

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БН-600

Б.А. Васильев*, Н.Г. Кузавков*, О.В. Мишин*, А.А. Радионычева*,
М.Р. Фарақшин*, Ю.К. Бибилашвили**, Ю.А. Иванов**,
А.В. Медведев**, Н.М. Митрофанова**, А.В. Целищев**,
Л.М. Забудько***, В.И. Матвеев***, Ю.С. Хомяков***,
В.А. Черный***

*ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

** ОАО «ВНИИИМ», г. Москва,

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



Представлены результаты трех модернизаций активной зоны реактора БН-600 и обзор выполненных мероприятий по повышению выгорания топлива и увеличению межперезагрузочного интервала. Предложены перспективные мероприятия по дальнейшему улучшению эксплуатационных характеристик активной зоны.

Ключевые слова: активная зона, выгорание топлива, конструкционные материалы, сталь, твэл.

Key word: core, burnup, structural materials, steel, fuel pin.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из приоритетных задач, стоящих перед атомной энергетикой, является обеспечение эффективности и конкурентоспособности атомных электростанций по сравнению с традиционными тепло- и гидро- электростанциями. Решение данной задачи идет по нескольким направлениям для РУ и АЭС в целом. В части РУ основными направлениями являются снижение удельной материалоемкости с целью уменьшения капитальных затрат на строительство и повышение эффективности использования топлива.

Основным путем повышения эффективности использования топлива на атомных станциях является снижение потребления ядерного топлива, что обеспечивается увеличением глубины его выгорания. Для реакторов БН увеличение глубины выгорания особенно эффективно, поскольку благодаря высокому уровню воспроизводства топлива (КВ) не требуется существенное повышение загрузки делящегося материала в ТВС.

В России накоплен самый большой в мире опыт по разработке и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах (БН) с натриевым теплоносителем. В отличие от

© Б.А. Васильев, Н.Г. Кузавков, О.В. Мишин, А.А. Радионычева, М.Р. Фарақшин, Ю.К. Бибилашвили, Ю.А. Иванов, А.В. Медведев, Н.М. Митрофанова, А.В. Целищев, Л.М. Забудько, В.И. Матвеев, Ю.С. Хомяков, В.А. Черный, 2011

других стран этот опыт уже в большей степени получен на реакторах опытно-промышленного (БН350) и промышленного (БН-600) масштаба, а не только на исследовательских реакторах.

Реактор БН-600 был пущен в 1980 г., успешно эксплуатируется в течение 30-ти лет и в настоящее время является единственным энергетическим реактором в мире.

В связи с отсутствием промышленного производства уран-плутониевого топлива реактор БН-600 с начала эксплуатации и до настоящего времени работает на обогащенном урановом оксидном топливе. Смешанное уран-плутониевое топливо загружалось в реактор с целью его отработки в составе экспериментальных ТВС.

Максимальная достигаемая глубина выгорания в штатном урановом топливе БН постепенно изменялась от ~ 5% т.а. (первая загрузка реактора БН350) до освоенной на сегодня в реакторе БН-600 величины ~ 11% т.а.

Увеличение выгорания топлива в реакторе БН-600 с 7,2 до 11,2% т.а. было реализовано в несколько этапов путем проведения трех модернизаций активной зоны. Указанный прогресс в определяющей мере обусловлен достижениями в решении материаловедческих проблем, поскольку опыт эксплуатации реакторов БН-350 и БН-600 показал, что основной проблемой увеличения ресурса ТВС является радиационное повреждение материалов чехла ТВС и оболочки твэлов.

Работы по совершенствованию и созданию конструкционных материалов продолжаются, в основном, применительно к оболочке твэлов. Целью является дальнейшее увеличение выгорания топлива.

Основные работы по модернизации конструкции активной зоны реактора БН-600 выполнены в течение первого десятилетия работы реактора [1] и были направлены на обеспечение более благоприятных условий эксплуатации твэлов. В дальнейшем компоновка активной зоны принципиально не менялась. Задачи по модернизации активной зоны по мере увеличения выгорания топлива заключались в оптимизации схемы перегрузок ТВС и максимальном использовании запаса реактивности.

В процессе эксплуатации активной зоны были также выполнены работы по модернизации конструкции ТВС боковой зоны воспроизводства и стержней СУЗ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БН-600

Основные характеристики активной зоны и ТВС реактора с указанием диапазона изменений некоторых из них в процессе модернизации представлены в табл. 1.

