

Удельная топливная составляющая себестоимости электроэнергии, коп./(кВт·ч) . . .	0,6
Годовая прибыль от реализации продукции, млн руб. . . .	502.8
Рентабельность производства, % . . .	30
Срок окупаемости капитальных вложений, год . . .	3,4
Стоимость установленного кВт, коп./кВт . . .	860

Анализ показывает, что экономические показатели БН-1800 находятся на сопоставимом уровне с ВВЭР-1000, -1500.

УДК 621.039.534

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКА БН-600 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А. (Белоярская АЭС)

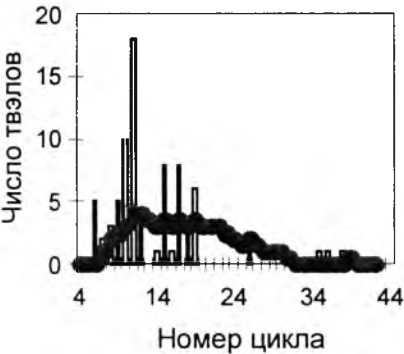
Третий энергоблок Белоярской АЭС с БН-600 введен в действие в начале 1980 г. С 1982 г. он работает на номинальной мощности. За время эксплуатации БН-600 проработал на мощности более 6000 эф. сут, 77% времени он работал, 21% времени было отведено на перегрузку топлива, проведение инспекций и техническое обслуживание. Непланные потери составили 2%.

Основными задачами, которые приходилось и приходится решать при эксплуатации БН-600, явились повышение выгорания топлива, предотвращение и ликвидация последствий натриевых течей, техническое обслуживание уникального натриевого оборудования, вывод показателей эксплуатации на уровень показателей серийных энергоблоков.

Выгорание топлива. Исходная активная зона имела двузонную компоновку (обогащение 21 и 33%, 3-кратная перегрузка через 100 сут) и выгорание 7% тяж. ат. Несмотря на низкое выгорание, наблюдались случаи разгерметизации оболочек твэлов. Первый случай разгерметизации произошел в цикле № 6 ТВС зоны воспроизводства. Максимальной она достигла в цикле № 11, когда разгерметизировались

18 твэлов до контакта топлива с теплоносителем по причине напряжений, возникших в ребристых оболочках твэлов (рис. 1). Поэтому было снижено выгорание, затем проведен переход на гладкие оболочки твэлов зоны воспроизводства.

Второй этап разгерметизации начался в цикле № 15 (восемь негерметичных твэлов с контактом топливо—теплоноситель) и продолжался до цикла № 19 по причине существенного скачкообразного изменения мощности при пере-становках и поворотах ТВС в сочетании со значимым радиационным повреждением оболочек. Поэтому была проведена первая модернизация



Р и с. 1. Разгерметизация твэлов до контакта с теплоносителем: ■ — число твэлов; ● — медиана

активной зоны, после которой разгерметизация твэлов прекратилась. Модернизация заключалась в переходе на трехзонное обогащение топлива (17—21—26% тяж. ат.), отказе от перестановок и поворотов ТВС и переходе на новый материал оболочек твэлов. Выгорание топлива в этой зоне достигло 8,3% тяж. ат.

Впоследствии была проведена вторая модернизация активной зоны. Был применен новый материал оболочек твэлов и увеличена высота активной зоны, что позволило достичь выгорания 10% тяж. ат. с 3-кратной перегрузкой через 165 сут. С такой активной зоной и продолжается эксплуатация БН-600.

В настоящее время разработан проект третьей модернизации активной зоны с выгоранием 11,3% тяж. ат. Переход на такую активную зону начался в 2004 г.

Таким образом, выгорание топлива повышено в 1,5 раза (с 7 до 10% тяж. ат.), максимальное выгорание отдельных ТВС достигло 12% тяж. ат. За все время эксплуатации произошло 228 случаев разгерметизации оболочек твэлов (83 с контактом топлива с теплоносителем, 145 — с выходом газообразных продуктов деления).

