

## 30-ЛЕТНИЙ ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН-600

**М.В. Баканов, О.А. Потапов**

*Белоярская АЭС, г. Заречный*



Рассмотрены основные итоги эксплуатации реактора БН-600 на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и достигнутые технико-экономические показатели.

**Ключевые слова:** безопасность, быстрый, КИУМ, модернизация, надежность, натрий, эксплуатация.

**Key words:** safety, fast reactor, capacity factor, upgrade, reliability, sodium, operation.

Развитие быстрых реакторов и натриевой технологии – результат планомерной реализации идеи расширенного воспроизводства топлива и замыкания топливного цикла. Решение этой задачи надолго отодвинет вопрос обеспечения топливом переживающей вторичный бурный рост атомной энергетики.

Конструкция реактора БН-600 создавалась в период 1963–1973 гг., при этом его создатели использовали опыт, накопленный при разработке, сооружении и эксплуатации натриевых быстрых реакторов – БР5/БР-10, БОР-60 и БН-350. Главной задачей эксплуатации этого реактора было подтверждение возможности реализации технологии БН-реакторов на промышленном уровне.

Его эксплуатация началась апреле 1980г. На номинальную электрическую нагрузку 600 МВт (эл.) БН-600 был выведен в октябре 1981г., и с этого времени работает в базовом режиме на номинальной мощности со среднегодовым коэффициентом ее использования 77–80%, определяемым, в основном, периодами планового технического обслуживания оборудования. В общей сложности время работы реактора БН-600 в режиме выработки электроэнергии достигло величины 200 тыс. часов, что соответствует примерно 8 тыс. эквивалентных суток работы на полной мощности и составляет 76,8% календарного времени. По этому показателю БН-600 превзошел все когда-либо действовавшие аналогичные крупные реакторы типа БН. Среднегодовой коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) БН-600 на протяжении всего периода работы оставался стабильно высоким (рис. 1). За 30 лет эксплуатации только шесть значений КИУМ были меньше 70%, три из них приходятся на начальный период работы и связаны с освоением режимов работы энергоблока в целом и отдельного его оборудования [1–3].

**1990 г.** (КИУМ 65,9%) – потери выработки электроэнергии были связаны, в основном, с неплотностью в системе охлаждения генераторов.

**1991 г.** (КИУМ 69,8%) – неисправности оборудования третьего (пароводяного) контура и один случай течи воды в натрий в парогенераторе.

**1998 г.** (КИУМ 47,9%) – спланированный ремонт центральной поворотной колонны (ЦПК) реактора.

© *М.В. Баканов, О.А. Потапов, 2011*

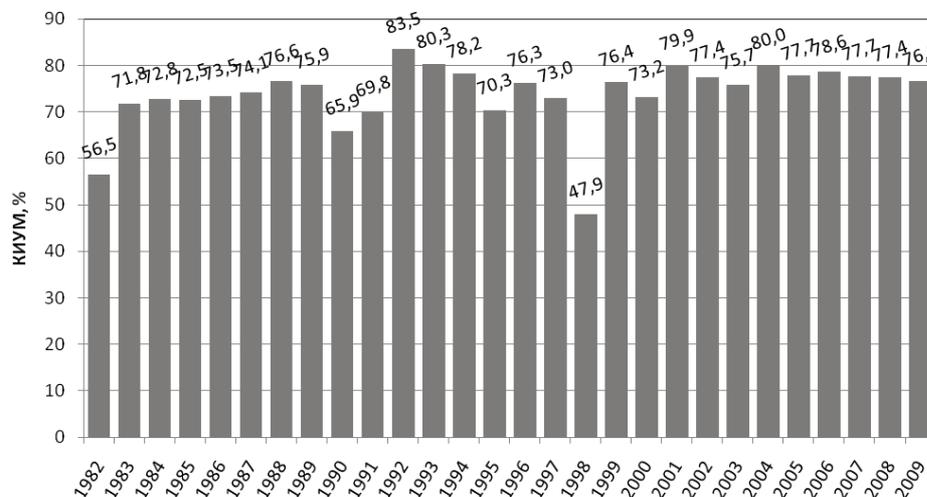


Рис. 1. Распределение КУУМ БН-600 по годам

КИУМ БН-600 с начала эксплуатации составляет 72%, средний КИУМ (медиана) – 75,7%, максимальное значение КИУМ 83,5%.

Период эксплуатации БН-600 можно условно разделить на два отрезка времени: с апреля 1980 г. по сентябрь 1981 г. – период освоения БН-600, характеризующий поэтапным повышением мощности от 30 до 80%; с октября 1981 г. по настоящее время – работа в режиме промышленной выработки электроэнергии.

