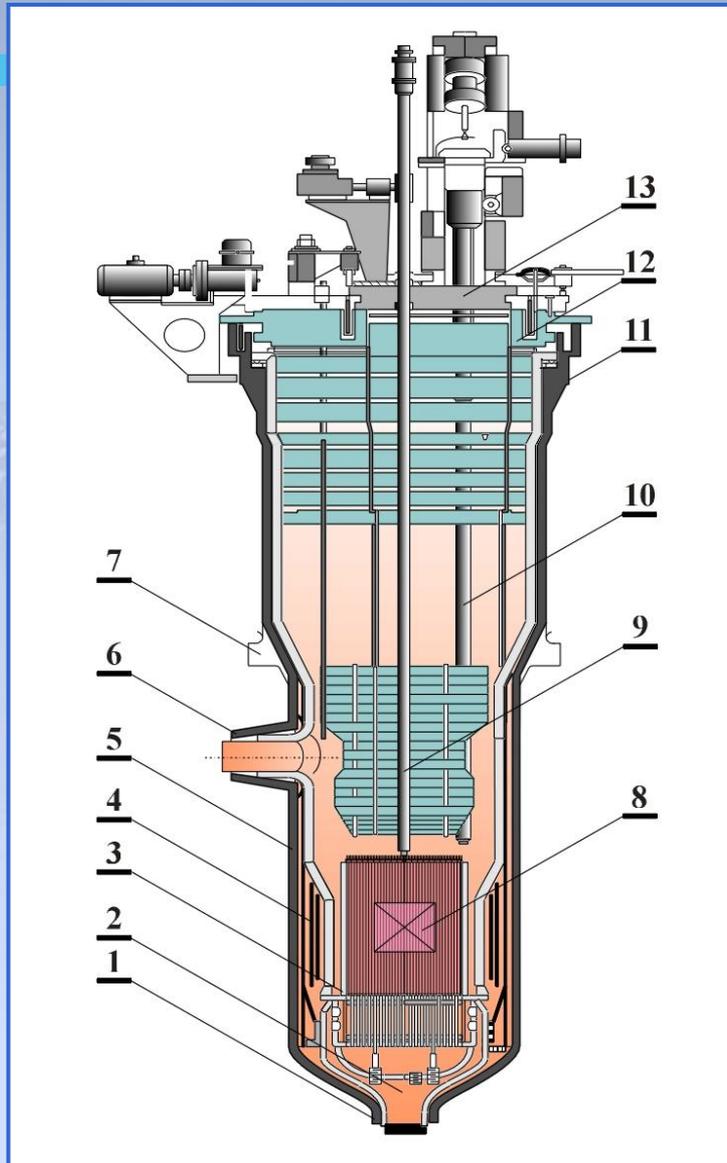
Характеристика	Средняя энергия нейтронов, МэВ
Максимальное объемное энерговыделение в активной зоне, кВт/л	1100
Средняя энергия нейтронов, МэВ	до 0,4
Расход натрия в двух петлях второго контура, м ³ /ч	до 1400
Давление пара в третьем контуре, МПа	9,0
Температура перегретого пара, °С	480
Продолжительность микрокампании, сут	90
Скорость набора повреждающей дозы, сна/год	до 20

Тепловая схема РУ БОР-60



1 - реактор; 2, 5, 7, 11 - насосы первого и второго контура;
 3, 10 - промежуточные теплообменники; 4, 8 - парогенераторы;
 6 - воздушный теплообменник; 9 - турбина, 12 - ТФУ.

