

УДК 621.039.526

## Опыт проектирования, сооружения и пуска энергоблока с реактором БН-600 на Белоярской АЭС

НЕВСКИЙ В. П., МАЛЫШЕВ В. М., КУПНЫЙ В. И.

За прошедшие после пуска Первой АЭС годы ядерная энергетика далеко шагнула вперед. Как в СССР, так и во многих странах мира успешно работают крупные атомные электростанции, не уступающие по своим показателям обычным.

Почти на всех существующих и создаваемых АЭС установлены тепловые реакторы, которые могут использовать только 1—2% добываемого природного ядерного топлива. Изменить положение можно, применяя быстрые реакторы. Они производят образующееся из  $^{238}\text{U}$  вторичное горючее — плутоний, в количестве большем, чем его за это время «сгорает». Расширенное воспроизводство ядерного топлива позволяет перевести в плутоний и выжечь большую часть добываемого урана, в том числе и того, который направляется в отвал.

В техническом отношении эти установки сложнее, чем тепловые реакторы. Поэтому для их освоения требуется значительно больше усилий и времени.

В настоящее время общепризнанным и наиболее отработанным типом быстрого реактора является реактор с натриевым теплоносителем в первом и втором контурах и водой в качестве рабочего тела третьего контура. На разработку современной технологии быстрых реакторов потребовалось 30 лет. За это время в нашей стране освоена технология натриевого теплоносителя, разработаны физические основы быстрых реакторов, выбраны и проверены материалы и основные компоненты активной зоны, изготовлены приборы и оборудование натриевых контуров, сооружены экспериментальные реакторы БР-5(10) и БОР-60. К настоящему времени СССР располагает опытом сооружения и эксплуатации двух самых крупных промышленных быстрых реакторов — БН-350 и БН-600. Работа реактора БН-350 позволила накопить значительный опыт эксплуатации, включая проведение ремонтных работ с разрезкой основных натриевых трубопроводов, от-

мывкой парогенераторов и контуров от продуктов взаимодействия натрия с водой и воздухом [1].

### Особенности реакторной установки БН-600

В 1980 г. на Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова введен в эксплуатацию энергоблок № 3, который имеет в своем составе крупнейший в мире ядерный быстрый реактор БН-600 тепловой мощностью 1470 МВт, три прямоточных модульных парогенератора ПГН-200М производительностью по 660 т/ч пара с давлением 140 кгс/см<sup>2</sup> и температурой 505°С, три турбогенератора К-200-130 мощностью по 220 МВт (1 кгс/см<sup>2</sup> = 9,81 · 10<sup>4</sup> Па).

Отвод тепла от реактора осуществляется по трехконтурной схеме [2].

По сравнению с БН-350 в БН-600 применены новые технические решения. Первый контур сконструирован по интегральной схеме, и все его оборудование размещено в герметичном корпусе реактора диаметром 12,8 и высотой 12,6 м. Корпус установлен на катковые опоры, закрепленные на фундаментной плите шахты реактора. Главные циркуляционные насосы (ГЦН) и теплообменники первого контура выполнены выемными. Топливо перегружается под слоем натрия механизмами, установленными во вращающихся над активной зоной пробках. Механизмы наводятся на ячейки активной зоны автоматической системой по заданным координатам без визуального контроля. Все приводы механизмов первого контура, систем перегрузки топлива и управления реактором установлены над корпусом, который заключен в герметичный страховочный кожух, исключая утечку радиоактивного натрия. Корпус, внутрикорпусные устройства и трубопроводы выполнены из аустенитной стали 1Х18Н10.

Прямоточные парогенераторы ПГН-200М модульного типа состоят из 24 теплообменников (модулей) каждый, связанных между собой систе-

мой трубопроводов натрия и воды (пара) с отключающей арматурой и сгруппированных в восемь секций «испаритель — пароперегреватель — пароперегреватель». Модульная конструкция парогенератора (ПГ) является более безопасной при возникновении протечки воды в натрий и позволяет отключать дефектную секцию на мощности без останова петли (парогенератора). Трубные пучки испарительных модулей ПГ и трубопроводы третьего контура выполнены из перлитной стали 10X2M, а пароперегревательные модули ПГ и трубопроводы второго контура полностью из аустенитной стали 1X18H10. Межконтурная плотность ПГ контролируется комплексом систем, регистрирующих появление водорода в натрии и защитном газе второго контура, гидродинамические явления при возникновении газовых пузырей в натрии и акустические шумы при течах [3].

