



Р и с. 6. Загрузка свежих ТВС

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание атомных подводных лодок, надводных кораблей и атомных ледоколов открыло новую эру в развитии военно-морского и гражданского флота. Флот стал океанским, способным решать любые задачи в любой точке мирового океана. Однако применение ядерного топлива для паропроизводящих установок потребовало решения многих сложных задач, одной из которых стала замена отработавшего ядерного топлива — перезарядка с использованием специального оборудования.

Вслед за развитием кораблей ВМФ и гражданских судов с ЯЭУ совершенствуется и оборудование, обеспечивающее перезарядку ядерного топлива. К нему предъявляются более высокие требования по надежности, безопасности проведения перегрузочных операций, снижению их трудоемкости и продолжительности, а также уменьшению доли ручного труда и, следовательно, снижению дозовых нагрузок на обслуживающий персонал.

Уже более 60 лет — от впервые построенных и до проектируемых в настоящее время перспективных военных и гражданских кораблей АО «ОКБМ Африкантов» успешно работает над созданием оборудования для обращения с ядерным топливом. Каждое устройство из всего многообразия созданного за этот период оборудования обеспечивает безопасное и качественное выполнение работ по перезарядке ЯЭУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипенко Л.Г., Жильцов Л.М., Мормуль Н.Г. Атомная подводная эпопея. М.: Боргес, 1994.
2. Лазарев Н.М. Первые советские АПЛ. М.: Палея, 1997.

УДК 621.039.54:621.039.526

## СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕГРУЗКИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

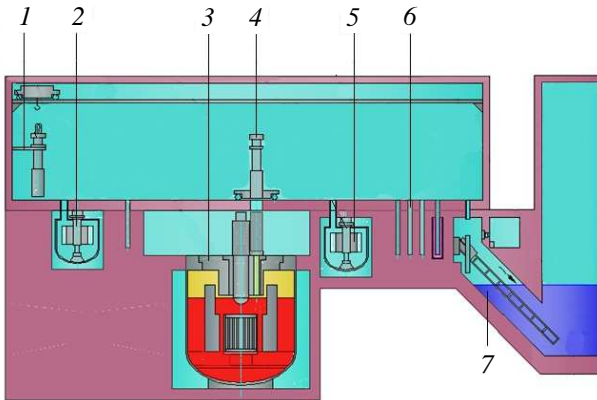
*Душев С.А., Тимофеев А.В., Любимов М.А., Белинский Д.Л.*  
(АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)  
e-mail: lubimov@okbm.nnov.ru

Начало освоения быстрых реакторов в нашей стране было положено в апреле 1957 г. пуском в эксплуатацию БР-5 с натриевым теплоносителем, который располагался на территории ФЭИ в Обнинске. Реактор имел две эксцентрично расположенные поворотные пробки. В малой пробке находились два разгрузочных канала, через которые осуществлялись перегрузки ТВС с помощью ручного захвата [1]. Для промышленного освоения этой технологии в августе 1960 г. вышло постановление Совета Министров и ЦК КПСС о создании первого опытно-промышленного быстрого реактора тепловой мощностью 1000 МВт (реактор БН-350) и назначении АО «ОКБМ Африкантов» главным

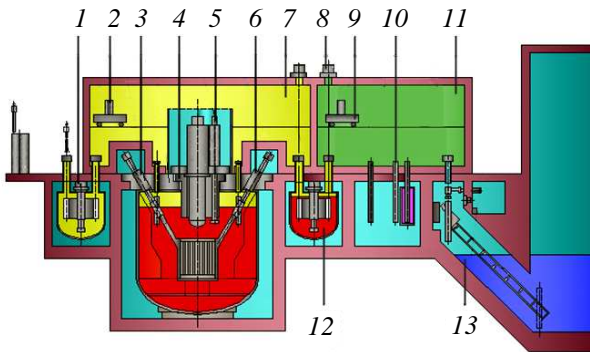
конструктором оборудования этой установки. При разработке его системы перегрузки были учтены решения по перегрузке ТВС экспериментального БОР-60, который успешно эксплуатируется и в настоящее время (рис. 1).

