

кладки РБМК-1000 в процессе эксплуатации. — В сб.: 10-й межотраслевой сем. «Прочность и надежность оборудования». Звенигород, 17—20 октября 2017 г. М., АО «НИКИЭТ», 2017, с. 114—122.

4. Штромбах Я.И., Платонов П.А., Чугунов О.К. и др. Работоспособность графита на завершающем этапе эксплуатации РБМК. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 5, с. 276—280.

УДК 621.039.4

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ РБМК-1000 И РАЗВИТИЕ РЕМОНТНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

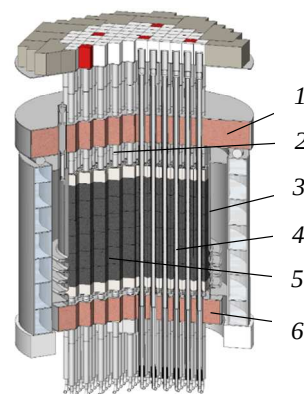
Балдин В.Д., Бирюков А.Н., Каплиенко А.В., Михальченко А.П., Слободчиков А.В.

(АО «НИКИЭТ», г. Москва)

e-mail: spch71@nikiet.ru

Реакторная установка РБМК является конструкцией, ресурс которой определяется нейтронно-физическими, теплогидравлическими, прочностными, материаловедческими и геометрическими параметрами, ограничивающими пределы эксплуатации отдельных составляющих. В зависимости от того, является данный конструктивный узел заменяемым, ремонтируемым или незаменяемым, достижение предельного состояния может влиять на ресурс установки в целом. Большая часть оборудования и трубопроводов, находящихся вне шахты реактора, являются ремонтируемыми или заменяемыми [1]. Поэтому ресурс или срок службы установки, в основном, определяется ресурсом конструкций, находящихся внутри реакторного пространства и работающих в наиболее жестких условиях нейтронного облучения и высокой температуры (рис. 1). В настоящее время 11 РБМК отработали уже около 430 реакторо-лет из 495 запланированных (табл. 1). В процессе их создания и эксплуатации происходила эволюция конструкции реакторной установки, а также подхода к определе-

нию ее ресурса. Это было обусловлено имевшими место отказами, старением материалов и ужесточением требований к безопасности АЭС. Диагностика, ремонт и замена компонентов происходили по мере возникновения конкретных задач и базировались на достигнутом уровне развития науки и техники.



Р и с. 1. Реакторное пространство: 1 — верхняя металлоконструкция; 2 — телескопическое соединение трактов; 3 — кожух реактора; 4 — технологический канал или канал системы управления и защиты; 5 — графитовая кладка; 6 — нижняя опорная металлоконструкция

Т а б л и ц а 1. Срок эксплуатации энергоблоков с РБМК

АЭС	Энергоблок	Дата пуска	Срок окончания эксплуатации	Предполагаемые годы завершения эксплуатации без производства электроэнергии [2]
Ленинградская	1	12.1973	12.2018	2023—2025
	2	07.1975	07.2020	2025—2027
	3	12.1979	12.2024	2029—2031
	4	02.1981	02.2026	2031—2033
Курская	1	12.1976	12.2021	2026—2028
	2	01.1979	01.2024	2029—2031
	3	10.1983	10.2028	2033—2035
	4	12.1985	12.2030	2035—2037
Смоленская	1	12.1982	12.2027	2032—2034
	2	05.1985	05.2030	2035—2037
	3	01.1990	01.2035	2040—2042

С начала 1970-х гг. и по настоящее время в области диагностики и ремонта РБМК пройден путь от отдельных видеокамер и глубинных сварочных автоматов до дистанционно управляемых систем и робототехнических комплексов, обеспечивающих широкомасштабные ремонтные работы. Наиболее интенсивно это оборудование внедрялось в период дополнительного (после 30 лет) срока эксплуатации энергоблоков в связи с ускорением деградации графита как конструкционного материала. С конца 2018 г., времени окончательного останова первого энергоблока Ленинградской АЭС, начался этап подготовки к выводу из эксплуатации всей серии энергоблоков с РБМК. Предстоят этапы эксплуатации энергоблоков без выработки электроэнергии, после окончания выгрузки ТВС — дезактивации и демонтажа конструкций. Очевидно, что от уровня внедрения в этот процесс робототехники будут во многом зависеть безопасность, эффективность и сроки реализации всех этапов вывода энергоблоков из эксплуатации.

Настоящая статья посвящена анализу управления ресурсом РБМК, использования в нем робототехники и новым задачам, которые ставит наступающий период вывода из эксплуатации.

Проектирование РБМК и начальная эксплуатация. Решение о начале строительства энергоблоков с РБМК принималось на основе опыта создания и эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов, что обусловило аналогичный подход к их ресурсу. Изначально срок службы устанавливался несколько лет, по мере его истечения и проявления эффектов старения или при отказах оборудования реактор обследовался, при необходимости выполнялись ремонтные работы и принималось решение о продолжении эксплуатации.