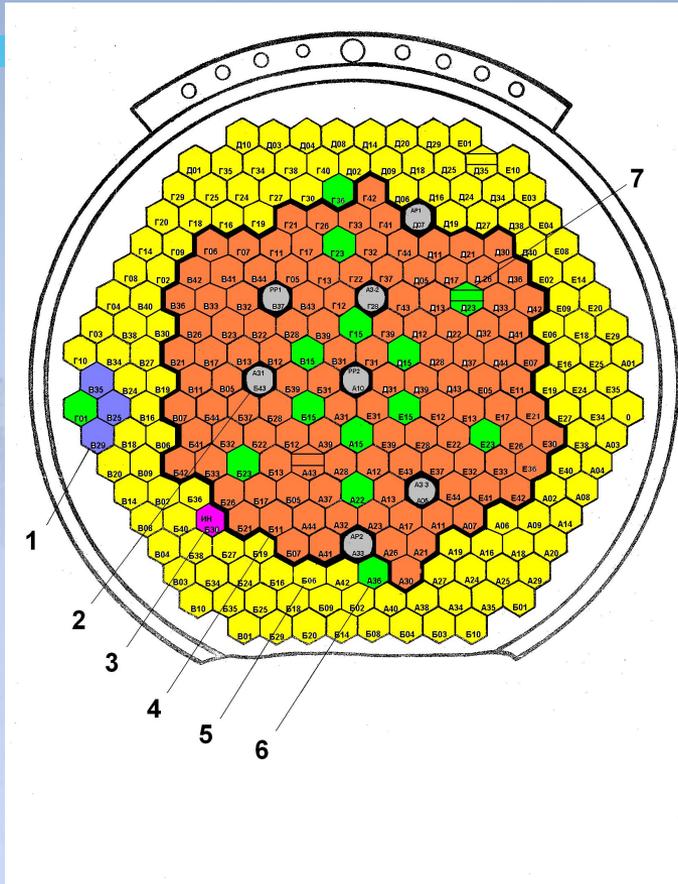
Конструкция реактора



Реактор БОР-60 в разрезе:

- 1 – входной патрубок,
- 2 – камера высокого давления,
- 3 – корзина,
- 4 – тепловая и нейтронная защита
- корпуса реактора,
- 5 – страховочный кожух,
- 6 – выходной патрубок
- 7 – опорный фланец,
- 8 – сборки активной зоны и бокового экрана,
- 9 – привод СУЗ,
- 10 – перегрузочный канал,
- 11 – опорный фланец,
- 12 – большая поворотная пробка,
- 13 – малая поворотная пробка.

Экспериментальные возможности реактора БОР-60



Возможности по загрузке реактора

Количество ячеек: для ТВС для СУЗ инструментованных	265 156 7 3
Количество штатных ТВС	85-124
Максимальное количество экспериментальных нетопливных сборок в активной зоне	12

Картограмма загрузки реактора БОР-60

1 – гидрид циркония, 2 – стержень СУЗ, 3 – источник,
4 – ТВС, 5 – сборка бокового экрана, 6 материаловедческая сборка,
7 - инструментованная ячейка.

Экспериментальные возможности реактора БОР-60

- В различные ячейки реактора может быть загружено большое количество экспериментальных сборок, при этом величина плотности потока нейтронов (F_n) в отдельных ячейках может отличаться более чем в 3 раза при максимальном значении $3,7 \times 10^{15} \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (при тепловой мощности 60МВт и компактной загрузке реактора).
- В активной зоне возможно одновременное размещение до 12 экспериментальных облучательных устройств (ОУ) с конструкционными материалами.
- Количество экспериментальных ТВС с перспективными топливными композициями в активной зоне и ОУ с конструкционными материалами в боковом экране практически не регламентируется.

Экспериментальные возможности реактора БОР-60

- В реакторе имеется специальный термометрический канал, позволяющий размещать экспериментальные устройства непосредственно в активной зоне с выводом информации об условиях облучения материалов по 30-50 линиям связи.
- Реактор оснащён также двумя горизонтальными (ГЭК) и 9-ю вертикальными (ВЭК) каналами, расположенными за корпусом реактора.
- Накоплен большой опыт по созданию и использованию различных инструментированных экспериментальных устройств, в том числе петель-ампул с принудительной и естественной циркуляцией, использующих в качестве теплоносителя натрия и тяжёлые металлы.

Основные направления исследований

- исследования деформации радиационного роста и радиационной ползучести трубчатых образцов циркониевых сплавов в областях температур 315-345°C и 360-390°C;
- экспериментальные исследования термической стабильности радиационного роста и радиационных повреждений структуры плоских и криволинейных (сегментных) образцов циркониевых сплавов при температуре облучения $\leq 330^\circ\text{C}$;
- исследование материалов ВКУ для обоснования работоспособности ВВЭР со сроком эксплуатации 60 лет при температуре облучения образцов $\leq 340^\circ\text{C}$ до повреждающей дозы 70 сна;

Основные направления исследований

- реакторные испытания образцов кремнистых сталей марок 10X15H9C3B1-Ш (ЭП302-Ш) и 04X15H11C3MT-ВИ при двух уровнях температуры до повреждающей дозы 34 сна и чугуна СПЧФ до повреждающей дозы 5-6 сна для сравнительных исследований деградации физико-механических свойств под воздействием реакторного облучения;
- исследования внутриреакторной длительной прочности материалов оболочек твэлов реактора СВБР-100 (сталь ЭП-823Ш) при температуре 600-650°C;
- реакторные испытания капсул с образцами гидрида гафния в активной зоне реактора БОР-60 при температурах $(500 \pm 20)^\circ\text{C}$ и $(600 \pm 30)^\circ\text{C}$;

Основные направления исследований

- ресурсные испытания макетов ТВЭлов РУ СВБР-100 при температуре внутренней поверхности оболочки ТВЭла в горячем пятне на первом этапе испытаний $500 \pm 30^\circ\text{C}$ и линейных нагрузках ≤ 350 Вт/см;
- реакторные испытания 19-ти ТВЭльной разборной ЭТВС в обоснование работоспособности:
 - ТВЭла с виброуплотнённым МОКС-топливом с различными вариантами расположения в ТВЭлах теплоизоляторов-геттеров;
 - ТВЭла с таблеточным МОКС-топливом, изготовленным в ОАО «ГНЦ НИИАР».