При выборе окончательного варианта были проанализированы преимущества и недостатки систем перегрузки БОР-60 и прототипного реактора «Энрико Ферми» (США). На основании анализа было решено принять систему перегрузки ТВС, в которой были заложены следующие положения (рис. 2):

внутриреакторное хранилище ТВС располагается на периферии боковой зоны воспроизводства;



Р и с. 1. Схема перегрузки реактора БОР-60: 1 — перегрузочный контейнер; 2 — барабан свежих сборок; 3 — поворотные пробки; 4 — перегрузочная машина; 5 — промежуточное хранилище; 6 — гнезда отмывки; 7 — бассейн выдержки



Р и с. 2. Схема перегрузки реактора БН-350: 1 — барабан свежих сборок; 2 — перегрузочная машина перегрузочного бокса; 3 — элеватор загрузки; 4 — поворотные пробки; 5 — механизм перегрузки; 6 — элеватор выгрузки; 7 — перегрузочный бокс; 8 — контейнер аварийной перегрузки; 9 — перегрузочная машина отмывочного бокса; 10 — гнезда отмывки; 11 — отмывочный бокс; 12 — бассейн выдержки; 13 — барабан отработавших сборок

перегрузка осуществляется с использованием двух эксцентрично расположенных поворотных пробок — большой и малой. Малая поворотная пробка эксцентрично располагается в большой. Вращением пробок ось механизма перегрузки наводится на любое гнездо активной зоны. В малую поворотную пробку вмонтирована центральная колонна с механизмами СУЗ, поэтому стержни СУЗ перед перегрузкой расцепляются с исполнительными механизмами;

внутриреакторная перегрузка выполняется с помощью механизма осевого типа, установленного на малой поворотной пробке;

выгрузка и загрузка ТВС осуществляются без разуплотнения его газовой полости относительно воздушной среды с помощью прямо-

угольных стационарных герметичных боксов — перегрузочного и отмывочного, заполненных инертным газом, в которых располагаются перегрузочные машины;

перемещение ТВС из активной зоны в зону обслуживания перегрузочной машины перегрузочного бокса и обратно выполняется наклонными элеваторами загрузки и выгрузки, которые обеспечивают выход головок перегружаемых сборок из-под уровня натрия;

перегрузочная машина перегрузочного бокса перемещается вдоль бокса и обеспечивает транспортировку ТВС между элеваторами и барабанами промежуточного хранения;

временное хранение осуществляется в барабанах свежих и отработавших ТВС. Ротор барабана для отработавших сборок погружен в натрий-калиевую ванну для съема остаточного тепловыделения;

перегрузочная машина отмывочного бокса также перемещается вдоль бокса и обеспечивает транспортировку ТВС между барабаном отработавших ТВС, гнездами отмывки от натрия и наклонным транспортером бассейна выдержки.

Основными преимуществами системы перегрузки ТВС БН-350 по сравнению с существующими системами являлись:

простота конструкции отдельных механизмов при их высокой надежности в работе и удобстве монтажа и демонтажа;

выполнение операций опускания и подъема перегружаемых сборок в реакторе и промежуточных барабанах вертикальными механизмами, имеющими жесткую связь с захватным устройством;

осуществление загрузки-выгрузки через промежуточные хранилища свежих и отработавших ТВС, расположенных вне реактора;

высокая степень защиты обслуживающего персонала от реакторного излучения при проведении перегрузочных работ;

меньшее время останова реактора для перегрузки активной зоны.

Основные операции по перегрузке ТВС выполняются в следующей последовательности:

загрузка барабана свежими ТВС, замена в нем воздуха центрального зала на аргон и разогревание ТВС до заданной температуры (может выполняться на работающем реакторе);

останов реактора и расхолаживание до температуры перегрузки;

расцепление и подъем всех штанг исполнительных механизмов СУЗ в верхнее положение;

подъем направляющих труб СУЗ в верхнее положение;

приведение уплотнения поворотных пробок в рабочее состояние (разуплотнение дублирующих уплотнений, разогрев сплава);

открытие в перегрузочном боксе загрузочных каналов реактора и подъем в верхнее положение защитных пробок;

перегрузка ТВС, включающая в себя выгрузку отработавших ТВС из активной зоны и загрузку свежих в активную зону;

передача отработавших ТВС в бассейн выдержки с отмывкой от натрия (может выполняться при работающем реакторе).