В установке БН-600 в качестве ГЦН первого и второго контуров используются центробежные насосы полупогружного типа с гидростатическими подшипниками. В отличие от установки БН-350 с двухскоростными ГЦН на БН-600 для плавного изменения оборотов ГЦН (250—970 об/мин.) применен электропривод с асинхронно-вентильным каскадом и системой управления скоростью.

В тепловой схеме третьего контура применены типовые решения и использовано серийное тепло-механическое оборудование. На каждой из трех петель установлены турбина К-200-130 с регенерационной установкой, генератор ТГВ-200М с водяным охлаждением статора, деаэрактор ДСП-800 и группа питательных электронасосов ПЭ-380-185/200.

Информация о работе блока обрабатывается системой «Комплекс-Уран», в которую входят информационная подсистема М-60, вычислительная система М-7000 и устройства вывода информации на дисплей.

### Основные этапы пусконаладочных работ на блоке № 3 БАЭС

Пусконаладочные работы проводились с декабря 1978 по март 1980 г. поэтапно: накопление и очистка натрия для заполнения реактора и петель второго контура; разогрев реактора и заполнение его натрием; опробование турбогенераторов; разогрев второго контура и заполнение его натрием; водная и кислотная промывки трубопроводов и оборудования третьего контура; физический пуск реактора.

На всех этапах пуска параллельно с наладкой оборудования ЯППУ велись пусконаладочные работы в машинном зале, включая опробование

турбогенераторов и предпусковые промывки. Успешному проведению пусконаладочных работ способствовало хорошее качество оборудования монтажных работ. Широко применялось совмещение монтажных и наладочных работ. Для этого производилась поэтапная передача в наладку и эксплуатацию отдельных систем.

**Накопление и очистка натрия.** Для заполнения реактора и петель второго контура необходимо было доставить 1800 т натрия. Он поставлялся, в отличие от БН-350, не в однокубовых емкостях, а в железнодорожных цистернах емкостью 25 м<sup>3</sup>, снабженных системой электрообогрева, что значительно упростило транспортировку и приемку. Накопление натрия началось в марте 1979 г.

До начала приемки натрия был выполнен большой объем работ по электромонтажу и наладке систем электрообогрева натриевых контуров, системы приемки, накопления и очистки натрия. Перед началом заполнения контуров натрием воздух в них был заменен инертным газом путем двукратного вакуумирования и заполнения азотом. Натрий после его разогрева в цистерне перекачивался электромагнитными насосами системы приемки в баковое хозяйство, состоящее из трех баков первого контура и четырех баков второго емкостью по 150 м<sup>3</sup> и трубопроводов. В процессе накопления баки подключались к холодным фильтрам-ловушкам второго контура для очистки натрия. Температура натрия в баках удерживалась на заданном уровне (240—250 °С) с помощью электрообогрева. Оборудование, входящее в систему приемки, накопления и очистки натрия, вместе с помещениями, в которых оно расположено, было выделено в специальный комплекс.

**Разогрев реактора и заполнение его натрием.** Завершением монтажа реактора явилась установка в июне 1979 г. поворотных пробок и центральной поворотной колонны. После этого была начата наладка системы наведения механизмов перегрузки на ячейки реактора. Действительные угловые координаты поворотных пробок реактора преобразовывались в коды перфокарт с помощью общестанционной ЭВМ М-4030. Определение действительных угловых координат для всех ячеек реактора явилось уникальной операцией, позволяющей подстраивать систему автоматического наведения на ячейки и производить операции по перегрузке в течение всего срока службы реактора. Одновременно на стенде реакторного зала производилась наладка исполнительных механизмов перегрузки реактора. В августе 1979 г. исполнительные механизмы СУЗ и перегрузки были установлены в реактор и начались их комплексные испытания. Параллельно опробовались электроприводы ГЦН первого контура вместе с системой управления скоростью их вращения. Учитывая, что все насосы и механизмы

реактора были испытаны на заводе-изготовителе, их наладка на блоке была непродолжительной.