Производство радионуклидной продукции

В реакторе БОР-60 ведется наработка Sr-89 и Gd-153, которые являются одними из основных изотопов, включенных в номенклатуру планируемого к созданию в Димитровграде Федерального Центра медицинской радиологии.

В отдельные микрокампании реактора загрузка активной зоны нетопливными экспериментальными ОУ составляла максимально разрешенное количество 12 шт, максимальная загрузка бокового экрана экспериментальными ОУ достигала 8 шт.

Основные показатели работы реактора БОР-60 в 2009-2010г.г.

№ п./п.	Показатель	2009г.	2010г.
1	Число часов работы реактора на мощности, ч	5708	5245
2	Коэффициент использования реактора	0,65	0,6
3	Максимальная мощность реактора, МВт	53	53
4	Выработка тепловой энергии, МВт×час	284619	251805
5	Выработка электрической энергии, МВт×час	44961	38480
6	Выработка тепла (ТФУ), Гкал	58358	47451
7	Количество остановок: плановых неплановых	6 -	7 2

Показатели работы РУ БОР-60 с момента пуска

№ п./п.	Показатель	Значение
1.	Число часов работы реактора на мощности, ч	230538
2.	Выработка тепловой энергии, МВт×час	10282204
3.	Выработка электрической энергии, МВт×час	1619857
4.	Выработка тепла (ТФУ), Гкал	1067008
5.	Количество пусков за период эксплуатации	455

Продление срока эксплуатации РУ БОР-60

- Важным направлением деятельности является продление срока эксплуатации РУ БОР-60. Продолжение эксплуатации реактора БОР-60 имеет исключительно важное значение для реализации Программы развития атомной отрасли Российской Федерации, поскольку разработка инновационных проектов требует выполнения больших объемов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в проведении которых роль реактора БОР-60, учитывая его уникальные экспериментальные возможности, является весьма значительной.
- Работы по продлению срока эксплуатации ведутся с середины 80-х годов. Всего было проведено пять комплексных обследований ИЯУ БОР-60.
- По результатам последнего обследования срок эксплуатации ИЯУ БОР-60 продлен до 31.12.2015г.

Продление срока эксплуатации РУ БОР-60

В рамках работ по продлению срока эксплуатации РУ БОР-60 в 2009-2010 г.г. был проведен ряд расчетных, и экспериментальных работ:

- Экспериментальное уточнение режимов эксплуатации плит МПП реактора с помощью термoneйтронного зонда.
- Расчетно-экспериментальное определение нейтронно-физических характеристик по высоте защитных плит МПП реактора БОР-60.
- Анализ и обобщение результатов исследований изменения свойств конструкционных материалов реактора БР-10 после длительного нейтронного облучения, а также других материалов, аналогичных по составу с материалами реактора БОР-60.
- Комплекс работ по проверке состояния защитных плит МПП и удерживающих их шпилек.

Продление срока эксплуатации РУ БОР-60

- Анализ результатов материаловедческих исследований конструкционных материалов реактора БОР-60 за весь период эксплуатации с целью оценки состояния материалов элементов конструкции реактора.
- Выполнены расчеты прочности критических элементов реактора, оборудования и трубопроводов.
- Анализ последствий отказов критических элементов реактора БОР-60, оценка влияния отказов на безопасность.
- Проведена вырезка образца направляющей трубы ИМ АР-2 (сталь Х18Н10Т) отработавшего в реакторе 32 года и проведены материаловедческие исследования.
- Для обеспечения сейсмической устойчивости баков II контура выполнены работы по усилению крепления опор баков.
- В 2009г. завершено проведение комплексного обследования ИЯУ БОР-60 с целью продления ресурса.

Перспективы БОР-60

- Дальнейшие перспективы реактора БОР-60, в первую очередь, обусловлены его высокой востребованностью для проведения НИОКР по заказам как предприятий Росатома, так и зарубежных заказчиков.
- Принята «Программа реакторных испытаний и облучательных экспериментов в реакторе БОР-60 на период с 2009г. до 2015г.», составленная на основе долгосрочных планов НИР по основным направлениям реакторостроения.
- Планируемые на ближайшие годы испытания реакторных материалов охватывают практически весь спектр существующих и разрабатываемых типов реакторов от быстрых (БН-800, БН-1800, «БРЕСТ», СВБР) и тепловых (АЭС-2006, ВВЭР-1500, ГТ-МГР, ВТГР) до термоядерных (ИТЭР) и реакторов специального назначения.

