

симости показаний детектора КГО для следующих видов повреждения оболочки твэла [11]: 1) постоянная величина дефекта; 2) линейное развитие дефекта; 3) экспоненциальное развитие дефекта; 4) обнажение определенной поверхности горячего, возникновение окислов на обнаженной площади, опадание окислов и повторное обнажение горячего.

Первые три типа повреждений можно охарактеризовать следующим образом:

1. Постоянная величина дефекта:

$$M_k = K_0(1 - e^{-\lambda_i t}),$$

где  $K_0$  — константа;  $\lambda_i$  — постоянная распада дочерних продуктов осколков деления (рубидия, цезия).

2. Линейное развитие дефекта:

$$M_k = K_0 r \left[ t + \frac{1}{\lambda_i'} (e^{-\lambda_i' t} - 1) \right],$$

где  $r$  — скорость развития дефекта ( $см^2/сек$ ).

3. Экспоненциальное развитие дефекта:

$$M_k = K_0 \frac{\lambda_i'}{b + \lambda_i'} (e^{bt} - e^{-\lambda_i' t}),$$

где  $b = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ;  $T_{1/2}$  — «период полуразвития» повреждения.

Математическое выражение для временной зависимости сигнала в случае повреждения четвертого типа слишком громоздко для воспроизведения в рамках данной работы.

Рассчитанные временные зависимости показаний детектора КГО, соответствующие при-

веденным типам повреждений, графически изображены на рис. 3 (а—г).

Рассматриваемые типы повреждений не включают все возможные повреждения, и их описание не будет точно соответствовать действительности. Сравнение результатов теоретического анализа с данными, получаемыми при эксплуатации системы КГО, облегчит обработку и интерпретацию результатов измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. Cartwright. In «Detection and Location of Failed Fuel Elements». Vienna, IAEA, 1968, p. 175.
2. Z. Melichar, E. Hladký. Ibid, p. 45.
3. E. Hladký, Z. Melichar. Bulletin EGÚ, No. 3—4, 41, 1968.
4. E. Hladký et al. Rozbor problému a návrh experimentálních zkoušek systému KPO na A-1, Výzkumná zpráva EGÚ, 07190101, 1968.
5. A. Roguin. Rapport CEA-R-2789, 1965.
6. Z. Melichar, E. Hladký. Návrh metody detekce poruchy obalu palivových článků pro A-2, Výzkumná zpráva EGÚ 07200101, 1968.
7. J. Morávek, I. Pietrik. Návrh riešenia kontinuálnych kontrol produktov štiepenia v primárnom okruhu, Výzkumná zpráva EGÚ 00060403, 1970.
8. E. Hladký, I. Kubík. Souhrn vztahu pro výpočet signálu a citlivosti porušeného palivového článku a návrh blokového schéma programu pro strojový výpočet. Výzkumná zpráva EGÚ 07200103, 1970.
9. R. French. J. Nucl. Energy, 20 (6), 451 (1966).
10. P. Douet, J. Graftieux. Rapport CEA-R-3328, 1967.
11. E. Hladký, Z. Melichar. Jaderná energie, 16 (3), 73, 1970.

## Опыт сооружения и пуска реактора БОР-60

А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, О. Д. КАЗАЧКОВСКИЙ, Б. Б. БАТУРОВ, В. В. СТЕКОЛЬНИКОВ, М. А. БАРСКИЙ, Ю. В. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, В. М. АРХИПОВ, С. М. БЛАГОВОЛИН, Е. В. БОРИСЮК, И. С. ГОЛОВНИН, В. М. ГРЯЗЕВ, М. А. ДЕМЬЯНОВИЧ, А. В. КАРПОВ, В. П. КЕВРОЛЕВ, Б. Н. КОВЕРДЯЕВ, Н. В. КРАСНОЯРОВ, Б. И. ЛУКАСЕВИЧ, В. А. МЕДВЕДКОВ, А. М. СМЕРНОВ, М. Ф. ТРОЯНОВ (С С С Р)

УДК 621.039.526

Начало разработки реактора БОР-60 под научным руководством Физико-энергетического института (ФЭИ) относится к концу 1963 г. В середине 1965 г. началось строительство здания реакторной установки в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР), и 27 декабря 1969 г. реактор достиг энергетического уровня мощности.