Основные конструкторские решения по активной зоне реактора БН-600 были приняты при разработке реактора в период 1965–1975 гг. В процессе последующих проведенных трех модернизаций активной зоны из общих ее характеристик менялись только высота, она увеличивалась с 750 до 1030 мм и, соответственно, сокращалась высота торцевых экранов и газовой полости в твэле.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПЕРВОГО ТИПА

Проект активной зоны первого типа (зона 01) разрабатывался исходя из решения поставленных в то время задач по получению наилучших воспроизводящих характеристик: коэффициента воспроизводства и времени удвоения. Для достижения высокого коэффициента воспроизводства в активной зоне была обеспечена плотная упаковка твэлов с достижением объемной доли топлива ~ 0,44, существенно большей, чем в зарубежных проектах быстрых реакторов. В связи с плотной упаковкой твэлов $t/d = 8,073 \text{ мм} / 6,9 \text{ мм} \gg 1,17$ активная зона имела большое гидравлическое сопротивление. Поэтому подогрев натрия в активной зоне был

Таблица 1

Основные параметры активной зоны и ТВС реактора БН-600

Параметр	Значение
Количество сборок, шт.:	
с топливом	369
с воспроизводящим материалом	378
Диаметр активной зоны, мм	2058
Высота активной зоны, мм	750–1030
Усредненная толщина бокового экрана, мм	409
Толщина торцевых экранов (верхнего/нижнего), мм	300–400/350–400
Вид топлива	UO ₂ (обогащ. по U-235)
Воспроизводящий материал в экранах	UO ₂ (обедн. по U-235)
Загрузка топлива в активную зону, кг	8150–12100
Средний шаг размещения ТВС, мм	98,35
Размер чехловой трубы ТВС: «под ключ» × толщина, мм	96×2
Количество твэлов в ТВС, шт.	127
Размер оболочки твэлов: диаметр × толщина, мм	6,9×0,4
Длина газовой полости в твэле, мм	650–800
Длина сборки, мм	3500

принят большим, чем в зарубежных проектах, равным 173°C ($T_{вх} = 377$ °C, $T_{вых} = 550$ °C). Соответственно, максимальная температура оболочки твэлов с учетом неопределенности параметров в активной зоне реактора БН-600 составляет ~ 710°C.

Для демонстрации возможности достижения малого времени удвоения в реакторах БН была принята высокая энергонапряженность активной зоны – 550 МВт/м³, что конструктивно обеспечивалось относительно малой высотой активной зоны (0,75 м) и, соответственно, максимальной тепловой нагрузкой на твэл 54 кВт/м.

В проекте активной зоны первого типа использовалось топливо двух видов обогащения: 21% в центральной части активной зоны (зона малого обогащения – ЗМО) и 33% в периферийной части активной зоны (зона большого обогащения – ЗБО). Картограмма размещения сборок активной зоны первого типа приведена на рис. 1.

При этом в ЗБО была предусмотрена перегрузка топлива с перестановками ТВС от периферии к центру активной зоны с целью дополнительного выравнивания распределения энерговыделения. В качестве конструкционного материала чехлов ТВС использовалась аустенитная сталь 08X16H11M3 в МТО- (механико-термическая обработка) состоянии, в качестве материала оболочек твэлов – сталь 06X16H15M35 (ЭИ847) в аустенизированном состоянии.

Проектирование активной зоны реактора БН-600 велось в условиях ограниченной информации по поведению конструкционных материалов при высокодозном облучении, характерном для быстрых энергетических реакторов. Решение по допустимой кампании ТВС и глубине выгорания топлива принималось непосредственно перед пуском реактора, который состоялся в 1980 г.

В соответствии с имеющимися экспериментальными данными, полученными к тому времени на БН-350, было установлено, что факторами, определяющими ресурс ТВС, являются радиационное распухание и радиационная ползучесть чехлов ТВС, приводящие к увеличению размера чехлов «под ключ» и их искривлению, и в