После заливки гидрозатворов поворотных пробок эвтектическим сплавом олово-висмут и проверки герметичности реактора один ГЦН был извлечен из реактора, а на его место установлен трубопровод газового разогрева. Газовый разогрев реактора необходим для предотвращения больших температурных напряжений в металлоконструкциях реактора при его заполнении горячим (250 °С) натрием и для предотвращения застывания натрия в баке реактора после заливки. Газовый разогрев реактора производился со скоростью 10—15 °С в сутки, и через 15 суток температура внутрикорпусных устройств достигла 180—230 °С. Скорость разогрева регулировалась с помощью электронагревателей, установленных на трубопроводах подачи газа в реактор. Затем эти трубопроводы были отсоединены от реактора и в него был установлен предварительно разогретый ГЦН.

До заполнения натрием реактора содержание кислорода в его атмосфере было около 0,5% об., а влажность — 5 г/м<sup>3</sup>. Реактор был заполнен натрием в декабре 1979 г. Сразу после этого были включены ГЦН и начата промывка внутрикорпусных устройств от монтажных загрязнений и очистка натрия на фильтрах-ловушках. Через несколько часов после начала циркуляции температура забивания составила 135—155 °С. Максимальная температура забивания (около 200 °С) была достигнута после первой скоростной промывки реактора натрием при температуре 380 °С. Очистка была завершена при температуре забивания 115 °С. Очистка натрия была обеспечена за короткое время в большой степени благодаря тому, что полученный натрий имел высокую чистоту.

В процессе разогрева и заполнения реактора проводились исследования напряженного состояния и вибрации корпуса реактора и внутриреакторных устройств. После заполнения содержание кислорода в атмосфере реактора снизилось до 0,001% об., а влажность — до 0,02 г/м<sup>3</sup>. В период очистки натрия производилась проверка работы исполнительных механизмов СУЗ и перегрузки на «горячем» реакторе.

**Опробование турбогенераторов.** Турбогенераторы (ТГ) монтировались с февраля до декабря 1979 г., после чего они были опробованы на паре пусковой котельной. Предварительно были налажены общециркуляционные системы маслоснабжения, циркуляционного и технического водоснабжения, пароснабжения собственных нужд. Перед опробованием ТГ были промыты и налажены системы смазки и уплотнения и охлаждения статора, а также опробована парожетонная установка.

Для уменьшения объемов временно монтируемых трубопроводов была использована схема опробования ТГ с подачей пара в цилиндр среднего

давления турбины при работе цилиндра высокого давления в безрасходном режиме и глубоком вакууме. При опробовании ТГ были отлажены системы регулирования и испытаны автоматы безопасности турбин, после чего ТГ были включены в сеть и работали под нагрузкой трое суток.

**Разогрев второго контура и заполнение его натрием.** Монтаж парогенераторов (ПГ) был произведен за 8 мес. Модули ПГ поставлялись на монтаж в готовом состоянии и были заполнены азотом при давлении 0,3—0,5 кгс/см<sup>2</sup>.

До начала разогрева петель и заполнения их натрием трубопроводы ПГ по третьему контуру совместно с модулями прошли гидроиспытания, после чего модули были опорожнены и заполнены азотом.

Наиболее продолжительными были работы по наладке и испытаниям систем электрообогрева ПГ, продолжавшиеся 5 мес. Петли разогревались ступенями по 20 °С до температуры 250 °С. Сразу после заполнения петель натрием включался ГЦН второго контура и подключались фильтры-ловушки для очистки натрия. Заполнение петель натрием производилось поочередно в период с декабря 1979 по февраль 1980 г. по мере накопления и очистки натрия и готовности петель к разогреву. После заполнения петель натрием производилась обкатка ГЦН, исследовались гидродинамические характеристики второго контура. Температура натрия в петлях поддерживалась на уровне 240—250 °С за счет работы ГЦН и электрообогрева. В процессе разогрева и заполнения петель натрием исследовалось напряженное состояние ПГ с помощью систем тензо- и термометрирования.

**Водные и кислотные промывки третьего контура.** В соответствии с техническими требованиями для очистки от механических загрязнений проточную часть турбин третьего контура промывали обессоленной водой с помощью штатных питательных насосов (ПЭН). Большой расход воды обеспечивал необходимую кинетическую энергию по степени забивания металлических сеток на всасе ПЭН, а также по прозрачности циркулирующей воды. В результате водной промывки было удалено около 200 кг механических загрязнений, в основном сварочного грата.

После водной осуществлялась кислотная промывка. Перед вводом реагентов контур разогревался до 140—150 °С паром от пусковой котельной, подаваемым на барботажи в деаэраторы петли. Реагенты вводили непосредственно в деаэраторы. Промывка контролировалась по содержанию в растворе железа, комплексообразователя и величине рН. После завершения промывки производилась пассивация отмытых поверхностей.