Обеспечивая большую удельную мощность и высокую температуру натриевого теплоносителя, реактор позволяет проводить в широком диапазоне условий испытания твэлов и конструкционных материалов для строящихся

атомных электростанций БН-350 и БН-600, а также для перспективных более мощных АЭС с быстрыми реакторами-бридерами. Уровень мощности 40—60 Мвт позволяет испытать в рабочих условиях различное оборудование, в том числе парогенераторы, насосы, теплообменники, запорную и регулируемую арматуру и т. п.

Характеристики реактора и описание основных устройств приведены в работах [1—4]. Данный доклад посвящен вопросам сооружения реактора и проведения пуско-наладочных работ.

### Экспериментальное обоснование конструкций оборудования

Все основные узлы оборудования, как правило, подвергались испытаниям на моделях и прототипах. К ним относятся:

- верхние узлы уплотнений вращающихся пробок реактора,
- модели патрубков корпуса,
- модель напорной камеры совместно с моделями топливных сборок и дросселирующими устройствами,
- модели перегрузочного канала и шибберные устройства,
- приводы и механизмы регулирующих стержней,
- система наведения пробок на заданную координату,
- система контроля температуры натрия на выходе из топливной сборки.

Эвтектика из олова и висмута показала хорошее смачивание с ножами уплотнения вращающихся пробок, что обеспечивает гелиевую плотность в горячем и в холодном состояниях. Дополнительное уплотнение из термостойкой резины не создавало устойчивой плотности, и неудачный профиль был изменен.

Модели патрубков корпуса реактора подвергались прочностным испытаниям осевой нагрузкой и изгибающим моментом. Напряжения, максимальные в месте стыковки патрубка с корпусом, затухают на расстоянии, примерно равном наибольшему радиусу патрубка. Запас прочности от ожидаемых усилий был не менее 2. Позднее при натяге трубопроводов в холодном состоянии для сварки фактические усилия оказались меньше ожидаемых.

При гидравлических и температурных испытаниях модели выходного патрубка выявилось, что температурные градиенты в месте установки тепловых экранов ниже расчетных и составляют  $0,15^\circ\text{C}/\text{мм}$ , в то время как за пределами теплового экрана температурный градиент достигал  $1,4^\circ\text{C}/\text{мм}$ . По результатам испытаний в процессе монтажа в выходные патрубки были установлены дополнительные более длинные экраны.

Измерения напряжений в разных точках патрубка позволили оценить допустимое число циклов резкого изменения температуры натрия на выходе из реактора (2000 циклов при  $580^\circ\text{C}$ ). Для наблюдения за режимом работы патрубков в натуральных условиях были установлены тензометрические датчики на корпусе и патрубках реактора.

Проверка температурных условий работы поворотных пробок на модели показала, что даже при нарушении системы воздушного охлаждения температура в гидрозатворах составляет  $81\text{--}85^\circ\text{C}$ , на крышке пробки —  $68^\circ\text{C}$ . При охлаждении воздухом температуры снижаются на  $35\text{--}40^\circ\text{C}$ .

При испытании макетов напорной камеры и топливных оборок проверялись собираемость активной зоны и величины усилий постановки и извлечения пакетов.

### Строительство и монтаж

Строительство реактора продолжалось 4,5 года. Этот период можно разбить на следующие этапы.

1. Конец 1965 г. — середина 1967 г. Выполнен основной объем работ по укладке защитного и сборного бетона, стеновых панелей, монтажу металлических конструкций и металлических облицовок помещений первого контура. Установлены тяжелые защитные двери в тех помещениях, доступ в которые при дальнейшем сооружении здания был бы затруднен. Установлено подъемное оборудование. Строительство здания для установки турбины и вспомогательного оборудования парового контура было начато позднее.

2. Конец 1967 г. — середина 1968 г.

Выполнен монтаж вспомогательных и обслуживающих здание систем, не связанных с натрием и не требующих при монтаже специальных условий по чистоте, установлены опорные конструкции и защита реактора. Подготовлены помещения первого контура для монтажа оборудования и основных трубопроводов. Для предварительной работы с корпусом и другими узлами реактора подготовлено помещение, оснащенное стендами.

3. Конец 1968 г. — середина 1969 г.

Осуществлен монтаж основных и вспомогательных натриевых контуров, узлов реактора, систем электроснабжения, контроля и автоматики. Для уточнения некоторых физических параметров были проведены критические опыты при отсутствии теплоносителя. «Сухой» физический пуск реактора проведен в декабре 1968 г.

4. Август — декабрь 1969 г.

Произведена наладка основных и вспомогательных натриевых систем, опробованы режимы работы электрообогрева, во вспомогательные системы залит натрий и очищен в холодных ловушках, заполнены натрием основные

контуры, проверена работа насосов и другого оборудования, измерены необходимые характеристики, загружены топливные сборки, проведены критические опыты в натрии, осуществлен энергетический пуск.