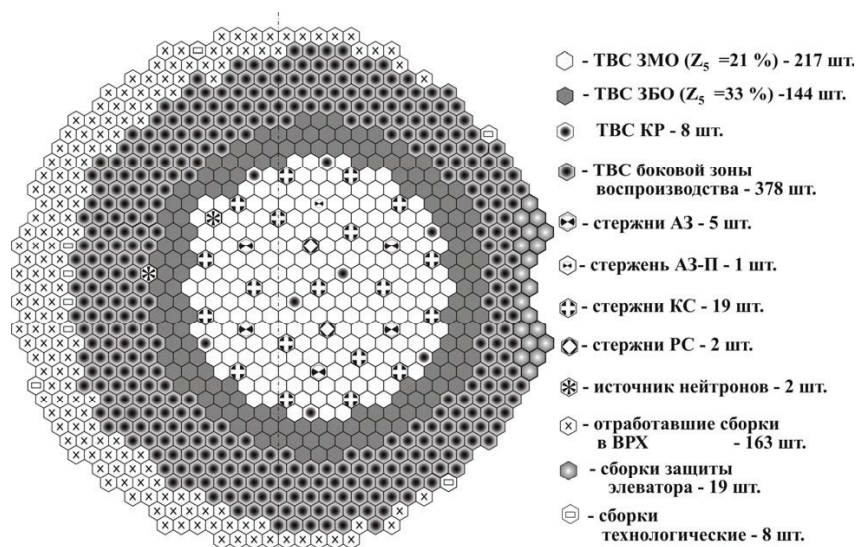


Рис. 1. Картограмма активной зоны первого типа (зона 01)

итоге – к проблеме перегрузки ТВС из-за их силового взаимодействия друг с другом. Исходя из этого кампания ТВС ЗМО была назначена равной 200 эфф.сут ($B^{\max} \approx 5,2\%$ т.а., максимальная повреждающая доза ≈ 40 сна). В ЗБО с учетом меньшей скорости радиационного повреждения кампания ТВС была принята на интервал больше, чем в ЗМО, 300 эфф.сут ($B^{\max} \approx 7,2\%$ т.а., максимальная повреждающая доза ≈ 44 сна).

Опыт эксплуатации активной зоны первого типа подтвердил обоснованность принятых ограничений по кампании ТВС. При проведении перегрузок после достижения указанных выше значений повреждающей дозы усилия извлечения ТВС существенно возросли и были близки к предельно допустимым по условиям работы механизмов перегрузки.

Наряду с этим ожидаемым эффектом при эксплуатации активной зоны проявился еще один фактор, ограничивающий кампанию ТВС, – разгерметизация твэлов, в основном, в ЗБО, до уровня, близкого к предельно допустимому значению 0,1%.

Комплекс послереакторных исследований, проведенных на БАЭС, в ФЭИ, НИИАР и ИРМ при непосредственном участии ВНИИНМ [2], показал, что основная причина разгерметизации твэлов – выраженная внутритвэльная коррозия, связанная с высокими тепловыми нагрузками на твэлы и режимом перегрузок ТВС ЗБО с их перестановками, приводящими к скачкообразному росту тепловых нагрузок. При этом наблюдалось осевое перемещение топлива в твэлах, локальные разрывы и уплотнения топливного столба, обусловленные этим локальные перегревы.

ПЕРВАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Основной задачей, решаемой при выполнении работ по первой модернизации активной зоны, было устранение причин, приводящих к разгерметизации твэлов. Основные технические решения, принятые для этой цели, заключались в увеличении высоты активной зоны с 0,75 до 1 м с целью снижения тепловых нагрузок на твэлы и в исключении перестановок ТВС в ЗБО. Кроме того, для обеспечения стабильной геометрии топливного столба был уменьшен диаметр центрального отверстия в топливных таблетках.

С целью обеспечения приемлемого выравнивания распределения энерговыделения при отказе от перестановок ТВС в ЗБО было принято решение об использо-

вании в активной зоне трех видов обогащения топлива путем введения зоны среднего обогащения (ЗСО). Конкретные значения обогащений в ЗМО, ЗСО, ЗБО выбирались с учетом целого ряда факторов и в конечном счете были приняты из ряда стандартных обогащений: 17, 21 и 26%. Границы зон обогащения были выбраны в том числе с учетом принципа обеспечения повышенной тепловой нагрузки в периферийных зонах с целью достижения более глубокого выгорания топлива в условиях работы твэлов при меньшей скорости радиационного повреждения конструкционных материалов. На рисунке 2 представлена картограмма модернизированной активной зоны с тремя зонами обогащения.

