

мы стремимся строить АЭС с быстрыми реакторами и надеемся, что строительство и эксплуатация первых таких реакторов БН-350 и БН-600 вместе с выполнением программы, направленной на исследования ядерной физики и теплофизики этих реакторов, усовершенствование материалов, разработку оборудования и технологических процессов, приведут к созданию мощных и экономически выгодных АЭС с быстрыми реакторами».

Сегодня эти слова столь же актуальны и звучат даже более убедительно, чем 40 лет назад, особенно если в реакторный ряд добавить БН-800.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александр Лейпунский. Ядерные энергетические системы и их технические возможности. Atomic Energy Review, v. 4. Commemorative Issue. Vienna: IAEA, 1966.
2. Лейпунский А.И. Состояние и перспективы развития быстрых реакторов. — Атомная энергия, 1970, т. 28, вып. 4, с. 297—302.
3. Казачковский О.Д. Реакторы на быстрых нейтронах. Научно-технические мемуары. Обнинск, ИАТЭ. 1995.
4. Троянов М.Ф. Развитие научно-технических основ энергетических быстрых реакторов. — Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 2, с. 102—110.
5. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольд М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат, 1970.
6. Асмолов В.Г., Зродников А.В., Солонин М.И. Инновационное развитие ядерной энергетики России. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 3, с. 147—155.
7. Zrodnikov A.V. Initiative by the president of the Russian Federation on global nuclear infrastructure. — In: Proc. of an Intern. Conf. on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors. 19—22 June 2006. Vienna: IAEA, 2007, STI/PUB/1295, p. 63—72.
8. Ошканов Н.Н., Сараев О.М., Баканов М.В. и др. 30-летний опыт эксплуатации натриевого быстрого реактора БН-600. — См. настоящ. вып., с. 186—197.
9. Сараев О.М., Носков Ю.В., Зверев Д.Л. и др. Обоснование проекта и состояние сооружения энергоблока БН-600. — См. настоящ. вып., с. 197—201.

УДК 621.039.526

30-ЛЕТНИЙ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА БН-600

*Ошканов Н.Н., Сараев О.М. (ОАО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва),
Баканов М.В., Говоров П.П., Потанов О.А. (Белоярская АЭС, г. Заречный),
Ашурко Ю.М., Поплавский В.М. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск),
Васильев Б.А., Каманин Ю.Л. (ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород),
Ершов В.Н. (ОАО «СПбАЭП», г. Санкт-Петербург)*

8 апреля 2010 г. исполняется 30 лет со времени энергетического пуска 3-го энергоблока Белоярской АЭС с БН-600. Этот реактор является единственным действующим в настоящее время энергетическим реактором такого типа в мире. Более того, он является первым в мире промышленным энергоблоком с быстрым натриевым реактором, работающим в коммерческом режиме.

Успешная эксплуатация БН-600 является подтверждением лидирующих позиций, которые занимает наша страна в области натриевых быстрых реакторов. Завершение проектного срока эксплуатации энергоблока, составляющего 30 лет, является важной вехой, временем для подведения итогов эксплуатации и определения дальнейших перспектив как собственно БН-600, так и направления в целом.

Интегральная компоновка первого контура и секционно-модульная компоновка парогенерато-

Эксплуатация БН-600 в течение проектного срока службы. Опыт эксплуатации БН-600 представляет научный и практический интерес [1—8]. Проект промышленного энергоблока БН-600 аккумулировал в себе положительный опыт, накопленный в нашей стране при разработке, сооружении и эксплуатации предшествующих установок с натриевыми быстрыми реакторами — БР-5/БР-10, БОР-60 и БН-350. При разработке проекта БН-600 также были учтены и проблемы, выявленные на начальной стадии освоения данной реакторной технологии, поэтому можно утверждать, что БН-600 является последовательным этапом развития и реализации на промышленном уровне быстрых реакторов с натриевым теплоносителем.

Основным принципиальным отличием БН-600 от предыдущих проектов является инновационность. Правильность принятых в проекте БН-600 решений была подтверждена впоследствии его

успешной эксплуатацией в течение проектного срока службы.

Выход энергоблока на проектный уровень мощности состоялся в декабре 1981 г., и, начиная с 1982 г., 3-й энергоблок Белоярской АЭС находится в промышленной эксплуатации как коммерческий, демонстрируя высокие и стабильные показатели работы.