Конструкция реактора позволяла произвести раздельное изготовление корпуса и поворотных пробок. Опасений в правильности сопряжения узлов при этом не возникало, так как между корпусом и поворотными пробками находился еще один узел — «корзина». В первую очередь были изготовлены и прошли взаимную проверку корпус и «корзина».

При сборке реактора необходимо было обеспечить возможно более точное совпадение осей механизмов регулирующих стержней с соответствующими осями втулок напорного коллектора, выдержать заданные зазоры, проверить собираемость активной зоны. Тесная компоновка оборудования на крышке реактора вызвала трудности в его размещении и в некоторых случаях требовала доработки и подгонки.

При установке на заводе экранных колец в корзину реактора в районе выходных патрубков не удалось избежать существенной деформации сварки. Отклонение размеров было признано недопустимым, так как в дальнейшем могло вызвать затруднения для свободного вращения поворотных пробок. Из-за отсутствия времени на устранение этого дефекта корзина была передана в монтаж и установлена в корпус реактора для проведения критических опытов без натрия. По окончании этих работ реактор был разобран и отклонения размеров были устранены.

После сборки оборудования на крышке реактора и проверки работы механизмов в холодном состоянии в реакторе и первом контуре была создана среда аргона, которая предотвратила окисление сплава олово — висмут в процессе заливки. Постоянная изоляция сплава осуществлялась при помощи кремний-органической жидкости. На этом подготовка реактора к наладочным работам в горячем состоянии была закончена.

Сварные соединения подвергались испытаниям на прочность, гелиевым испытаниям, γ-дефектоскопии и цветной дефектоскопии. После окончания сварочных работ стыки трубопроводов, работающих при высоких температурах на линиях от реактора до теплообменников натрия — натрия, подвергались аустинизации температурой до 1100° С. Обнаруженные в двух случаях дефекты в сварных соеди-

нениях первого контура были сравнительно легко устранены.

Завершение монтажа, испытания и обкатка второго контура с воздушным теплообменником проходили одновременно с заполнением натрием, обкаткой и критическими экспериментами в первом контуре. Это позволило в конце декабря 1969 г. довести мощность реактора до 5 Мвт при работе с воздушным теплообменником.

### Пуско-наладочные работы

**Первый контур** подвергали проверке на вакуумную плотность и сушке. Предварительно были проведены гелиевые испытания с устранением всех выявленных течей. Были загружены стальные имитаторы рабочих пакетов и экранные пакеты. Сплав в гидрозатворах поворотных пробок находился в замороженном состоянии. Насосы были отсечены по газу стояночными уплотнениями. Масло в насосы не заливалось.

Сушка первого контура производилась путем его вакуумирования с одновременной работой системы электрообогрева. Температура первого контура повышалась ступенями по 50° С. Максимальная температура контура была 300° С. Разогрев корпуса реактора осуществлялся прокачкой горячего воздуха (~300° С) по кожуху корпуса.

В процессе сушки контур несколько раз заполнялся аргоном. Для этого использовался чистый аргон с содержанием кислорода 3·10<sup>-3</sup>% и влаги 0,1 мг/л.

В общей сложности контур вакуумировался в течение пяти суток. Предельный вакуум, достигнутый в контуре, был 2·10<sup>-1</sup> мм рт. ст., натечка — 0,8·10<sup>-1</sup> мм рт. ст. в час.

К 26 ноября 1969 г. контур был подготовлен к заполнению натрием. Основные трубопроводы контура имели температуру 220—240° С, вспомогательные трубопроводы — от 200 до 300° С, корпуса промежуточных теплообменников — 150—250° С, корпус реактора — 180—200° С. Термомпары, установленные в реакторе, показывали температуру 170—220° С.

**Подготовка натрия.** Натрий с завода-поставщика поступал в емкостях объемом 1 м<sup>3</sup> под слоем аргона. Из каждой транспортной емкости предварительно отгонялось от 25 до 1000 г парафина (используемого на заводе-поставщике в качестве среды, изолирующей натрий от воздуха) под вакуумом при разогреве натрия в емкости до 200—250° С. Отгонка продолжа-

лась до прекращения высаживания паров парафина в установленной на всасе вакуумной ловушке, охлаждаемой воздухом и занимаемой 3 ч. Из транспортной емкости натрий перекачивался аргоном через механический сетчатый фильтр в промежуточный бак емкостью 6 м<sup>3</sup>, где натрий отстаивался некоторое время, а затем перекачивался со дна в приемный бак емкостью 35 м<sup>3</sup>. Все баки до подачи в них натрия подвергались сушке путем вакуумирования с одновременным включением электрообогрева.