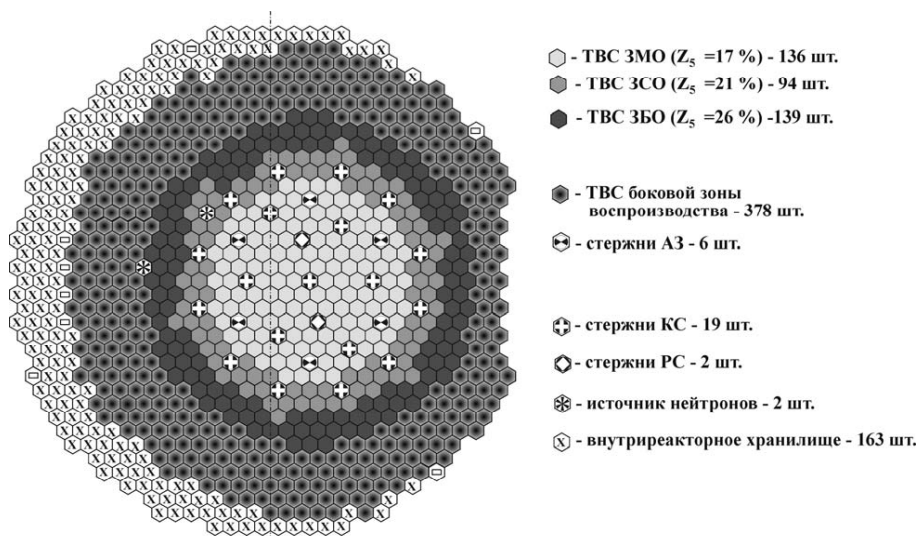


Рис. 2. Картограмма модернизированной активной зоны реактора БН-600

Наряду с описанным выше принципиальным изменением компоновки активной зоны с целью снижения и выравнивания параметров эксплуатации твэлов при модернизации удалось применить усовершенствованные более радиационно стойкие конструкционные материалы. Это оказалось возможным благодаря большой работе, развернутой в этом направлении во ВНИИНМ и активно поддерживаемой всеми участниками работ по направлению БН.

К моменту перехода на модернизированную активную зону было освоено изготовление чехлов ТВС и оболочек твэлов из сталей аустенитного класса в холоднотекучем состоянии, что обеспечило их меньшее радиационное набухание и деградацию механических свойств в процессе облучения. В итоге удалось увеличить допустимое значение повреждающей дозы с 44 до 54 сна и увеличить топлива. Благодаря этому и снижению энергонапряженности активной зоны при увеличении ее высоты (до ~ 430 МВт/м³) были значительно увеличены интервал работы реактора между перегрузками (со 100 до 165 эфф.сут) и кампания ТВС (с 200–300 до 465 эфф.сут). Изменение основных характеристик активной зоны при ее первой модернизации приведено в табл. 2.

Переход на активную зону первой модернизации был осуществлен в 1987 г. Опыт эксплуатации реактора с модернизированной активной зоной показал высокую эффективность принятых новых решений: снизились усилия извлечения ТВС при перегрузках, случаи разгерметизации твэлов стали единичными, увеличился коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) реактора, сократилось потребление ТВС.

Таблица 2

Изменение основных характеристик активной зоны при переходе от активной зоны первого типа к модернизированной зоне

Параметр	Тип активной зоны	
	01	01М
Период эксплуатации, гг. (№ МКК)	1980–1987 (1–17)	1987–1993 (18–28)
Обогащение топлива (по U-235), % ЗМО / ЗСО / ЗБО	21 / – / 33	17 / 21 / 26
Количество ТВС в активной зоне, шт. ЗМО / ЗСО / ЗБО	217 / – / 144	136 / 94 / 139
Материал чехла ТВС	08Х16Н11М3 МТО	08Х16Н11М3Т х.д.
Материал оболочек твэлов	06Х16Н15М3Б (ЭИ-847)	ЭИ-847 х.д.
Высота ВТЭ/топливного столба/НТЭ, см	40 / 75 / 40	30 / 100 / 38
Максимальная линейная тепловая нагрузка на твэл, кВт/м	54,0	47,2
Кампания ТВС ЗМО/ЗСО/ЗБО (периферия ЗБО), эфф.сут	200 / – / 300	330 / 330 / 330 (495)
Интервал между перегрузками, эфф.сут	100	165
Выгорание топлива максимальное в ЗМО/ЗСО/ЗБО, % т.а. среднее по активной зоне, МВт·сут/кг	5,1 / – / 7,2 42,5	6,5 / 6,9 / 8,3 44,5
Максимальная повреждающая доза ТВС ЗМО/ЗСО/ЗБО, сна	40 / – / 44	53 / 51 / 54

ВТОРАЯ И ТРЕТЬЯ МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Благодаря последовательной работе по разработке новых конструкционных материалов и их совершенствованию в последующий период эксплуатации реактора БН-600 были проведены еще две модернизации активной зоны. В 1993 г. был осуществлен переход на активную зону второй модернизации, в которой были применены новые конструкционные материалы как для чехлов ТВС, так и для оболочки твэла: соответственно стали 12Х12М1БФР (ЭП-450) и 06Х16Н15М2Г2ФР х.д. (ЧС-68 х.д.). Допустимое значение повреждающей дозы было увеличено с 54 до 75 сна, что позволило в 1,5 раза увеличить кампанию ТВС до 480 эфф.сут. С учетом этого в проекте активной зоны второй модернизации была предусмотрена трехкратная перегрузка ТВС вместо двухкратной (для основной части активной зоны) в активной зоне первой модернизации. Для обеспечения необходимого запаса реактивности высота активной зоны была увеличена с 1 до 1,03 м.