Средний коэффициент использования установленной мощности 3-го энергоблока Белоярской АЭС с БН-600 за период промышленной эксплуатации (1982—2009 гг.) составил 74% (табл. 1). За время эксплуатации (~7870 эф. сут)

Таблица 1. Изменение коэффициента использования установленной мощности за период промышленной эксплуатации 3-го энергоблока Белоярской АЭС

Год	Коэффициент использования установленной мощности
1982	56,51
1983	71,76
1984	72,75
1985	72,48
1986	73,46
1987	74,11
1988	76,6
1989	75,89
1990	65,91
1991	69,83
1992	83,53
1993	80,29
1994	78,19
1995	70,31
1996	76,32
1997	72,97
1998	47,93
1999	76,43
2000	73,23
2001	79,89
2002	77,35
2003	75,74
2004	80,04
2005	77,75
2006	78,6
2007	77,78
2008	77,49
2009	76,53

БН-600 выработал более 112 млрд кВт·ч электроэнергии.

Анализ показал, что снижение коэффициента использования установленной мощности обусловлено длительностью останова энергоблока для плановых профилактических и ремонтных работ и перегрузки топлива [5]. В настоящее время продолжительность ежегодных остановов реактора на планово-предупредительный ремонт определяется в основном нормативным временем капитального ремонта турбоагрегатов (50 сут) и временем, необходимым для перегрузки топлива в реакторе (дважды в год). За последние годы эксплуатации средняя продолжительность планово-предупредительных ремонтов составила примерно 71 сут в год. Последние 2 года планово-предупредительные ремонты имеют большую продолжительность, что обусловлено заменой модулей парогенераторов и реализацией других мероприятий по продлению срока эксплуатации энергоблока.

Как показывает опыт последних 10 лет эксплуатации БН-600, внеплановые потери коэффициента использования установленной мощности обусловлены, в основном, отказами технологического оборудования третьего контура, электроснабжения и ошибками персонала и составляют менее 1% годовой энерговыработки.

На БН-600 реализуется программа планомерного повышения проектного выгорания оксидного уранового топлива. В процессе первой модернизации активной зоны БН-600 (переход к варианту 01М) была изменена высота активной зоны в целях снижения линейной мощности твэлов, а также оптимизирована схема перегрузки ТВС. Дальнейшее повышение выгорания топлива было достигнуто посредством замены конструкционных материалов оболочки твэлов и чехлов ТВС (модификация 01М1). Успешная эксплуатация БН-600 с активной зоной 01М1 и цикл послереакторных исследований позволили повысить проектное выгорание топлива до 11,1% тяж. ат. и перейти на более продолжительную кампанию топлива (модификация 01М2) [7, 8]. Основные проектные характеристики всех модификаций активной зоны БН-600, которые варьировались в ходе ее модернизации, представлены в табл. 2.

В процессе эксплуатации были заменены четыре комплекта выемных частей ГЦН-1, комплект выемных частей ГЦН-2, исполнительных механизмов СУЗ, три комплекта направляющих труб исполнительных механизмов СУЗ, комплект испарительных модулей и почти пол-

Т а б л и ц а 2. Эволюция характеристик активной зоны БН-600

Характеристика	Модификация активной зоны реактора			
	01	01М	01М1	01М2
	Период эксплуатации			
	1980—1986 гг.	1987—1991 гг.	1993—2004 гг.	С 2005 г.
Высота активной зоны, мм	750	1000	1030	1030
Высота торцевой зоны воспроизводства, мм:				
верхняя	400	300	300	300
нижняя	400	380	350	350
Число зон обогащения	2	3	3	3
Длина газового объема твэла, мм	808	653	653	653
Конструкционные материалы:				
оболочка твэла	ЭИ-847	ЭИ-847	ЧС-68х.д.	ЧС-68х.д.
оболочка чехла ТВС	16Cr11Ni3Mo	16Cr11Ni3MoTi	ЭП-450	ЭП-450
Максимальная линейная мощность твэла, кВт/м	54	47,2	≤48	≤48
Максимальное выгорание топлива, % тяж. ат.	7,2	8,3	10	11,1
Максимальная повреждающая доза, смещ./ат.	43,5	53,9	75	82
Максимальная продолжительность кампании, эф. сут (центральная/периферийная ТВС)	200/300	330/495	480	560/720*
Продолжительность микрокампании, эф. сут	100	165	160	120/160**
Загрузка топлива в активной зоне, т	8,26	11,63	12,09	12,09
Среднее выгорание топлива, МВт-сут/кг	42,5	44,5	60	70

* В 2008—2009 гг. осуществлена опытная работа активной зоны 01М2 с кампанией 572/733 эф. сут.
** 120 эф. сут — летняя микрокампания, 160 эф. сут — зимняя микрокампания.