Натриевые течи. На БН-600 произошло 12 межконтурных течей вода—натрий в парогенераторах и 27 течей натрия на трубопроводах. Течи вода—натрий произошли в паровых модулях. Их причиной явились зарождение и развитие дефектов в напряженных местах, где при изготовлении исправлялись дефекты.

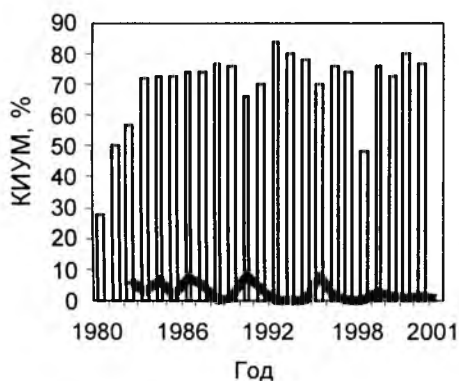
Три случая носили характер больших течей, т.е. течей, при которых изменялись теплогидравлические параметры натриевого контура. Эти течи подавляли как автоматическими системами безопасности, так и путем отсечения дефектных секций с дренированием из них натрия. Девять случаев носили характер малых течей, т.е. течей, при которых теплогидравлические параметры натриевого контура не изменялись. Эти течи обнаруживались специальными системами контроля, идентифицировались персоналом, который и отключал дефектную секцию парогенератора. Как большие, так и малые течи в парогенераторах происходили по ожидаемому сценарию и не привели к непрогнозируемым последствиям. Парогенератор продолжал работать на семи секциях из восьми. Концепция секционного парогенератора и управления течами позволила избежать значительных потерь выработки электроэнергии. По причине течей воды в натрий энергоблок останавливался один раз, мощность снижалась дважды.

Течи натрия в воздушную среду боксов происходили на трубопроводах малого диаметра и натриевых задвижках большого диаметра. Основной причиной течей на трубопроводах явилась недостаточная компенсация температурных расширений и высокочастотные пульсации, которые возникали в тройниках при смешивании потоков натрия с разной температурой. Течи на натриевых задвижках большого диаметра были обусловлены отсутствием проектной герметизации фланцевых соединений, а также их неправильной герметизацией после технического обслуживания. Размер течей натрия составлял от 1 до 600 л на нерадиоактивном втором и от 0,2 до 1000 л на радиоактивном первом контуре. Течи нерадиоактивного натрия подавляли отключением и дренированием натрия, очаги возгорания — ручной засыпкой огнетушащим порошком. Течи радиоактивного натрия подавляли также отключением и дренированием натрия, очаги возгорания — системой пожаротушения в

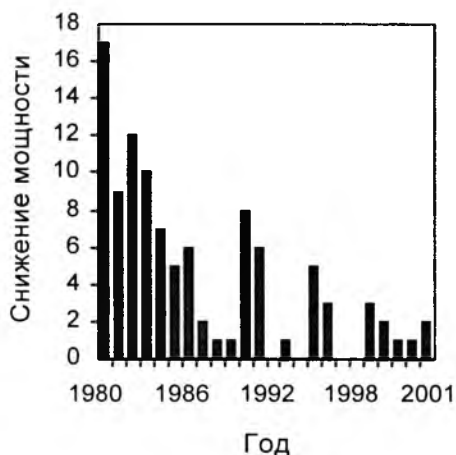
герметичных помещениях. Ни одна из течей и возникшее при этом загорание натрия не привели к ощутимым последствиям. Это объясняется принятой концепцией, которая заключается в постулировании возможности натриевых течей и необходимости создания систем подавления течей и их последствий. В соответствии с этой концепцией натриевое оборудование располагается в облицованных сталью помещениях, где отсутствуют горючие материалы и которые рассчитаны на прием и пожаротушение большого количества натрия.

Всего произошло пять течей из трубопроводов первого контура, 22 течи из трубопроводов второго контура. В 15 случаях наблюдалось горение пролившегося натрия, в остальных случаях инциденты ограничивались дымлением и образованием небольшого количества застывших оксидов. Вследствие течей из натриевых трубопроводов энергоблок останавливался один раз, мощность снижалась дважды.