При проектировании оборудования и механизмов системы перегрузки БН-350 на стендах в АО «ОКБМ Африкантов» была подтверждена работоспособность отдельных узлов и единиц перегрузочного оборудования: узлов уплотнения поворотных пробок на макетах уплотнения в уменьшенном масштабе, механизма перегрузки и элеватора в натуральную величину, герметичных асинхронных и шаговых электродвигателей, индуктивных датчиков положения рабочих органов различного типа, предохранительных муфт и других.

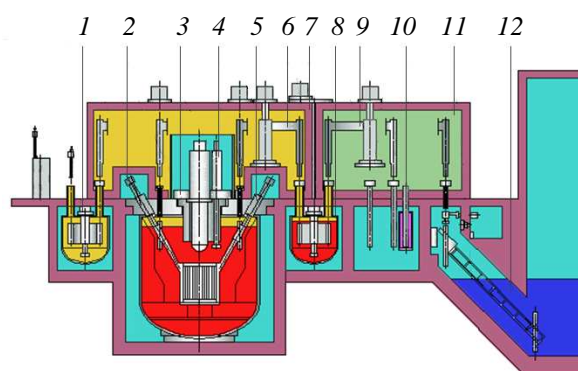
Кроме того, на стендах изучали вероятность конденсации паров натрия по высоте в щелевых зазорах поворотных пробок, проверялись самосвариваемость контактирующих поверхностей, изготовленных из стали разных марок при работе в среде жидкого натрия при 500—550 °С, определяли механические свойства стали и сварных соединений, подвергающихся тепловым ударам, исследовали износ и трение различных пар материалов в натриевой и газовой средах. Работоспособность изготавливаемого оборудования проверяли на стендах в условиях, имитирующих работу реактора в режиме перегрузки.

Для проверки качества изготовления оборудования БН-350 и взаимодействия между собой при выполнении перегрузочных операций был создан стенд с системами управления и системой наведения поворотных пробок.

Почти одновременно с пуском БН-350 в 1973 г. во Франции вводится в эксплуатацию прототипный энергетический реактор «Феникс». Несмотря на приведенные преимущества, система перегрузки БН-350 характеризовалась большой металлоемкостью и значительной номенклатурой оборудования и механизмов. Поэтому при разработке системы перегрузки БН-600 была детально изучена система перегрузки реактора «Феникс».

Вариант системы перегрузки, аналогичный «Фениксу», не нашел дальнейшего развития, что было обусловлено сложностью предлагаемых конструкций, большими габаритами механизмов, значительным увеличением времени останова реактора на перегрузку и необходимостью выполнения большого объема ОКР. Было принято решение заложить в основу системы перегрузки БН-600 те же принципы, что и в системе перегрузки БН-350, но с учетом выявленных недостатков, опыта эксплуатации, особенностей интегральной компоновки реактора и основного оборудования первого контура (рис. 3):

применены два механизма перегрузки — ближний и дальний, расположенные на малой поворотной пробке. Вращением пробок механизмы наводятся на гнезда активной зоны, причем выгрузка центральной части активной зоны осуществляется с перестановкой ТВС и сменой ближнего механизма на дальний. Наличие двух механизмов перегрузки позволило ограничить габариты большой поворотной пробки и обес-



Р и с. 3. Схема перегрузки реактора БН-600: 1 — барабан свежих сборок; 2 — элеватор загрузки; 3 — поворотные пробки; 4 — механизм перегрузки; 5 — элеватор выгрузки; 6 — перегрузочная машина перегрузочного бокса; 7 — перегрузочный бокс; 8 — барабан отработавших сборок; 9 — перегрузочная машина отмывочного бокса; 10 — гнезда отмывки; 11 — отмывочный бокс; 12 — бассейн выдержки

