

ИЗ ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ БН-600

Л.А. Кочетков, В.М. Поплавский, М.Ф. Троянов

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Представлен краткий исторический обзор проектирования, сооружения и эксплуатации энергоблока БН-600 – преемника БН-350, но спроектированного на другой технологической платформе. Показаны проблемы, возникшие на начальном этапе эксплуатации БН-600, и перспективы развития быстрых натриевых реакторов.

Ключевые слова: интегральная компоновка, натрий, реактор БН-600, технология быстрых реакторов.

Key words: pool layout, sodium, BN600 reactor, fast reactor technology.

8 апреля 2010 г. исполнилось 30 лет с того дня, когда первые два турбогенератора третьего блока Белоярской АЭС с реактором БН-600 были синхронизированы с сетью Свердловэнерго. Рождение идеи создания БН-600 относится к далекому 1962 г., когда велось интенсивное проектирование реактора БН-250 (позднее он стал называться БН-350). Такое смелое рискованное решение, как создать в удаленном изолированном от единой энергосистемы месте опытно-промышленный блок для производства электрической и тепловой энергии, а также питьевой и технической воды для развивающегося промышленного района с добычей и первичной переработкой урановой руды, нефти, производства минеральных удобрений и электронных материалов, мог принять только наш министр Е.П. Славский. Он и начальник Главка А.Д. Зверев постоянно контролировали ход проектных работ, которые выполнялись многими организациями, в том числе ОКБМ (главный конструктор реакторной установки), ОКБ ГП (конструктор парогенератора), ВНИПИЭТ (генпроектант установки), ВНИИНМ (конструктор-технолог твэлов), ФЭИ (научный руководитель проекта). В разработке корпуса реактора принимали участие специалисты «Промстальконструкции», в разработке машинного зала – ЛОТЭП; участниками проекта были также ЦНИИМС, ЦНИИКА, СНИИП и др.

Для большинства упомянутых организаций разработка установки с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем была совершенно новой задачей. В этих условиях роль Физико-энергетического института с его опытом создания и эксплуатации БР-1, БР-2, БР-5, уникальной экспериментальной базой по проблемам теплофизики, гидравлики, технологии натриевого теплоносителя, горячими материаловедческими и радиохимическими камерами и критическими стендами БФС-1 и БФС-2 была особенно важной и ответственной. ФЭИ вместе с другими организациями старались создать реакторную установку, не уступающую по надежности и безопасности конкурентам из Франции (Phenix), Великобритании (PFR), Германии (SNR-300), США (CRFBR).

Текущие дела по проекту, состояние разработок быстрых реакторов в других странах постоянно обсуждались как внутри института, так и на совместных совещаниях в ОКБМ, ВНИИНМ, в четвертом Главке. Вдохновителем и организатором этой деятельности был научный руководитель ФЭИ Александр Ильич Лейпунский. Как никто другой он прекрасно знал все, что публикуется по проблемам быстрых реакторов, всячески поддерживал атмосферу поиска, честного и взыскательного отношения к собственным разработкам.

Под его руководством в ФЭИ велась напряженная работа по выбору размеров и материалов твэлов активной зоны БН-350, боковой и торцевых зон воспроизводства, пэлов, внутриреакторной защиты, определению способов сохранения поля энерговыделения и оптимального режима перегрузок, постоянно обсуждалась с коллегами из других организаций разработка основного оборудования. Особенно настораживал неудачный опыт с парогенераторами реакторов БР-5 и «Энрико Ферми». На основе проведенных в ФЭИ экспериментов по большим межконтурным протечкам воды в натрий были разработаны рекомендации по системе защиты второго контура при таких авариях, а на основе коррозионных и нейтронно-физических исследований были сформулированы рекомендации по допустимым примесям натрия. В ФЭИ была выполнена разработка и проведена стендовая проверка приборов контроля межконтурной протечки воды в натрий, индикаторов содержания в натрии окислов натрия, ловушек паров натрия, пробоотборника натрия; были выданы рекомендации по средствам тушения натриевых пожаров, холодным ловушкам окислов, системе КГО. В это время в ОКБМ шла разработка и стендовая проверка главных натриевых насосов, обратных клапанов, системы перегрузки топлива, приводов и механизмов СУЗ. В общем все причастные организации приступили к интенсивной, тщательно контролируемой разработке проекта.