Течи из натриевых трубопроводов были подавлены штатными техническими средствами, т.е. не вызвали аварийных ситуаций, кроме одной, которая привела к незначительному выходу радионуклидов в окружающую среду. Этот инцидент был оценен уровнем 1 по Международной шкале INES оценки ядерных инцидентов.



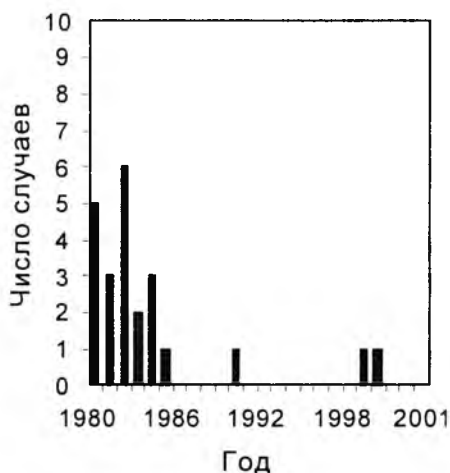
Р и с. 2. Коэффициент использования установленной мощности (□) и его неплановые потери (■)



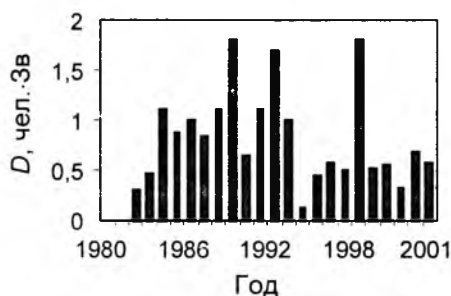
Р и с. 3. Снижение мощности

Техническое обслуживание. Основными процедурами, разработанными и освоенными на БН-600, являются инспекция состояния металла, в том числе с помощью образцов-свидетелей, замена главных натриевых насосов первого, второго контуров, механизмов СУЗ, направляющих труб стержней СУЗ, модулей парогенераторов, отдельных элементов натриевых трубопроводов и трассировки натриевых трубопроводов. Уникальной следует признать инспекцию и исправление обнаруженных дефектов малой поворотной пробки реактора, которая была выполнена с ее выемкой из реактора.

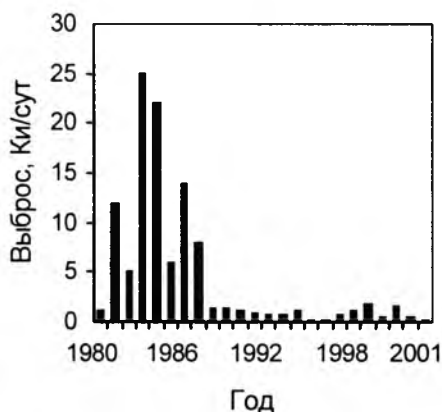
Показатели эксплуатации. Показатели эксплуатации БН-600 достигли уровня, характерного для показателей серийных энергоблоков АЭС. Суммарный коэффициент использования мощности, включая пусковой период, составляет 70%, максимальный годовой коэффициент — 84%, медиана годовых значений — 74%, неплановых потерь годового коэффициента — 1,4% (рис. 2). За время работы произошло 92 случая снижения мощности реактора — 26 в пусковой (первые 1,5 года эксплуатации) и 76 в эксплуатационный период. Медиана снижений мощности составляет два случая в год (рис. 3). Сраба-



Р и с. 4. Число случаев срабатывания аварийной защиты



Р и с. 5. Облучение персонала



Р и с. 6. Среднесуточный выход радионуклидов в окружающую среду

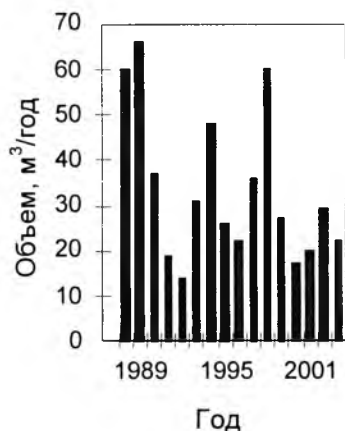
тиванием автоматической аварийной защиты реактора были вызваны 23 случая снижения мощности. В основном они были обусловлены несовершенством автоматических устройств и происходили в первые годы эксплуатации. Восемь случаев останова реактора произошли в пусковой и 15 в эксплуатационный период. После модернизации срабатываний аварийной защиты реактора нет (рис. 4).