печить ее транспортировку железнодорожным транспортом;

угол наклона элеваторов увеличен с 17,5 до 30° к вертикальной оси. Это было вызвано интегральной компоновкой реактора, повышением размеров его корпуса и, как следствие, увеличением радиального перемещения перегружаемой сборки;

перегрузочный и отмывочный боксы выполнены подковообразной формы с механизмами передачи ТВС консольного типа, перемещающихся по окружности с постоянным центром вращения. Форма перегрузочного и отмывочного боксов зависит, в первую очередь, от вместимости барабанов свежих и отработавших ТВС. При небольшом числе размещаемых ТВС роторы обоих барабанов БН-350 были однорядные и соединялись одной проходкой с перегрузочным и отмывочным боксами. Емкость барабанов БН-600 более чем в 5 раз больше. Для конструктивного уменьшения диаметра потребовалось располагать ТВС в их роторах в три ряда. Следовательно, для таких барабанов требовалось выполнение трех проходок в боксе, что увеличивало его длину. Наиболее компактно оборудование размещается в данном случае в подковообразном боксе с траекторией движения перегрузочной машины по радиусу. Кроме того, подковообразный бокс позволяет компоновать более удобно теплообменники и насосы первого контура реактора;

в конструкцию механизма перегрузки введена система контроля усилий извлечения ТВС из активной зоны, основанная на магнитоупругих датчиках. По результатам эксплуатации в механизм перегрузки введено устройство для отбора проб газа при контроле герметичности ТВС. За период опытной эксплуатации (около года) механизм перегрузки проработал как пробоотборник около 280 ч, с его помощью было проверено около 300 ТВС, из них выявлена 21 негерметичная.

Одним из условий надежной работы механизмов системы перегрузки является их точность позиционирования относительно один другого в реальных рабочих условиях. С этой целью проводится наладка каждого вида оборудования и всего перегрузочного комплекса в целом после монтажа в процессе пусконаладочных работ при нормальной температуре:

отладка точек останова в заданных позициях. Особенно трудоемкой была операция «зашивки» координат всех ячеек активной зоны для их занесения в память системы наведения и обеспечения надежной установки-извлечения ТВС;

установка высотных отметок головок ТВС на один уровень в элеваторах, барабанах свежих и отработавших ТВС для обеспечения работоспособности внереакторных механизмов передачи сборок;

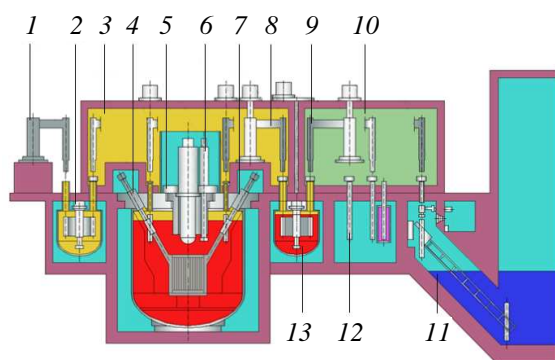
отладка системы управления всего комплекса механизмов для работы в цикле с необходимыми блокировками.

После завершения пусконаладочных работ при нормальной температуре проводятся комплексные испытания при температуре перегрузки реактора. Для этого реактор и барабан отработавших ТВС герметизируют, разогревают с помощью газовой системы и заполняют теплоносителем. Герметизация реактора заключается во введении в эксплуатацию жидкометаллических уплотнений, что является сложной и трудоемкой операцией. Вследствие тепловых перемещений корпуса реактора при заливке его натрием настраивали датчики положения исполнительных органов механизмов, поворотных пробок и другого оборудования. Далее проверяли работоспособность комплекса механизмов транспортированием по перегрузочному тракту имитаторов ТВС с их максимальными проектными формоизменениями.

Опыт разработки, изготовления и монтажа перегрузочного оборудования БН-600 подтвердил правильность выбора принципиальных и конструктивных решений. Оборудование системы перегрузки БН-600 надежно работает до настоящего времени. Его срок службы периодически продлевается и в настоящее время составляет 45 лет.