**Физический пуск реактора.** 28 декабря 1979 г. была начата загрузка в реактор тепловыделяю-

щих сборок (ТВС) зоны воспроизводства путем поочередной замены имитаторов штатными ТВС. 26 февраля 1980 г. реактор БН-600 после загрузки 215 ТВС зоны малого обогащения и 44 ТВС зоны большого обогащения впервые достиг критичности.

В ходе физического пуска исследовалась эффективность органов СУЗ и определялись температурный, барометрический, мощностной и гидродинамический эффекты реактивности. Получено хорошее согласие с расчетными характеристиками.

После полной загрузки активной зоны был измерен расход натрия через ТВС и исследованы гидродинамические характеристики первого контура. Перед выходом на энергетическую мощность были в полном объеме испытаны системы защиты и блокировки. Была успешно проверена работа блока в режиме обесточивания собственных нужд, включая обесточивание насосов циркуляционного водоснабжения станции.

Кроме того, во время физического пуска были выполнены дополнительные мероприятия, повышающие безопасность энергоблока: разработан и смонтирован гидрозатвор для защиты корпуса реактора от повышения давления, испытаны оборудование и трубопроводы второго контура на проточность; защитные устройства от повышения давления во втором контуре ПГ с принудительным разрывом заменены на саморазрывающиеся; опробована работа систем контроля протечек воды в натрий путем впрыска воды во второй контур; усовершенствована система пожаротушения; введены и опробованы системы защиты окружающей среды от загрязнений; проведены дополнительные расчетные обоснования прочности оборудования; экспериментально определена плотность помещений первого контура.

### Пуск и освоение мощности блока № 3 БАЭС

2 апреля 1980 г. впервые в ПГ поочередно была подана питательная вода, и мощность реактора доведена до 0,5% номинальной. После доведения качества питательной воды до нормы 6 апреля мощность реактора увеличили до 5% и ПГ были переведены в паровой режим. 8 апреля мощность реактора увеличили до 30%, турбогенераторы блока включили в сеть, при этом температура достигла 430 °С. После проведения комплексного опробования началось освоение мощности блока, которое производилось следующими этапами:

**первый этап** — работа на 30% номинальной мощности для проведения наладочных и научно-исследовательских работ, наладки водного режима и режимной наладки регуляторов блока;

**второй этап** — работа на 40–70% мощности для продолжения наладочных и научно-исследовательских работ, уточнения режимов активной

зоны, натриевых контуров и основного оборудования;

**третий этап** — работа на 80% мощности для подключения пароводяных турбин и наладки водного режима, проверки работы оборудования при номинальных параметрах пара, уточнения фактических характеристик активной зоны и ПГ.

В течение первого месяца эксплуатации опробованы основные плановые режимы пуска, останова и регулирования мощности. Имитировались аварийные ситуации и вызывалось действие защитных систем реактора. При этом регистрировались изменение параметров сред, напряжения и вибрации в элементах оборудования. В процессе работы блока на мощности 30% и указанных испытаний проверены основные проектные решения и характеристики оборудования, накоплены рекомендации по усовершенствованию схем включения и конструкции оборудования. В этот период проводилась режимная наладка автоматических регуляторов технологических процессов, была исследована радиационная обстановка в производственных помещениях и в окружающей среде.

С 14 мая по 15 июня 1980 г. установка БН-600 была остановлена для осмотра и исследования оборудования, устранения мелких дефектов на вспомогательных системах. В этот период были измерены энерговыделения в ТВС реактора и проверено функционирование механизмов перегрузки топлива. Замерены расходы натрия через ТВС для сравнения с расходами до энергопуска. Были сняты крышки водяной и паровой полостей модулей одного ПГ и осмотрены внутренние элементы конструкции.

15 июня 1980 г. энергоблок был вновь пущен для дальнейшего освоения мощности. В конце июня мощность доведена до 50% при температуре натрия на выходе из активной зоны 470 °С. В июне — августе было отключено несколько модулей ПГ из-за повышения содержания водорода в натрии, зарегистрированном системами контроля межконтурной плотности ПГ. В середине августа было получено 60%, а в конце месяца — 70% номинальной мощности. Был проведен контроль состояния основного оборудования, выполнялись испытания, аналогичные испытаниям на мощности 30%. Продолжалась наладка автоматических регуляторов технологических процессов на более высоких уровнях мощности. В середине сентября мощность энергоблока была доведена до 80%, а температура натрия на выходе из активной зоны реактора достигла 525 °С.