Вот в этот период А.И. Лейпунский совместно с О.Д. Казачковским предложили продумать следующий шаг на пути развития ядерной энергетики с БН-реакторами и приступить к разработке новой установки с реактором на быстрых нейтронах на базе усовершенствованного БН-350, но с большим по сравнению с БН-350 приближением к промышленным установкам. В конце ноября 1962 г. на конференции по жидкометаллическим теплоносителям в г. Обнинске А.И. Лейпунский вкратце изложил эту идею. Предлагалось в рамках активной зоны БН-350 повысить нагрев теплоносителя в 1.5 раза, т.е. с 200 до 300°C, температуру теплоносителя на выходе из активной зоны до 600°C, а мощность с 1000 до 1500 МВт. Это позволяло использовать серийно выпускаемое оборудование машзала и вырабатывать ~ 600 МВт электрической мощности. Предложение с интересом было встречено организациями-разработчиками проекта БН-350 и поддержано «родным» 16-ым Главком и Министерством энергетики.

В 1963 г. ФЭИ выпустил первое техническое задание на разработку проекта БН-600; вскоре проект был включен в стратегию развития атомной энергетики до 1980 г., а ОКБМ приступил к конструированию реакторной установки. Началась кропотливая работа по анализу, оптимизации и постепенному «приземлению» первоначальных рекомендаций с учетом проводимых расчетных и экспериментальных работ, опыта создания и пуска БН-350 и БОР-60 и публикаций в иностранных журналах. Уже накануне пусконаладочных работ на БН-350 был выявлен ряд неприятных проблем:

- из-за рубежа была получена информация о значительном распухании и изменении механических свойств аустенитных сталей при облучении их нейтронами интегральными дозами $(1.0-1.5) \cdot 10^{23} \text{ н/см}^2$;

- в результате проведенных в ФЭИ экспериментов было выяснено, что возникшая малая межконтурная протечка воды (пара) в натрий в теплопередающих поверхностях парогенератора за несколько минут увеличивается до большой течи (от 30–50 г/с до 0.5–1.0 кг/с) и за это же время происходит разрушение соседних трубок, попавших в зону «факела»;

- было установлено плохое качество натрия, полученного с Чирчикского завода.

С последней проблемой справились довольно быстро – была разработана технология и создана установка, которая позволяла нагревать транспортные однокубовые емкости с натрием и отгонять из них парафин, после чего натрий через фильтр направлялся в емкости натриевых контуров. Количественных данных по радиационному воздействию на конструкционные материалы еще не было, поэтому ограничились приваркой к стенкам чехла ТВС БН-350 дистанционирующих пластин. Для предотвращения массового разрушения трубной поверхности парогенераторов при межконтурных течах в них, в первую очередь, нужна была разработка высокочувствительного быстродействующего прибора контроля возникновения межконтурной протечки, что с некоторым запозданием в ФЭИ было сделано.

Начальный период эксплуатации БН-350 также сопровождался рядом нарушений условий нормальной эксплуатации и предаварийных ситуаций:

- в первые месяцы после пуска были выведены из эксплуатации пять из шести парогенераторов по причине межконтурных течей;

- наблюдались массовые разгерметизации оболочек твэлов;

- проявилось радиационное формоизменение (распухание и прогиб) чехловых труб ТВС.