ный комплект всех модулей парогенераторов, промежуточный теплообменник для инспекции.

На БН-600 применена автоматизированная дистанционная перегрузка ТВС активной зоны без вскрытия реактора. Перегрузочный комплекс проработал в течение всего времени эксплуатации реактора без замены оборудования (кроме использования запасных инструментов и приспособлений). Единственной проблемой было затруднительное вращение центральной поворотной колонны, обусловленное технологическим дефектом при ее длительной эксплуатации. Работоспособность центральной поворотной колонны была восстановлена путем уникальной операции по ее подъему и ремонту [5].

Всего на БН-600 было 27 течей натрия наружу (из них 5 течей радиоактивного натрия) и 12 течей в парогенераторах, которые имели место на начальном этапе эксплуатации БН-600 в процессе освоения натриевой технологии персоналом, отработки принятых проектных и конструктивных решений, отладки режимов эксплуатации, выявления дефектов в изготовлении оборудования [6]. Наружные течи натрия

были, в основном, малыми и своевременно выявлялись системами обнаружения или операторами. Для локализации и тушения пожаров нерадиоактивного натрия использовали порошковые средства. Только в одном случае течи радиоактивного натрия из вспомогательного трубопровода первого контура в количестве ~1 м³ была использована автоматизированная система локализации последствий горения натрия, которая полностью себя оправдала: выброс радиоактивных веществ при этом инциденте был гораздо ниже допустимых пределов и составил 4·10¹¹ Бк. Обнаружение и ликвидация течей натрия показали эффективность защитных систем локализации последствий.

Используемые в составе энергоблока БН-600 секционно-модульные парогенераторы продемонстрировали высокие эксплуатационные показатели в течение всего периода работы энергоблока. Половина из упомянутых 12 течей пара/воды в натрий случилась в первый год эксплуатации и была вызвана развитием скрытых дефектов изготовления. Межконтурные течи имели место главным образом в модулях основ-

ных пароперегревателей (шесть событий) и промежуточных пароперегревателей (пять случаев), в то время как в испарителях была только одна течь. Перечисленные течи парогенераторов были выявлены и локализованы предусмотренными системами защиты и не привели к аварийным ситуациям [6]. Потери коэффициента использования установленной мощности из-за течей в парогенераторах пренебрежимо малы [5].

Следует отметить, что ни одно отклонение от нормального режима функционирования БН-600, в том числе связанное с натриевыми течами не привело к радиационному воздействию на население и окружающую среду — все они по критерию «воздействие за пределами площадки» находятся ниже Международной шкалы оценки событий.

К настоящему времени, когда БН-600 отработал проектный срок эксплуатации, можно отметить следующие факты:

последняя течь натрия наружу произошла более 15 лет назад — в мае 1994 г.;

за последние 24 года эксплуатации произошла только одна малая течь парогенератора в январе 1991 г. На протяжении почти 19 лет парогенераторы работают без межконтурных течей;

отказы, происходившие в последние годы, связаны в основном с технологическим оборудованием 3-го контура и системами электропитания, а не с натриевыми системами.

Аварийная защита срабатывала в основном в начальный период эксплуатации энергоблока. За последние 9 лет (2001—2009 гг.) эксплуатации энергоблока не было ни одного случая аварийного останова реактора. Число аварийных остановов за 7000 ч работы, оцененное за период 1990—2009 гг., составляет 0,2 (по АЭС стран мира ~0,6).

Выход долгоживущих газоаэрозольных радионуклидов в окружающую среду отсутствует. Выход радиоактивных благородных газов в настоящее время пренебрежимо мал и составляет <1% допустимого по санитарным нормам [2]. Немного больший выход имел место только в начальный период эксплуатации.

Таким образом, БН-600 продемонстрировал высокие показатели эксплуатации и тем самым успешно решил поставленную задачу — обоснование на промышленном уровне надежности

и безопасности быстрых натриевых реакторов в целом и, в частности, натриевого теплоносителя. БН-600 трижды признавался лучшим среди энергоблоков страны по показателям надежности и безопасности.

Обоснование продления проектного срока службы БН-600. Назначенный срок эксплуатации энергоблока БН-600 (30 лет) завершается в апреле 2010 г. Его успешная работа послужила основанием для продления проектного срока службы. Эта работа велась в течение последних 8 лет.