На втором отрезке работы БН-600 было достигнуто значение КИУМ 73,9%. До-

стигнутое значение годового КИУМ 77–80% является максимальным при существующей продолжительности плановых остановок энергоблока (рис. 2). В настоящее время продолжительность плановых инспекций оборудования определяется, в основном, нормативным временем капитального ремонта турбоагрегатов (50 суток) и необходимостью проведения перегрузок топлива в реакторе дважды в год. Основные эксплуатационные показатели БН-600, достигнутые за 30-летний период и в 2009 г., приведены в табл. 1.

За прошедшее время эксплуатации реактора БН-600 достигнуты высокие

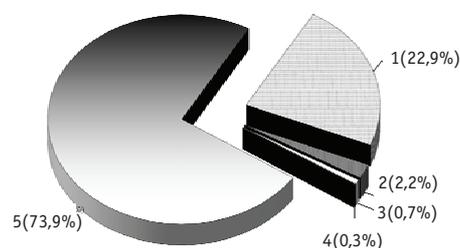


Рис. 2. Интенсивность использования установленной мощности БН-600:

- 1 – плановые инспекции и перегрузки топлива;
- 2 – отказы оборудования и ошибки персонала;
- 3 – прочие причины (теплоснабжение, диспетчерские ограничения, снижение вакуума и др.);
- 4 – освоение блока;
- 5 – выработка электроэнергии

показатели по безопасности и надежности работы, что подтверждает основные концепции безопасности проекта и перспективность развития технологии быстрых реакторов с натриевым теплоносителем.

Срабатывание аварийной защиты (АЗ) происходило, в основном, в начальный период эксплуатации энергоблока (рис. 3). За последние девять лет (2001–2009 гг.) эксплуатации энергоблока не было ни одного случая аварийного останова реактора. Среднее количество аварийных остановов реактора БН-600 за 7000 часов его работы, оцененное за период 1990 – 2009 гг., составляет 0,2 (по АЭС стран мира ~ 0,6).

Таблица 1

**Основные эксплуатационные показатели БН-600**

Показатели	2009 г.	За период эксплуатации	Лучшее значение
Установленная мощность, МВт	600	600	–
Число часов работы, ч	6734	200105	–
Количество неплановых остановов (АЗ), шт	–	23	0
Выработка электроэнергии, млн.кВт·ч	4022,3	112550	4401,96
КИУМ, %	76,53	73,92	83,52
Годовая коллективная доза облучения, чел·Зв	0,46	20	0,08
Выход ИРГ, Ки	119	40222	60

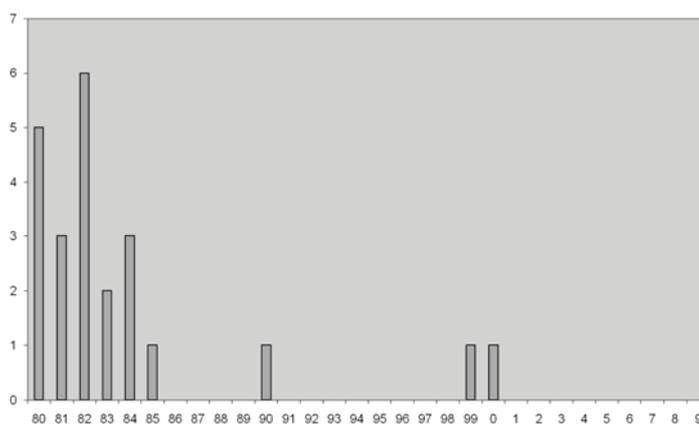


Рис. 3. Количество срабатываний АЗ

После освоения персоналом реакторной технологии и отладки работы основного оборудования внеплановые потери КИУМ происходят из-за отказов технологического оборудования третьего контура и электроснабжения. На рисунке 4 приведено распределение во времени отказов оборудования и ошибок персонала, имевших место в 1982 – 2009 гг. Следует отметить, что ни одна из имевших место неисправностей оборудования или ошибок персонала не привели к негативному воздействию на население, персонал и окружающую среду. По международной шкале ядерных событий INES все события находятся на уровне 0 и вне шкалы, за исключением одного события первого уровня, т.е. являются незначительными.

Несмотря на то, что БН-600 проектировался в 1963 – 1973 гг. показатели экологичности энергоблока находятся на уровне современных типов реакторов. Выход долгоживущих газоаэрозольных радионуклидов в окружающую среду отсутствует. Выход инертных радиоактивных газов в настоящее время пренебрежимо мал и составляет меньше 1% от допустимой величины по санитарным нормам [1]. Количество твердых и жидких радиоактивных отходов не превышает 50 м<sup>3</sup> в год. Дозовые нагрузки на персонал ниже средних значений по атомной энергетике в целом.