Особенностью реализованной в 2004 г. активной зоны третьей модернизации является максимальное использование выявленных запасов в активной зоне второй модернизации. В части конструкционных материалов с учетом проведенных работ по их совершенствованию и выявлению предельных параметров эксплуата-

ции [3, 4] был допущен переход на максимальную повреждающую дозу 82 сна, что соответствовало возможности увеличения кампании ТВС до 560 эфф.сут. Что касается нейтроннофизических характеристик активной зоны, то здесь было выявлено наличие определенного избыточного запаса реактивности реактора, что позволило перейти на более глубокое выгорание топлива без изменения загрузки топлива в твэлы.

При разработке проекта активной зоны третьей модернизации была решена задача по оптимизации схемы перегрузок реактора с учетом желательных периодов для проведения перегрузок и планово-предупредительных ремонтов: весной и осенью каждого года. Соответственно, в проекте активной зоны третьей модернизации был предусмотрен переход на четырехкратную схему перегрузок ТВС с двумя перегрузками в год при разной длительности зимнего и летнего интервалов между перегрузками: 160 и 120 эфф.сут соответственно.

Прошедший после 2004 г. период эксплуатации реактора подтвердил основные проектные характеристики активной зоны третьей и возможность ритмичной работы реактора в новом режиме перегрузок.

В таблице 3 представлено изменение основных характеристик активной зоны при переходе от ее второй модернизации к третьей (современная зона 01М2) и приведены основные параметры эксплуатации активной зоны.

Таблица 3

Изменение основных характеристик активной зоны при переходе от второй модернизации к третьей

Параметр	Тип активной зоны	
	01М1	01М2
Период эксплуатации, гг. (№ МКК)	1993–2004 (29–46)	с 2004 (с 47)
Обогащение топлива (по U-235),% ЗМО / ЗСО / ЗБО	17 / 21 / 26	
Количество ТВС в активной зоне, шт.ЗМО / ЗСО / ЗБО	136 / 94 / 139	
Материал чехла ТВС	12Х12М1БФР (ЭП-450)	
Материал оболочек твэлов	06Х16Н15М2Г2ТФР х.д. (ЧС-68 х.д.)	
Высота ВТЭ/топливного столба/НТЭ, см	30 / 103 / 35	
Максимальная линейная тепловая нагрузка на твэл, кВт/м	47,1	47,5
Кампания ТВС ЗМО/ЗСО/ЗБО (периферия ЗБО), эфф.сут	480 / 480 / 480 (640)	560 / 560 / 560 (720)
Интервал между перегрузками, эфф.сут	160	120 / 160
Выгорание топлива максимальное в ЗМО/ЗСО/ЗБО,% т.а. среднее по активной зоне, МВт-сут/кг	9,0 / 9,5 / 10,0 60	10,0 / 10,5 / 11,2 70
Максимальная повреждающая доза ТВС ЗМО/ЗСО/ЗБО, сна	75 / 72 / 69	82 / 79 / 75

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕННОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Основным результатом выполненной модернизации активной зоны реактора БН-600 явилось обеспечение более благоприятных условий эксплуатации твэлов, что позволило существенно повысить их надежность. Одновременно было обеспечено увеличение длительности кампании ТВС и интервала между перегрузками.

Использование более радиационно стойких сталей позволило перейти на повышенную повреждающую дозу и увеличить выгорание топлива с 42,5 до 70 МВт·сут/кг (максимальное локальное выгорание от 7,2 до 11,2% т.а.).

На рисунке 3 показано, как по мере модернизации активной зоны реактора БН-600 обеспечивалось выравнивание нагруженности твэлов разного типа, когда повышенное выгорание топлива компенсируется пониженной радиационной нагрузкой на оболочку твэла.

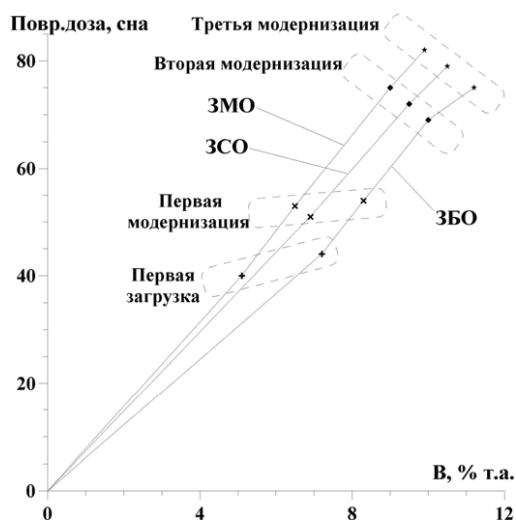


Рис. 3. Соотношение условий работы твэлов разного типа в активной зоне реактора БН-600

В таблице 4 показано улучшение технико-экономических показателей работы реактора БН-600 в ходе модернизаций активной зоны.