В 2002—2004 гг. был реализован первый подготовительный этап к продлению срока эксплуатации энергоблока. На этом этапе были выполнены следующие мероприятия:

начаты исследования, включая материалыевческие, обосновывающие возможность продления срока эксплуатации незаменимых элементов реакторной установки;

завершено комплексное обследование систем и элементов энергоблока, в результате которого определены необходимые дополнительные исследования, а также оборудование, требующее замены;

проведена оценка текущего уровня безопасности энергоблока. По методологии МАГАТЭ выявленные отступления оценены по степени влияния на безопасность и предложены мероприятия по их устранению или компенсации;

в рамках работы по управлению ресурсом восстанавливаемых элементов оценены их состояние, техническое обслуживание, ремонт.

По результатам первого этапа была обоснована экономическая целесообразность продления срока эксплуатации и разработан инвестиционный проект продления срока эксплуатации БН-600 на дополнительные 15 лет (до 2025 г.), который был утвержден 16 апреля 2007 г. Федеральным агентством по атомной энергии. Согласно этому проекту уже начатые работы по подготовке энергоблока к продлению срока эксплуатации продолжались по следующим основным направлениям:

обоснование возможности работы незаменимых элементов реакторной установки в дополнительный срок эксплуатации;

обследование и продление ресурса элементов, не планируемых к замене;

замена оборудования;
реализация предусмотренных мероприятий по повышению безопасности энергоблока;

углубленная оценка безопасности энергоблока и разработка комплекта документации на получение новой лицензии на эксплуатацию.

Среди наиболее важных результатов необходимо отметить следующие:

завершение в 2007 г. расчета прочности незаменимых элементов БН-600 по критериям механики разрушения с учетом дефектности материалов и сварных соединений и выпуск заключительного отчета, обосновывающего работоспособность незаменимых элементов в течение 45 лет эксплуатации;

продление ресурса 131 элемента АЭС, в том числе элементов транспортно-технологической части реакторного оборудования, оборудования второго контура, электротехнического оборудования и общестанционных систем;

оснащение энергоблока вторым комплектом аварийной защиты и резервным пунктом управления;

оснащение дополнительной системой аварийного расхолаживания реактора с использованием воздушного теплообменника, подсоединенной к петле № 5 второго контура;

замена оборудования, из которой наиболее сложной и ответственной является замена модулей парогенераторов (в настоящее время заменены 49 из 72 модулей);

повышение сейсмостойкости систем и оборудования энергоблока, включая модернизацию системы антисейсмической защиты и системы аварийного электроснабжения 1-й категории надежности;

анализ нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий на базе современного программного обеспечения и корректировка на основе полученных результатов эксплуатационной документации, необходимой для получения лицензии на дальнейшую эксплуатацию энергоблока.

Накопленный в процессе выполнения мероприятий по продлению срока эксплуатации опыт может быть использован при задании срока службы для следующих проектов быстрых натриевых реакторов.

Основные научно-технические результаты, достигнутые при эксплуатации БН-600. Наиболее значительными результатами являются:

освоение и отработка в промышленном масштабе натриевой технологии;

отладка и усовершенствование режимов эксплуатации;

длительная эксплуатация крупногабаритного оборудования в среде натрия;

освоение технологии замены и ремонта натриевого оборудования, включая основное оборудование (главные циркуляционные насосы первых двух контуров, парогенератор, промежуточный теплообменник, поворотные пробки);

достижение приемлемого выгорания топлива;

обеспечение надежной работы системы обращения с топливом (загрузка-выгрузка ТВС, отмывка и хранение отработавших ТВС);

продление срока эксплуатации действующего энергоблока.

Успешная эксплуатация БН-600 продемонстрировала надежность и безопасность быстрых натриевых реакторов на промышленном уровне и подтвердила высокий потенциал для развития данной реакторной технологии до уровня реакторов 4-го поколения. Продление срока эксплуатации до 2025 г. будет способствовать обоснованию возможности коммерциализации быстрых натриевых реакторов и преемственности в развитии указанной реакторной технологии за счет подготовки кадров для новых энергоблоков.

Заключение. Успешная эксплуатация БН-600 в течение всего проектного срока службы, позволившая продлить его эксплуатацию до 45 лет, подтверждает правильность заложенных в проект концептуальных и технических решений, свидетельствует о промышленном уровне освоения данной реакторной технологии и создает реальные перспективы для ее дальнейшего развития. Накопленный в процессе работы БН-600 опыт незаменим при разработке, проектировании, сооружении и эксплуатации новых быстрых натриевых реакторов и для дальнейшего совершенствования данной реакторной технологии до уровня, отвечающего требованиям реакторов 4-го поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Выломов В.В. и др. Опыт эксплуатации энергоблока с БН-600. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 5, с. 330—337.
2. Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А. Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 Белоярской АЭС. — Там же, 2004, т. 96, вып. 5, с. 342—346.