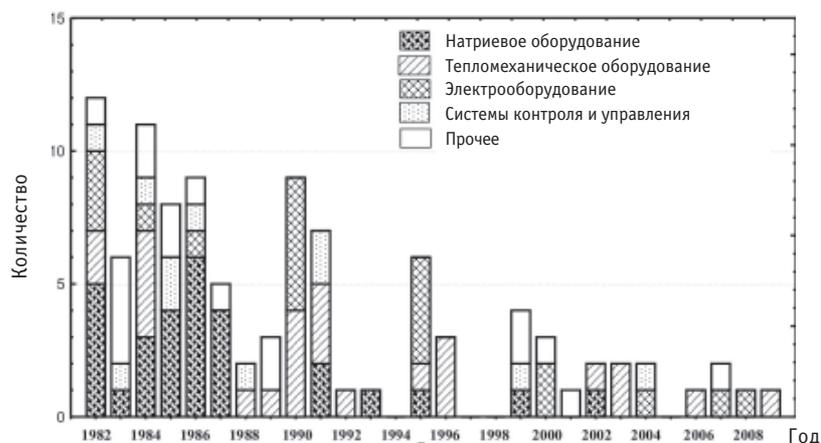


Рис. 4. Распределение нарушений нормальной эксплуатации БН-600 из-за отказов оборудования

За 30-летний период эксплуатации БН-600 были получены следующие существенные результаты:

- проведены длительные ресурсные испытания крупногабаритного оборудования, работающего в натрии;
- освоена натриевая технология;
- отработаны и оптимизированы режимы эксплуатации энергоблока;
- освоена технология замены и ремонта натриевого оборудования, включая насосы и парогенераторы;
- получен уникальный опыт по течам и случаям возгорания натрия, который показал эффективность защитных систем по локализации последствий течей с быстрым определением факта появления и места течи;
- повышено максимальное выгорание топлива более чем в 1,5 раза (с 7 до 11,4% т.а.);
- получен опыт наработки изотопной продукции

Основные технико-экономические показатели БН-600:

- коэффициент полезного действия (КПД) энергоблока брутто – около 42%, нетто – 39%;
- время использования установленной мощности около 7000 часов в год.

БН-600 относится к энергоблокам АЭС второго поколения, назначенный проектом 30-летний срок его эксплуатации истек в апреле 2010 г. После получения положительного прогноза остаточного ресурса основных элементов энергоблока и результатов оценки экономической целесообразности было принято решение о продлении срока эксплуатации БН-600. Этому решению в немалой степени способствовали

- высокая степень безопасности и экологической чистоты энергоблока;
- планомерное выполнение мероприятий по повышению уровня безопасности;
- надежная и экономичная работа энергоблока за предшествующий период эксплуатации.

Работы по комплексному обследованию энергоблока, оценке его безопасности и работоспособности незаменимых узлов и конструкций реактора, выполненные в 2003–2005 гг., показали возможность и экономическую целесообразность продления срока эксплуатации БН-600 еще на 15 лет.

С 2005 г. на энергоблоке ведутся работы по модернизации и замене оборудования в двух направлениях: повышение безопасности и устранение отступлений

от нормативных документов и замена оборудования выработавшего свой ресурс. В рамках первого направления предусмотрено

- сооружение резервного пульта управления;
- создание второго комплекта аппаратуры аварийной защиты;
- оснащение дополнительной системой аварийного расхолаживания с теплообменниками «натрий-воздух»;
- повышение сейсмостойкости зданий, сооружений и оборудования;
- повышение надежности системы аварийного электроснабжения;
- модернизация системы радиационного контроля.

По второму направлению выполняется замена

- парогенераторов (72 модуля);
- рабочих колес главных циркуляционных насосов первого контура;
- питательных насосов;
- лопаток, рабочих колес и диафрагм последних ступеней цилиндров низкого давления турбин;
- системы возбуждения турбогенераторов и др. (всего по 19 системам).

Уникальность выполняемых в рамках продления срока эксплуатации БН-600 работ состоит в том, что они проводятся во время плановых остановок энергоблока, т.е. эксплуатация БН-600 продолжается в штатном режиме. После выполнения основных работ была получена лицензия на эксплуатацию БН-600 до 2020 г.

Успешная работа энергоблока БН-600 послужила обоснованию сооружения новых энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах (БН-800, БН-К).

### **Литература**

1. *Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А.* Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 Белоярской АЭС // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 5. – С. 342-346.
2. *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 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 1.
3. *Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Говоров П.П.* О величине коэффициента использования установленной мощности энергоблока БН-600 за 25 лет эксплуатации // Электрические станции. – 2005. – № 5.

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