Оборудование и механизмы системы перегрузки БН-800 были разработаны на основе технических решений, заложенных в проектах БН-350, -600. Система обращения с ТВС активной зоны построена на основе следующих принципов (рис. 4):

перегрузка ТВС и других сборок активной зоны осуществляется на остановленном и расхоложенном реакторе;



Р и с. 4. Схема перегрузки реактора БН-800: 1 — комплекс загрузки барабана свежих сборок; 2 — барабан свежих сборок; 3 — перегрузочный бокс; 4 — элеватор загрузки; 5 — поворотные пробки; 6 — механизм перегрузки; 7 — элеватор выгрузки; 8 — перегрузочная машина перегрузочного бокса; 9 — перегрузочная машина отмывочного бокса; 10 — отмывочный бокс; 11 — бассейн выдержки; 12 — гнезда отмывки; 13 — барабан отработавших сборок

выгрузка отработавших ТВС осуществляется после их выдержки во внутриреакторном хранилище в течение одной или нескольких микрокампаний;

внутриреакторные перестановки ТВС с их извлечением в надзонное пространство проводятся под слоем натрия;

вне реакторное транспортирование ТВС осуществляется в специальных герметичных боксах, заполненных инертной газовой атмосферой;

установка и извлечение ТВС в/из реактора проводятся в/из элеваторов с поднятой над уровнем натрия головкой ТВС;

отработавшие ТВС перемещаются в барабан, заполненный натрием, для более глубокого снижения остаточного тепловыделения и выдерживаются в течение нескольких месяцев;

после выдержки проводятся отмывка ТВС пароводяным или свинцовым способом в зависимости от степени герметичности и транспортировка в водной бассейн выдержки;

ТВС транспортируются в автоматическом режиме с минимизацией времени перемещения за счет параллельно-последовательной работы перегрузочного оборудования;

выбранные траектории перемещения ТВС, размещение оборудования, механизмов и помещений системы транспортировки соответствуют оптимальным массогабаритным характеристикам системы перегрузки и реакторной установки в целом.

Система перегрузки выполняет свои функции по прямому назначению с учетом:

обеспечения требований по безопасному и надежному обращению со свежим и отработавшим топливом в соответствии с современными нормативными документами;

обращения с ТВС активной зоны с заданными параметрами по составу топлива и соответственно активности;

прогнозируемого формоизменения ТВС при заданной степени выгорания топлива и непродуктивной разгерметизации твэлов активной зоны воспроизводства;

сокращения времени перемещения свежего и отработавшего топлива и соответственно времени останова реактора на перегрузку.

Использование в БН-800 ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом выдвинуло дополнительные требования к системе перегрузки реактора. В первую очередь это касается обращения с ТВС на складе свежего топлива и при загрузке свежих ТВС в барабан. Применение смешанного топлива с повышенной активностью требует минимизировать ручные операции и обеспечить дистанционное перемещение ТВС. Оборудование и механизмы склада свежего топлива вместе с системой управления должны осуществлять дистанционное перемещение свежих ТВС от склада до реакторного отделения. В связи с этим в АО «ОКБМ Африкантов» для БН-800 было спроектировано, изготовлено, испытано и отправлено на Белоярскую АЭС оборудование, которого не было в составе систем перегрузки БН-350, -600: перегрузочная машина склада свежего топлива, поворотное устройство, внутриобъектовый транспортный упаковочный комплект, кантователь транспортного упаковочного комплекта, комплекс загрузки барабана свежих сборок.

Кроме того, конструкции оборудования, применявшегося на БН-600, подверглись модернизации:

применены никелевые листы в качестве облицовочных и основных материалов элементов жидкометаллических уплотнений поворотных пробок взамен деталей с оцинкованной поверхностью;

исключен графит из состава биологической защиты поворотных пробок;

применена самоуплотняющаяся защитная пробка для герметизации перегрузочных каналов реактора с системой рычагов, которые создают на уплотнительной прокладке усилия, в несколько раз превышающие собственный вес пробки. Ранее уплотнение осуществлялось с помощью гидрозатвора с жидкометаллическим сплавом.