3. **Ошканов Н.Н., Потапов О.А., Говоров П.П.** Оценка эффективности работы энергоблока с реактором на быстрых нейтронах БН-600 Белоярской АЭС за 25 лет эксплуатации. — Ядерная энергетика, 2005, № 1, с. 3—9.
4. **Костин В.И., Васильев Б.А.** Задачи сооружения БН-800 и возможности создания перспективных быстрых реакторов. — Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 1, с. 21—26.
5. **Ошканов Н.Н., Говоров П.П., Кузнецов А.В.** 28 лет эксплуатации. Энергоблок с реактором на быстрых нейтронах БН-600: основные технико-экономические показатели. — Бюл. Росэнергоатома, 2008, № 8, с. 34—37.
6. **Ashurko Y.M., Baklushin R.P., Zagorulko Y.I. e.a.** Fast reactor operating experience gained in Russia: analysis of anomalies and abnormal operation cases. — In: Proc. of a Techn. Com. Meeting on Unusual Occurrences during LMFR Operation. Austria, Vienna, 9—13 November, 1998, IAEA-TECDOC-1180, p. 117—144.
7. **Oshkanov N.N., Bakanov M.V., Potapov O.A. e.a.** The main results of Beloyarsk NPP unit 3 operation. — In: Proc. IAEA Techn. Meeting on the Coordinated Research Project «Analyses of and Lessons Learned from the Operational Experience with Fast Reactor Equipment and Systems». Obninsk, Russia, February 14—16, 2005, p. 190—208.
8. **Васильев Б.А., Рогов В.А., Мишин О.В., Фарахин М.Р.** Опыт эксплуатации и направления развития активной зоны реактора БН-600. — В сб.: Ядерные энергетические технологии с реакторами на быстрых нейтронах. Обнинск, 9—10 декабря 2003, доклад 2.13.

УДК 621.039.526

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ РЕАКТОРОВ

*Сараев О.М., Ошканов Н.Н. (ОАО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва),
Зродников А.В., Поплавский В.М., Аиурко Ю.М. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск),
Баканов М.В. (Белоярская АЭС, г. Заречный), Васильев Б.А., Каманин Ю.Л.
(ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород), Еришов В.Н. (СПбАЭП, г. Санкт-Петербург),
Святкин М.Н., Корольков А.С., Крашенинников Ю.М. (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград)*

Настоящая статья посвящена анализу эксплуатационного опыта, накопленного по быстрым реакторам с натриевым теплоносителем, с точки зрения разработки и освоения такой реакторной технологии, а также перспективам ее дальнейшего развития. Освоение быстрых натриевых реакторов происходило как на основе результатов НИОКР, так и с учетом эксплуатационного опыта. В свою очередь, достигнутые эксплуатационные показатели свидетельствуют о качестве разработки и уровне освоения данной реакторной технологии в целом.

Этапы освоения быстрых натриевых реакторов. Работы по быстрым натриевым реакторам начались в нашей стране во второй половине XX века. Их результатом стали:

исследовательский быстрый реактор БР-5/10 (ФЭИ, Обнинск);

опытный быстрый реактор БОР-60 (НИИАР, Димитровград);

прототипная реакторная установка БН-350 (Мангышлакский энергокомбинат, Шевченко/Актау, Республика Казахстан);

промышленный энергоблок БН-600 (Белоярская АЭС, г. Заречный);

проект промышленного энергоблока БН-800 (сооружается на площадке Белоярской АЭС).

Следует отметить, что в ОИЯИ были сооружены два импульсных быстрых реактора ИБР-1 (1960) и ИБР-2 (1981) с натриевым теплоносителем. Однако в силу специфики они не рассматриваются.

Успешная эксплуатация быстрых натриевых реакторов подтверждает высокий уровень их освоения, общий срок эксплуатации отражает объем накопленного опыта (табл. 1, 2). Сроки эксплуатации, приведенные в табл. 1, рассчитываются с момента «мокрого» физического пуска (наличия теплоносителя в активной зоне) до окончательного останова реактора. Хотя следует отметить, что период вывода установки из эксплуатации после ее окончательного останова