Таблица 4

Улучшение технико-экономических показателей работы реактора БН-600 за счет модернизации активной зоны

Показатель	Тип активной зоны (период эксплуатации, гг.)			
	01 (1980–1987)	01М (1987–1993)	01М1 (1993–2004)	01М2 (с 2004)
Потребление ТВС, 1/год	423 + 11 КР	392	215	181
Потребление U-235, т/год	2,7	1,72	1,32	1,11
Длительность интервала между перегрузками, эфф.сут	100	165	160	120/ 160
КИУМ	~ 0,7	~ 0,75	~ 0,74*	~ 0,77

* Снижение КИУМ связано с ремонтом ЦПК в 1998 г.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Опыт исследования облученных шестигранных чехлов ТВС и гильз, выполненных на основе шестигранных труб из стали ЭП-450, стержней СУЗ, материаловедческих образцов реактора БН-600, а также оболочек твэлов реактора БОР-60 (максимальная доза 108 – 163 сна) [5 – 7] показал, что работоспособность чехлов ТВС не является ограничивающим фактором обеспечения выгорания топлива более 15% т.а.

Основным фактором, ограничивающим ресурс ТВС, является радиационное повреждение материала оболочки твэла, проявляющееся в ее радиационном распухании, и коррелирующая с распуханием деградация механических свойств.

Для повышения работоспособности твэлов на ОАО «МСЗ» было внедрено производство труб для оболочек твэлов реактора БН-600 с применением операции диффузионного отжига, оптимизированных режимов рекристаллизационного отжига и метода короткооправочного волочения на конечном размере [8].

Последовательное внедрение этих мер позволяет рассчитывать на увеличение допустимой повреждающей дозы для стали ЧС-68 х.д. до ~ 95сна [9].

С учетом этого начаты работы по подготовке к переводу активной зоны реактора БН-600 на увеличенную кампанию ТВС. В 2007 г. было выпущено обоснование по увеличению проектной длительности 53 МКК со 120 до 145 эфф.сут и, соответственно, кампании основного массива ТВС с 560 до 585 эфф.сут в течение 53–56 МК. Фактически за это время эксплуатации реактора была достигнута повышенная кампания 572 эфф.сут. В 2009 г. было выполнено обоснование по продлению 57–60 МК до 585 эфф.сут и достижению максимальных значений повреждающей дозы 86 сна и выгорания топлива 11,6% т.а. Планируется продолжить опытную эксплуатацию активной зоны с увеличенной кампанией в 2010–2011 гг., а затем осуществить очередную плановую модернизацию активной зоны.

К настоящему времени ОКБМ совместно с ВНИИНМ проработано два варианта модернизации активной зоны: с сохранением режима четырехкратной перегрузки при дальнейшем увеличении кампании ТВС до 592 эфф.сут (повреждающая доза ~ 87 сна) и при переходе на режим двукратной перегрузки с годовым интервалом при увеличении кампании ТВС до 612 эфф.сут (повреждающая доза ~ 90 сна).

Более существенное увеличение выгорания планируется достичь путем перехода на новый конструкционный материал для оболочек твэлов – аустенитную сталь 07X16N19M2Г2БТР-ИД (ЭК-164) в холоднодеформированном состоянии [10].

В 2009 г. в реакторе БН-600 были успешно завершены испытания опытных ТВС с комбинированным пучком твэлов, включающим в себя штатные твэлы с оболочкой из стали ЧС 68 х.д. и опытные твэлы с оболочками из стали ЭК-164 х.д. После-реакторные исследования подтвердили существенно лучшую радиационную стойкость стали ЭК164 х.д.: при достигнутой дозе 77 сна среднее увеличение диаметра твэлов с оболочками из стали ЭК-164 х.д. оказалось примерно в 1,5 раза ниже, чем для твэлов с оболочками из стали ЧС-68 х.д. С учетом этого можно рассчитывать на возможность достижения ресурса ТВС, соответствующего величине максимальной повреждающей дозы ~ 110 сна, т.е. максимальному выгоранию ~ 14,5% т.а. Для достижения такого выгорания топлива активная зона должна быть переведена в режим пятикратной перегрузки с полугодовым интервалом работы. При этом потребуются некоторое повышение обогащения топлива или использование другого способа увеличения загрузки делящегося материала. Прогнозируемые характеристики активной зоны с использованием оболочечной стали ЭК16-4 х.д. приведены в табл. 5.