Все это потребовало дополнительных исследований и внесения изменений в проектные решения и учитывалось в разработках БН-600. Так, в частности, временно было ограничено выгорание топлива в твэлах БН-350 значением 5.7%, установлено, что массовая разгерметизация оболочек твэлов обусловлена недооценкой газовыделения и недостаточным объемом газовой полости твэлов, что потребовало соответствующего изменения конструкции твэлов. Но наиболее тяжелые последствия были связаны с авариями практически всех парогенераторов. Именно из-за этого пришлось услышать горькое резюме при обсуждении возникшей ситуации в ЦК КПСС: «Ну что ж, довольно наигрались с быстрыми реакторами?!» И что было бы дальше, если бы не министр Е.П. Славский... Были организованы срочные исследования и установлено, что причиной многочисленных межконтурных протечек в парогенераторах стало грубейшее нарушение технологического процесса при изготовлении деталей и сварке труб Фильда на Подольском заводе – изготовителе парогенераторов. После этого Е.П. Славский организовал ремонт – по сути дела, изготовление на месте новых парогенераторов. Уникальная работа была выполнена НИКИМТ при участии ОКБ ГП, ФЭИ и эксплуатационщиков. Парогенераторы отмыли от натрия, изготовили и приварили к трубной доске новые трубы Фильда. После проведения контрольных операций парогенераторы были введены в работу, что обеспечило впоследствии эксплуатацию установки с КИУМ 80–90%.

В 1965–1968 гг. были приняты важные решения по проекту БН-600. В отличие от БН-350 было решено перейти на интегрированную баковую компоновку первого контура с размещением насосов и промтеплообменников внутри корпуса реактора. С учетом результатов проведенного эксперимента отказались от корпусного типа парогенератора в пользу прямоточного секционнно-модульного с использованием феррито-мартенситной стали 1Х2М для испарительных модулей и нержавеющей стали ОХ18Н9Т для пароперегревательных и промперегреватель-

ных модулей. По настоянию ВНИИНМ была снижена температура натрия на выходе из реактора с 600 до 550°C.

После преодоления «послеродовых» неприятностей и вывода реактора БН-350 в режим устойчивой безаварийной эксплуатации проведение НИОКР по проекту БН-600 резко интенсифицировалось. В подтверждение и обоснование основных характеристик, безопасности и надежности оборудования БН-600 осуществлялась обширная программа исследований. В ФЭИ на стенде БФС-2 исследовали физические характеристики активной зоны и проверяли внутрибаковую защиту; в горячей лаборатории начались исследования материалов активной зоны БН-350; провели испытания в реакторе БН-350 и опытную регенерацию МОХ-топлива; на двух стендах исследовались большие и малые межконтурные течи применительно к новой конструкции парогенератора; вместе с Березниковским заводом и Хлорным институтом разрабатывалась новая технология производства натрия и с ЛОАЭП – новые транспортные средства, которые исключают контакт натрия с воздухом на всех этапах производства и транспортировки натрия; осуществлена разработка новых средств контроля за межконтурными протечками в парогенераторах, новых пробоотборников натрия; выполнены эксперименты по истечению в воздушную среду больших количеств натрия и проверены новые средства тушения натриевых пожаров; подготовлены подробные программы, методики, контролирующая аппаратура для проведения физического пуска реактора; разработаны и изготовлены элементы пускового источника. Напряженная работа по завершению разработок оборудования и рабочего проекта в целом была выполнена в ОКБМ, ЛОАЭП, ОКБ ГП, ВНИИНМ и других организациях.

Перелом в темпах завершения строительно-монтажных работ наступил летом 1978 г. после известного «совещания министров», которое организовал руководитель областного штаба стройки БН-600, первый секретарь Свердловского Обкома КПСС Б.Н. Ельцин при большой помощи руководителя Главка Минэнерго бывшего директора Белоярской АЭС В.П. Невского. Это здесь он (Б.Н. Ельцин) скажет: «Я знаю, что дела идут плохо на строймонтаже не из-за того, что Вы, строители и монтажники, любите «протирать штаны», а потому, что сидящие здесь руководители министерств срывают сроки поставки оборудования. Больше этого не будет, иначе прошу на меня не обижаться – я нужные двери открывать умею. А свердловчане, которые и раньше не подводили Партию и Правительство, завершат сооружение БН-600 в установленный срок, до конца пятилетки».

Хотя пусконаладочные работы, физический и энергетический пуски прошли без каких-либо серьезных происшествий, все же в дальнейшем не удалось избежать проблем с парогенераторами и тепловыделяющими элементами. Были и другие проблемы – с насосами, арматурой, верхней защитной колонной, случались и наружные протечки натрия с его возгоранием. Однако за прошедшие 30 лет усилиями эксплуатационников при помощи участников проекта проведена огромная работа по усовершенствованию оборудования, приборов, систем автоматического регулирования и режимов эксплуатации. Выполнена большая материаловедческая программа, в результате которой удалось повысить выгорание топлива в 1.5 раза – с 7 до 11.3% т.а. В реакторе проведены испытания большой группы экспериментальных ТВС с МОХ-топливом. С 1985 г. началась переработка ОЯТ БН-350 и БН-600 на заводе РТ. Надежность всего оборудования была повышена.