2 октября 1980 г. установка была остановлена для планового профилактического ремонта перед длительной работой в течение зимнего периода. Во время разгрузки и останова производились испытания основного оборудования, детальное исследование отдельных элементов тепловой схемы. Во время останова проведены также испы-

тания отключенных модулей, которые выявили наличие межконтурных неплотностей, причины которых исследуются. 5 ноября 1980 г. энергоблок был выведен на мощность 70%, и программа исследований продолжалась в условиях его длительной работы.

На всех этапах освоения мощности контролировалась радиационная обстановка в производственных помещениях и окружающей среды.

Характеристики оборудования соответствовали проекту, оборудование блока хорошо управлялось, режимы работы были устойчивыми.

### Подготовка персонала

Оперативный персонал № 3 до начала наладочных работ прошел необходимую подготовку на реакторе БОР-60, обычных тепловых электростанциях и первых блоках БАЭС. В процессе сооружения блока персонал принимал участие в монтажных и пусконаладочных работах. С началом приемки натрия (более, чем за год до пуска блока) персонал приступил к эксплуатации вводимых систем. Таким образом, подготовка персонала была достаточно высокой, что положительно сказалось на успешном пуске и освоении мощности блока.

### Основные выводы

Ввод в эксплуатацию энергоблока с быстрым реактором БН-600 решает вопросы сооружения и эксплуатации крупных промышленных энергоблоков с реакторами подобного типа с целью обеспечения дальнейшего наращивания топливно-энергетического потенциала страны на основе более полного использования природного урана.

Конструкция БН-600 с интегральной компоновкой первого контура показала высокую надежность и целесообразность применения в последующих энергоблоках с быстрыми реакторами. Модульный принцип конструкции ПГ позволяет отключать и включать секции во время работы, а высокие параметры острого пара — использовать серийное тепломеханическое оборудование машинного зала, включая турбогенераторы, и достичь высокого к. п. д.

Опыт строительства и монтажа блока подтвердил хорошую квалификацию строительно-монтажного персонала, что позволило обеспечить высокое качество монтажа реактора и натриевых

контуров, выполнить большой объем электро-монтажных работ в условиях продолжающегося сооружения блока.

Поэтапное выполнение пусконаладочных работ позволило последовательно решать тематические задачи, обеспечивающие ввод в эксплуатацию комплексов систем. Высокая квалификация наладочного и эксплуатационного персонала, а также наличие заранее разработанной пусконаладочной документации позволили в короткие сроки освоить новое оборудование и применить при этом принципиально новые технические решения.

Поэтапное освоение мощности блока и правильно выбранные параметры обеспечили безопасность наладки, испытаний и научно-исследовательских работ на всех этапах пуска. Опыт освоения мощности показал надежную работу оборудования и систем во всех режимах эксплуатации, что позволит в будущем усовершенствовать технологию и конструкцию установок с быстрыми реакторами.

В приветствии участникам сооружения энергоблока с реактором БН-600 Генеральный секретарь ЦК КПСС Л. И. Брежнев дал следующую оценку их работе: «Эта выдающаяся трудовая победа, одержанная в канун 110-й годовщины со дня рождения В. И. Ленина, открывает еще одну страницу в истории отечественной атомной энергетики, свидетельствует о том, что наша социалистическая Родина по праву занимает передовые научные и технические позиции в использовании энергии мирного атома на благо человечества.

Создание электростанций с реакторами-размножителями, позволяющими наиболее рационально использовать ядерное горючее, является новым крупным шагом в дальнейшем наращивании топливно-энергетического потенциала страны, знаменует коренные преобразования в энергетике».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко Д. С. и др. Опыт эксплуатации реактора на быстрых нейтронах БН-350 (1972—1977 гг.). В кн.: Труды междунар. симп. МАГАТЭ по конструированию, строительству и опыту эксплуатации опытно-промышленных реакторов. Болонья, 10—14 апр. 1978.
2. Будов В. М. и др. Быстрый реактор БН-600 — установка для энергетики ближайшего будущего. Доклад на «Нуклекс-75». Базель, Швейцария.
3. Поплавский В. М. и др. Вопросы безопасности парогенераторов натрий-воды и их решение в СССР [1].

Поступила в Редакцию 21.04.81