Для контроля попадания парафина промежуточный и приемный баки с натрием подвергались вакуумированию через ловушку паров. При вакуумировании промежуточного бака, заполненного первой порцией натрия, в ловушке паров были обнаружены следы парафина. Бак вакуумировался в течение 19 ч, пока не прекратился выход парафина. При вакуумировании промежуточного бака со второй порцией натрия, а также приемного бака парафина в ловушке не обнаружено. Натрий из промежуточного бака никогда до дна не перекачивался.

В приемном баке натрий очищался циркуляцией его через холодную ловушку. В результате десятикратной прокачки объема натрия через ловушку содержание окислов в натрии снизилось так, что температура закипания пробкового индикатора с 220° С снизилась до 120° С. Из приемного бака натрий был перелит через сетчатый фильтр в сливной бак первого контура, где также прошел фильтрацию циркуляцией через штатную холодную ловушку первого контура. Химический анализ проб натрия, взятого из сливного бака перед заполнением первого контура, показал следующее содержание основных примесей (%): углерода —  $4,5 \cdot 10^{-3}$ ; водорода —  $6 \cdot 10^{-4}$ ; азота —  $1,5 \cdot 10^{-3}$ ; кальция —  $6 \cdot 10^{-3}$ ; калия —  $2 \cdot 10^{-2}$ . Следует отметить, что в процессе дальнейшей работы реактора содержание этих примесей натрия в первом контуре не изменилось.

Аналогичным образом был приготовлен натрий для второго контура. Начальное содержание окислов в сливном баке второго контура соответствовало температуре закипания 195° С. После прокачки через холодную ловушку восьмикратного объема натрия температура закипания индикатора снизилась до 110° С.

**Заполнение первого контура натрием** производилось при температуре натрия 250° С. Контур предварительно заполнялся чистым аргоном. Натрий подавался из сливного бака

электромагнитным насосом. Заполнение велось через дренажи корпуса реактора с переливом натрия в контур через приподнятые фильтры. После полного заполнения корпуса фильтры были опущены, и заполнение контура велось через соответствующие дренажи. Таким образом, при начале циркуляции весь натрий из контура попадал в реактор, проходя через фильтры, установленные вместо выемных частей вентилей Ду-200 на входных трубопроводах аппарата.

Заполнение контура происходило спокойно, без каких-либо неприятностей, контроль осуществлялся по расходомеру натрия, прокачиваемого электромагнитным насосом, уровнемеру сливного бака, а также по изменению показаний термометра электрообогрева и системы тензометрирования.

Единственная задержка произошла из-за несрабатывания сигнализатора заполнения натрием одного из промежуточных теплообменников при максимальном уровне натрия в корпусе реактора, по-видимому, из-за завывания отметки места врезки воздушника. Для заполнения теплообменника натрием пришлось отсечь воздушник от газовой системы первого контура и поднять уровень натрия в теплообменнике путем сброса газа в атмосферу через предусмотренный вентиль отбора проб.

Тензометрические измерения в процессе заполнения контура натрием показали, что напряжения достигали в трубопроводах 300—400 кг/см<sup>2</sup>, в зоне нижнего патрубка корпуса аппарата 600—800 кг/см<sup>2</sup> и в отдельных местах корпуса промежуточного теплообменника 2500—3000 кг/см<sup>2</sup>.

**Очистка первого контура, обкатка насосов.** В связи с отказом от водяной промывки натриевых контуров очистка контура от послеомтажных механических загрязнений проводилась циркуляцией натрия по контуру через механические сетчатые фильтры, установленные вместо выемных частей напорных вентилей.

Циркуляция натрия в контуре показала, что механические насосы с нижним гидростатическим подшипником работают хорошо. Однако при циркуляции натрия по одной из ниток первого контура происходили сильные гидравлические удары по контуру в результате колебаний обратного клапана на второй нитке контура. Частоты и амплитуда колебаний контура росли с увеличением числа оборотов насоса. При параллельной работе обоих насосов колебаний контура не наблюдалось.

При первом замере содержания окислов в первом контуре была получена температура забивания  $180^{\circ}\text{C}$ . После 58 ч работы холодной ловушки окислов температура забивания пробкового индикатора оказалась равной  $110^{\circ}\text{C}$ .