По важнейшим эксплуатационным показателям, таким как КИУМ, число незапланированных остановок реактора, облучаемость персонала, экологическое воздействие на окружающую среду, блок занимает одно из лидирующих мест в концерне Росэнергоатом. В настоящее время с опытом эксплуатации реактора БН-600

связаны наиболее высокие в мире достижения в освоении технологии реакторов на быстрых нейтронах. С учетом этого опыта в нашей стране разработан более совершенный в отношении безопасности блок БН-800, сооружение которого находится в завершающей стадии. Важнейшая задача, которая может быть решена с пуском блока, это освоение замкнутого топливного цикла. В утвержденную Правительством Федеральную целевую программу до 2010 г. включена также разработка коммерческого блока большой мощности БН-1200 МВт.эл., на который вместе с замкнутым топливным циклом возлагаются стратегические надежды будущей атомной энергетики. Накопленный положительный опыт эксплуатации блока БН-600 в настоящее время вдохновляет и другие страны приступить к безотлагательной разработке и созданию опытных, а затем и промышленных реакторов на быстрых нейтронах.

Поступила в редакцию 14.10.2010

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.526

Status and Trends of the Fast Reactor Technology Development \V.M. Poplavsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 7 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

It is shown that by the present time only the technology of the fast sodium-cooled reactors as a basis of the new technological platform involving the closed fuel cycle is actually available to be commercialized. It is declared that the utilization of other coolants can improve safety and performance of the fast reactors.

УДК 621.0395.2

Development of the Design of the Large Sodium-Cooled Fast Reactor Unit (BN-K) \N.N. Oshkanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

The choice of the BN-K commercial fast reactor as a basis of the new technological platform is justified. The ways of reduction in the unit cost of the construction down to the BNPP-2006 project are shown.

УДК 621.039.526

30-year Commercial Operating Experience from the BN-600 Reactor \M.V. Bakanov, O.A. Potapov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The main outcomes of the operation of the BN-600 liquid metal fast reactor and achieved performance indicators are considered. The fields of work on the BN-600 lifetime extension are presented.

УДК 621.039.5

Facts from the BN-600 Development History \L.A. Kochetkov, V.M. Poplavsky, M.F. Troyanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages.

The concise historical review of the design, construction and operation of the BN-600 power unit, BN-350 power unit successor but designed on a different technological platform, is presented. The problems encountered at the initial stage of the BN-600 operation are shown. The perspectives of the development of the fast sodium-cooled reactors are shown.

УДК 621.039.53

Development of the Methodology and Justification of the Extension of Lifetime of the Vessel and Irreplaceable in-vessel Components of the BN-600 Reactor to 45 Years \B.A. Vasilev, O.Yu. Vilensky, V.B. Kaydalov, Yu.L. Kamanin, B.Z. Margolin, A.G. Gulenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 12 pages, 2 tables, 3 illustrations.

The predictive analysis of the effect of the negative factors on the lifetime of the irreplaceable BN-600 reactor components (reactor vessel, irreplaceable in-vessel components) has been fulfilled. The results of the completed work have shown that the serviceability of the vessel and irreplaceable in-vessel components of the BN-600 reactor for 45 years of operation is ensured.

УДК 621.039.5

Ensuring the Serviceability of the Replaceable Reactor Components while Extending the BN-600 Power Unit Lifetime up to 45 Years \B.A. Vasilev, A.V. Timofeev, M.A. Lyubimov, V.V. Gladkov, V.B. Kaydalov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 1 table.

The Experimental machine-building design office together with the Central research centre of structural materials called «Prometheus» and Beloyarsk NPP have carried out the work on justifying and ensuring the serviceability of the replaceable equipment of the BN-600 reactor while extending