Экспериментальное обоснование материалов БН-К

1. Испытания твэлов с рециклированным виброуплотненным уран-плутониевым оксидным топливом в составе разборной 19-ти твэльной ЭТВС
2. Испытания экспериментальных твэлов «АМОКС» с добавками Am в составе разборной 19-ти твэльной ЭТВС
3. Исследование работоспособности твэлов с топливной композицией на основе инертной матрицы из карбида циркония для выжигания минор-актинидов
4. Облучение образцов топлива в реакторе БОР-60 для экспериментального исследования многократного рецикла топливных композиций, в том числе с МА
5. Испытания ЭТВС с твэльными оболочками из ферритно-мартенситных сталей ЭК-181 и ЧС-139
6. Исследование внутриреакторной длительной прочности материалов оболочек твэлов реактора БН-1200.

Эксперименты по обоснованию конструкционных материалов реактора СВБР-100

1. Испытания образцов оболочечной стали ЭП823.
2. Ресурсные испытания макетов твэл СВБР-100.
3. Ресурсные испытания макета ПЭЛ.
4. Ресурсные испытания макета РИН (ПИН).
5. Облучение макетов твэлов СВБР-100 в составе автономной свинцово-висмутовой петли (АСВП).
6. Реакторные испытания стали ЭП302 при разных температурах.
7. Испытания образцов стали ЭП823 при температуре $\leq 330^{\circ}\text{C}$ для определения режимов отжига.

Эксперименты по обоснованию конструкционных материалов реактора БРЕСТ-ОД-300

1. Облучение макетов твэлов различного конструктивно-технологического исполнения.
2. Облучение макетов твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 в составе АКСТ-2М.
3. Облучение твэлов с $(U-Pu)N$, моделирующим составы стартовой и регулярной загрузки.
4. Сравнительные испытания различных вариантов таблеток поглотителя.
5. Испытания макетов пэлов в составе разборных материаловедческихборок.

Эксперименты по обоснованию плотного топлива

1. Испытания твэлов со смешанным нитридным топливом с повышенной линейной мощностью в составе разборной ЭТВС.
2. Испытания инструментированных твэлов с нитридным смешанным топливом в составе «термопакета».

Эксперименты в обоснование новых материалов для тепловых реакторов

1. Испытания образцов из сплавов Э110 опт. и Э635М при $T=360-390^{\circ}\text{C}$.
2. Испытания образцов оболочечных труб из сплавов Э110опт., Э110М и Э635 на радиационную ползучесть.
3. Продолжение испытаний материала ВКУ ВВЭР со сроком эксплуатации 60 лет до повреждающих доз ~ 100 сна.

Техническое перевооружение реактора БОР-60

Для обеспечения потребности в проведении исследований на ИР в обоснование технических проектов перспективных реакторов, а также для исключения перерыва в проведении исследований необходимо продлить срок эксплуатации ИЯУ БОР-60 на период после 2015 г., вплоть до ввода в эксплуатации нового реактора МБИР. С этой целью планируется выполнить техническое перевооружение ИЯУ.

Техническое перевооружение реактора БОР-60

Проект технического перевооружения предусматривает:

- Модернизацию системы управления и защиты реактора БОР-60 и резервного пункта управления.
- Замену физически и морально устаревших средств измерения системы технологического контроля.
- Модернизацию системы радиационного контроля ИЯУ БОР-60.
- Реконструкцию 3-го контура с заменой главного паропровода.
- Модернизацию системы аварийного электроснабжения.
- Реновацию обеспечивающих технологических систем (вентиляции, спец канализации, водо- пароснабжения и др.).
- Модернизацию системы контроля герметичности оболочек твэлов (КГО).
- Модернизацию информационно-измерительной системы ИЯУ БОР-60 с созданием подсистемы диагностики состояния оборудования.
- Модернизацию направляющих труб ИМ СУЗ реактора БОР-60 для усиления крепления плит радиационной защиты малой поворотной пробки (МПП) реактора.
- Модернизацию системы аварийной защиты парогенераторов.
- Работы по повышению пожарной безопасности.

Техническое перевооружение реактора БОР-60

Состояние работ:

- Разработано техническое задание на разработку проекта по техническому перевооружению реактора БОР-60.
- Разрабатываются частные технические задания на модернизацию отдельных систем.
- Начата разработка проектов.

Спасибо
за внимание!