Коллективная доза облучения персонала с учетом привлекаемого за эксплуатационный период составила 17,5 чел.·Зв. В значительной мере она определялась модернизацией трубопроводов первого контура и проведением инспекции малой поворотной пробки. Медиана коллективной дозы составляет 0,67 чел.·Зв в год (рис. 5).

Выход долгоживущих газоаэрозольных радионуклидов отсутствует. Выход инертных радиоактивных газов в начальный период эксплуатации определялся значительной разгерметизацией твэлов. В последующий период он определялся в основном работой горячей камеры, в которой проводятся исследования топлива. Медиана среднесуточного выхода инертных радиоактивных газов составляет 1 Ки/сут (рис. 6). Эти значения являются пренебрежимо малыми по сравнению с допускаемыми. Медиана низкоактивных радиоактивных отходов составляет 28 м³ в год (рис. 7).

Таким образом, энергоблок — прототип БН-600 за 23,5 года эксплуатации имеет показатели, сравнимые с эксплуатацией серийных энергоблоков. Его коэффициент использования установленной мощности находится на уровне 74%, неплановые потери мощности

составляют чуть более 1% в год, случаев срабатывания автоматической аварийной защиты нет, коллективная доза облучения персонала находится на уровне ниже 0,7 чел.·Зв в год, выход инертных радиоактивных газов в окружающую среду почти отсутствует. Эти результаты позволили утвердиться в надежности и безопасности быстрых реакторов и приступить к сооружению на Белоярской АЭС нового энергоблока БН-800.



Р и с. 7. Объем твердых низкоактивных отходов

В перспективе на БН-600 запланировано проведение следующих работ:

исследование возможности эксплуатации в течение 40—45 лет, т.е. до 2020—2025 гг.;

проведение модернизации части оборудования;

извлечение из реактора теплообменника натрия—натрий и его инспекция;

повышение выгорания топлива до 15% тяж. ат.;

участие в программе утилизации оружейного плутония.

УДК 621.039.534

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕВОДНЫХ СПОСОБОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА

*Грачев А.Ф., Маершин А.А., Скиба О.В., Цыканов В.А., Бычков А.В.,
Кормилицын М.В., Соколовский Ю.С. (ФГУП ГНЦ РФ — НИИАР)*

Современный этап развития ядерной энергетики характеризуется повышенными требованиями к безопасности и воздействию на окружающую среду всех стадий топливного цикла. При вовлечении в топливный цикл ядерных материалов военного происхождения появляются дополнительные требования по их нераспространению и как следствие дополнительные требования к системам физической защиты, учета и контроля. В этой связи большой интерес может представлять предлагаемая технология, которая с учетом современных требований позволит существенно расширить возможности оксидного топлива и улучшить технико-экономические показатели топливного цикла в целом.

Наиболее важными принципами технологии будущего являются:

замкнутый цикл, т.е. внутренняя замкнутость технологических процессов в целях уменьшения вывода из производства вредных для окружающей среды веществ;

оптимизация технологических систем для достижения необходимых максимальных результатов с исключением излишних переделов и стадий;

максимальный уровень внутренне присущей безопасности, т.е. использование процессов, безопасность которых основана не только на инженерных барьерах безопасности, но и на собственных свойствах технологической системы, обеспечивающих максимальную степень экологической защиты.

Эти принципы одинаково влияют как на общую безопасность, так и на экономику.

Следует учитывать, что процессы, связанные с переработкой и подготовкой ядерного топлива, сформировались еще в 50-е годы и развивались как продолже-