За время, прошедшее со времени пуска БН-800, замечаний к работе перегрузочного оборудования не было.

Опыт эксплуатации БН-600, -800 показал возможность улучшения технико-экономических показателей в области систем и оборудования перегрузки во вновь разрабатываемых установках, в том числе в техническом проекте БН-1200:

оптимизация систем и оборудования загрузки свежего и выгрузки отработавшего топлива и соответственно упрощение архитектурно-строительных и компоновочных решений по энергоблоку;

обеспечение необходимого температурного состояния отработавшего топлива в процессе его прямой выгрузки без выдержки в промежуточном вне реакторном натриевом хранилище, которое исключается из транспортной схемы, а также при его отмывке от остатков натрия и доставке в водный бассейн выдержки;

увеличение интервалов между перегрузками и снижение доли профилактических и ремонтных работ при останове и перегрузке топлива;

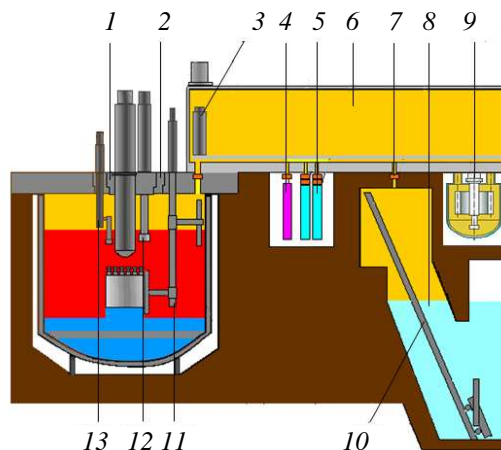
снижение показателей металлоемкости, стоимости оборудования при одновременном повышении единичной мощности приводов исполнительных органов;

повышение проектного срока службы до 60 лет с учетом заданных параметров различных режимов работы и радиационных повреждений материалов (рис. 5) [2].

В проекте максимально использованы отработанные решения, заложенные в конструкциях БН-350, -600, -800. Принципиальными отличиями перегрузки являются:

вертикальный элеватор консольного типа с вращающейся пробкой;

L-образное специальное устройство, эпизодически устанавливаемое в поворотную защиту для замены периферийных сборок стальной и борной защиты;



Р и с. 5. Схема перегрузки реактора БН-1200: 1 — малая поворотная пробка; 2 — большая поворотная пробка; 3 — перегрузочная машина; 4 — гнездо отмывки свинцом; 5 — гнезда пароводяной отмывки; 6 — перегрузочный бокс; 7 — задвижка; 8 — бассейн выдержки; 9 — барабан свежих сборок; 10 — наклонный подъемник; 11 — элеватор; 12 — механизм перегрузки прямого типа; 13 — механизм перегрузки консольного типа

отказ от использования в перегрузочном тракте барабана отработавших ТВС, вследствие чего цикл перегрузки на остановленном реакторе заканчивается передачей отработавшей ТВС в бассейн выдержки.

В результате применения описанных решений удельная материалоемкость системы перегрузки БН-1200 по сравнению с БН-800 снизилась в несколько раз [2].

По результатам рассмотрения технического проекта БН-1200 было признано необходимым дальнейшее проведение проектно-конструкторских исследований, направленных на снижение капитальных затрат для обеспечения конкурентоспособности с перспективными энергоблоками АЭС с тепловыми реакторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **К истории** создания и эксплуатации исследовательского реактора на быстрых нейтронах БР-5 (БР-10). 1959—2009 гг. Статьи, воспоминания, фотодокументы. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2009.
2. **Любимов М.А., Тимофеев А.В.** Задачи опытной отработки механического оборудования РУ БН-1200. Тезисы докл. конф. МАГАТЭ «Быстрые реакторы и топливные циклы: безопасные технологии и устойчивые сценарии FR13». Франция, Париж, 4—7 марта 2013 г., доклад № IAEA-CN-199-376.