Очистка контура с циркуляцией через сетчатые фильтры проводилась в течение семи суток с максимальными расходами по каждой нитке до  $320\text{ м}^3/\text{ч}$ . После этого сетчатые фильтры были извлечены из контура. Осмотр фильтров показал, что в них какие-либо посторонние включения отсутствуют. Одновременно был заменен обратный клапан, создававший вибрацию контура, обратным клапаном с более тяжелой конструкцией захлопки. После замены клапана запуск циркуляции натрия по контуру, начиная с насоса, имеющего легкий обратный клапан, проходил без заметных вибраций. Дальнейшая обкатка контура производилась при расходе натрия  $320\text{ м}^3/\text{ч}$  и температуре  $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ . В это время были измерены характеристики насосов, выбеги насосов, опробованы аварийные блокировки. К 5 декабря 1969 г. контур был подготовлен к загрузке рабочих пакетов в реактор и проведению физического пуска с теплоносителем.

**Заполнение и обкатка второго контура**, также как и первого контура, проводилась после длительной сушки контура вакуумированием с одновременным разогревом до  $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$ . Трубопроводы второго контура разогревались электрообогревом, а воздушный теплообменник — газовыми горелками, установленными в каждой из четырех секций.

Предельный вакуум, достигнутый в контуре, был равен  $6\cdot 10^{-1}\text{ мм рт. ст.}$  и натекание —  $5\cdot 10^{-2}\text{ мм рт. ст.}$  в час.

Натрием заполнялись одновременно обе нитки второго контура и воздушного теплообменника с предварительной проверкой проходимости всех дренажных линий. При заполнении выявилась чрезмерно высокая установка буферной емкости воздушного теплообменника. При начале показаний уровнемера буферной емкости уровень натрия в банках насосов достигал верхнего предельного уровня. Поэтому перед запуском циркуляции по второму контуру пришлось отсечь по газу буферную емкость и передать частично натрий из баков насосов в буферную емкость. Впоследствии буферная емкость была заменена емкостью большего объема, установленной на более низкой отметке.

Запуск циркуляции натрия по обеим ниткам контура параллельно через воздушный теплообменник прошел спокойно. Вибрации контура обнаружено не было. Содержание окислов в контуре, измеренное сразу после запуска циркуляции, соответствовало температуре забивания  $170^{\circ}\text{C}$ .

Циркуляция натрия с расходом до  $220\text{ м}^3/\text{ч}$  осуществлялась через сетчатые фильтры (сетка с ячейками  $0,25 \times 0,25$ ), установленные вместо выемных частей арматуры на каждой нитке контура. Через шесть суток циркуляции фильтры были извлечены. При их осмотре никаких следов засорений обнаружено не было.

**Загрузка активной зоны** для ускорения осуществлялась упрощенным приспособлением — штангой, подвешенной к крюку подъемного крана. Загрузка производилась через загрузочное отверстие в малой поворотной пробке без шибера.

Для предотвращения попадания воздуха в отверстие был опущен шланг, через который непрерывно подавался аргон.

Извлекаемые из реактора пакеты-имитаторы помещались в ящик с содой. Загрузочная штанга отмывалась от остатков натрия в спирто-водяном растворе. Рабочие пакеты до установки в реактор разогревались до  $150\text{--}180^{\circ}\text{C}$  в электропечи. Температура натрия в процессе загрузки реактора составляла  $180^{\circ}\text{C}$ . Содержание окислов в натрии к концу загрузки поднялось до температуры забивания  $150^{\circ}\text{C}$ .

По окончании физического пуска реактор в декабре 1969 г. был выведен на мощность  $5\text{ Мвт}$  при температуре натрия  $350^{\circ}\text{C}$  со съемом тепла воздушным теплообменником.

В марте 1970 г. мощность реактора доведена до  $20\text{ Мвт}$  при температуре натрия до  $400^{\circ}\text{C}$ . К 15 августа реактор выработал  $47\ 000\text{ Мвт}\cdot\text{ч}$  тепловой энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский и др. Доклад на конференции по быстрым реакторам (Лондон, 1966).
2. Е. В. Борисюк и др. *Energia nucl.*, 12, No. 1 (1970).
3. О. Д. Казачковский и др. Исследование физических характеристик реактора БОР-60. Доклад на научно-технической конференции стран-членов СЭВ (Ульяновск, 1970).
4. Н. В. Красноярцев и др. Экспериментальные исследования распределения активности на реакторе БОР-60. Там же.