В настоящее время с использованием экспериментальных ТВС проводятся работы по обоснованию работоспособности стали ЭК-164 до 110 сна. Планируется завершение комплекса этих работ в 2014 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Активная зона реактора БН-600 разрабатывалась в условиях ограниченной информации по радиационной стойкости конструкционных материалов, и ее проект был нацелен на демонстрацию возможности достижения высоких воспроизводящих характеристик реакторов типа БН.

Таблица 5

Прогнозируемые характеристики активной зоны с использованием оболочечной стали ЭК164 х.д.

Параметр	Значение
Обогащение топлива (по U-235),% ЗМО / ЗСО / ЗБО	17,6 / 21,9 / 27,1
Количество ТВС в активной зоне, шт. ЗМО / ЗСО / ЗБО	136 / 94 / 67 (72)
Материал чехла ТВС	ЭП-450
Материал оболочек твэлов	ЭК-164 х.д.
Высота ВТЭ/топливного столба/НТЭ, см	30 / 103 / 35
Максимальная линейная тепловая нагрузка на твэл, кВт/м	48,9
Кампания ТВС ЗМО/ЗСО/ЗБО (периферия ЗБО), эфф. сут	730 / 730 / 730 (840)
Интервал между перегрузками, эфф. сут	110/170
Выгорание топлива максимальное в ЗМО/ЗСО/ЗБО,% т.а. среднее по активной зоне, МВт-сут/кг	12,7 / 13,7 / 14,4 89
Максимальная повреждающая доза ТВС ЗМО/ЗСО/ЗБО, сна	106 / 101 / 96

2. При эксплуатации активной зоны реактора БН-600 первого типа было установлено, что основным фактором, ограничивающим выгорание топлива, является радиационное повреждение конструкционных материалов оболочек твэлов и чехлов.

Были выявлены проблемы обеспечения надежности твэлов в условиях высоконапряженной активной зоны.

3. В результате выполненных трех модернизаций активной зоны среднее выгорание топлива было увеличено с 42,5 до 70 МВт-сут/кг при повышении максимального локального значения с 7,2 до 11,2% т.а. Одновременно была повышена надежность твэлов, и благодаря увеличению длительности интервала между перегрузками улучшен КИУМ реактора. Кроме того, обеспечен оптимальный для условий БАЭС режим перегрузок реактора с двумя перегрузками в год при разной длительности летнего и зимнего интервалов между ними.

4. Увеличение выгорания топлива обеспечено, в основном, благодаря переходу на новые конструкционные материалы: ЭП-450 для чехлов ТВС, ЧС-68 х.д. для оболочек твэлов. При использовании этих материалов с учетом продолжающейся работы по оптимизации состава и структуры стали ЧС-68 х.д. имеется определенный потенциал для дальнейшего увеличения среднего выгорания топлива до ~ 75 МВт-сут/кг при максимальном локальном значении ~ 12% т.а.

5. Дальнейшее увеличение среднего выгорания топлива до ~ 90 МВт-сут/кг при максимальном локальном значении ~ 14,5% т.а. связывается с применением нового материала для оболочек твэлов – стали ЭК-164 х.д., по которой уже получены благоприятные результаты.

Литература

1. Решетников Ф.Г., Митенков Ф.М., Троянов М.Ф. Состояние и перспективы разработки радиационно-стойких конструкционных материалов для активных зон быстрых реакторов в СССР/Труды Международной конференции по радиационному материаловедению (Алушта, 1990г.). – Т.1. – С. 15-23.
2. Бибилашвили Ю.К. Основные факторы, определяющие работоспособность твэлов/В кн. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов/Под ред. Ф.Г. Решетникова. Т.1. – М.: Энергоиздат, 1995. – С. 277-289.
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Романев В.В. и др. Совершенствование применяемых

и разработка новых конструкционных материалов для оболочек твэлов реакторов БН/Доклад на Отраслевой конференции «Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов и ТВС энергетических реакторов» (Электросталь, 5-7 апреля 1994 г.).

4. *Целищев А.В., Ватулин А.В.* Конструкционные стали для активной зоны реакторов на быстрых нейтронах//МиТОМ. – 2004. – № 11. – С. 13-19.

5. *Аверин С.А., Козлов А.В., Медведева Е.А.* Физико-механические свойства нержавеющей стали ЭП-450 после высокодозного облучения в реакторе БН-600 повреждающей дозой 108 сна/Сб. науч. трудов «Исследования конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов». – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – С. 160-167.

6. *Цыканов В.А., Голованов В.Н., Маершин А.А., Смирнов В.П., Шамардин В.К., Повстянко А.В., Федосеев А.Е.* Влияние высокодозного облучения на структуру и свойства стали ЭП-450 и опыт ее использования в качестве материала оболочек твэлов реакторов БН-350 и БОР-60/Сб. тезисов докладов конференции «Ядерные энергетические технологии с реакторами на быстрых нейтронах» (г. Обнинск 9-10 декабря 2003 г.). – Обнинск, 2003. – С. 22.

7. *Карпенко А.И., Козманов Е.А., Огородов А.Н., Ошканов Н.Н.* Эксплуатационные свойства элементов реактора БН-600, изготовленных из стали ЭП-450//ВАНТ. – 2005. – Вып. 1 (64). – С. 281-285.

8. *Баканов М.В., Крюков О.В., Буданов Ю.П. и др.* Оптимизация структурного состояния материала оболочечных труб из стали ЧС-68 в холоднодеформированном состоянии//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 1. – С. 139-145.

9. *Целищев А.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П., Иолтуховский А.Г., Митрофанова Н.М., Леонтьева-Смирнова М.В., Шкабура И.А., Забудько Л.М., Козлов А.В., Мальцев В.В., Повстянко А.В.* Разработка конструкционной стали для твэлов и ТВС быстрых натриевых реакторов//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – № 4. – С. 217-221.

10. *Митрофанова Н.М., Боголепов М.Г., Бибилашвили Ю.К. и др.* Разработка новой радиационно стойкой стали аустенитного класса ЭК164, комплексно-легированной титаном, ниобием и ванадием, для оболочек твэлов реакторов типа БН//ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1997. – Вып. 1 (65), 2(66). – С. 128-143.

Поступила 14.10.2010

УДК 621.039.5

Software Development in Support of the Fast Reactor Operation \E.V. Seleznyov, A.A. Belov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 17 titles.

Since 1987 up to now at the Beloyarsk NPP the software package named Hephaestus has been used to justify the safety of the fuel loadings. The ways to further develop the operational software have been presented in the Federal target programme named «New generation nuclear energy technologies...».

УДК 621.039.54

Experience and Perspectives of the BN-600 Reactor Core Upgrade \B.A. Vasilev, N.G. Kuzavkov, O.V. Mishin, A.A. Radionychyeva, M.R. Farakshin, Yu.K. Bibilashvili, Yu.A. Ivanov, A.V. Medvedev, N.M. Mitrofanova, A.V. Tselishchev, L.M. Zabudko, V.I. Matveev, Yu.S. Khomyakov, V.A. Chyorny; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 5 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

The results of three modifications of the BN-600 reactor core are presented. The measures taken to increase the burnup and extend the period between refuellings are reviewed. The prospective measures on further improvement of the operational characteristics of the core are proposed.

УДК 621.039.543.4: 621.039.543.6

Structure of the Pelletized Oxide Fuel and its Corrosive Action on the BN-600 Reactor Fuel Cladding \E.A. Kinev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 5 titles.

The behavior of the structural materials of three modifications of the BN-600 reactor core is presented. The change in the condition of the structural steel with various burnup values is shown. The properties of the cladding steel of various types are compared.

УДК 621.039.53

Main Results of Operation of the Structural Materials in the BN-600 Reactor Cores \M.V. Bakanov, V.V. Maltsev, N.N. Oshkanov, V.V. Chuev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 10 pages, 4 tables, 6 illustrations. – References, 7 titles.

The main results of research into structural materials of the test and standard fuel sub-assemblies as achieved stage by stage as they are introduced for the increase of the fuel burnup in the BN-600 reactor cores are reviewed.

УДК 621.039.54

Main Results of Inspection of the Serviceability of the Fuel Pins Clad with the New Generation Austenitic Steels \M.V. Bakanov, V.V. Maltsev, N.N. Oshkanov, V.V. Chuev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 7 titles.

The methodology of the post-irradiation inspection of the serviceability of the fuel pins as carried out on the basis of the experience accumulated from the mass primary post-irradiation examination of the condition of the spent BN-600 reactor fuel pins is presented.

УДК 669.14.018.8: 548.4: 621.039.531

Radiation Flaws in Austenitic Steels Induced by Neutron Irradiation and their Effect on the Physical and Mechanical Properties \A.V. Kozlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 15 pages, 3 tables, 13 illustrations. – References, 16 titles.

Research into the radiation flaws developing in austenitic steels during neutron irradiation in the wide range of temperatures and neutron exposure doses has allowed their evolution during cryogenic, low- and intermediate temperature irradiation to be depicted from the united positions.