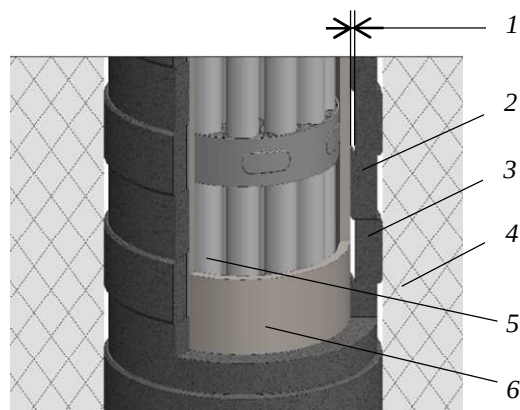
В проекте РБМК срок службы и ресурсные характеристики не определены, поскольку опыт эксплуатации промышленных реакторов еще не позволял это сделать. Доступ в реакторное пространство отсутствовал, поэтому графитовая кладка предполагалась неремонтируемой, предусматривалась только единичная замена технологических каналов. Для замены в АО «НИКИМТ-Атомстрой» были созданы специальные ремонтно-диагностические комплексы, в частности, управляемые из центрального зала реактора автоматы для резки (Л1550.004), сварки

(установка СА-378) и гамма-контроля (установка «Дрозд») шва тракт—канал, работающие внутри верхнего тракта на глубине около 4 м. Некоторые отказы, например, течи каналов дали импульс для начала создания комплексной системы регламентного контроля узлов активной зоны.

Первый вариант регламента эксплуатационного контроля технологических каналов, каналов системы управления и защиты (СУЗ) и графитовой кладки, разработанный в НИКИЭТе в 1984 г., включал ультразвуковой контроль сплошности металла каналов установкой СК-06 разработки НИКИМТ и измерение диаметра каналов и отверстий в графитовых колоннах устройствами, разработанными в НИКИЭТе, на Ленинградской АЭС и в ИАЭ им. И.В. Курчатова. Они позволяли измерять и контролировать во время планового ремонта небольшое число ячеек (до 10—15).

Первым проявлением старения материала конструкций реактора, потребовавшего широкомасштабных ремонтных работ, стало исчерпание зазора технологический канал—графитовый блок в результате радиационно-термической ползучести циркониевого сплава и усадки графита, зафиксированное в 1986 г. на Ленинградской АЭС (рис. 2) [3].

Немного позже анализ периодических измерений высоты графитовых колонн и размера телескопического соединения трактов показал, что из-за радиационной усадки графита этот узел требует ремонта, который стал выполняться при восстановлении зазора технологический канал—графитовая кладка. Для этого были со-



Р и с. 2. Зазор технологический канал—графитовый блок: 1 — зазор технологический канал—графитовый блок; 2, 3 — внутреннее и внешнее кольцо соответственно; 4 — графитовый блок; 5 — ТВС; 6 — циркониевая труба

зданы новые устройства для измерения диаметра канала и отверстий в графитовых блоках, а также зацепления в узле телескопического соединения трактов. Зацепление восстанавливалось специальной оснасткой изнутри ячейки путем установки металлических сегментов на верхние графитовые блоки. Возможность полной потери зацепления в 2008—2010 гг. потребовала существенно откорректировать подход к контролю этого узла. Внедрение в процедуру контроля диагностических робототехнических комплексов, измеряющих геометрию элементов непосредственно в реакторном пространстве, позволило довести объем контроля до 100% и кардинально изменить ситуацию с диагностикой узлов верхней части реакторного пространства (рис. 3).

На основе опыта управления ресурсом элементов конструкции реакторной установки в 1993 г. была выпущена новая редакция регламента эксплуатационного контроля состояния технологических каналов, каналов системы управления и защиты и графитовой кладки. В ней впервые были сформулированы критерии предельного состояния конструкций и основные требования к средствам диагностики.

Назначенный срок службы РБМК и его продление. С учетом восстановления зазоров технологический канал—графитовая кладка был сделан предварительный вывод о том, что реактор сможет проработать до 35—40 лет [3]. В соответствии с нормами [4] назначенный срок эксплуатации энергоблоков с РБМК был принят равным 30 годам. В 2003 г. для первого энергоблока Ленинградской АЭС этот срок должен был закончиться. Уже в 2001 г. начались работы

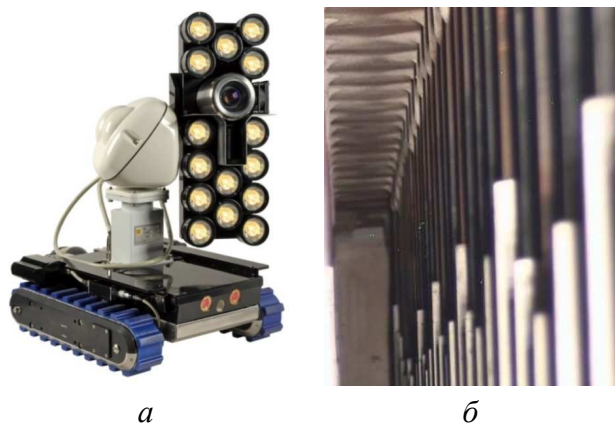
по обоснованию и продлению срока эксплуатации реакторной установки. К этому времени большинство промышленных реакторов отработали по 31—39 годам, поэтому в качестве целевого показателя для энергоблоков с РБМК был выбран срок службы 45 лет.

В рамках обоснования дополнительного срока эксплуатации энергоблоков первых очередей Ленинградской и Курской АЭС и продления срока службы были обследованы реакторные установки, что позволило определить приоритетные механизмы старения материалов, проявляющиеся после 30 лет эксплуатации, и конкретизировать параметры состояния конструкций активной зоны, которые могут определить ресурс реакторной установки.

Периодический 1 раз в 4 года регламентный контроль всех параметров, за исключением зазора графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ», уже был обеспечен диагностическим оборудованием, имевшимся на всех АЭС с РБМК (табл. 2). Объем регламентных измерений составлял до 50 на каналах и до 11 ячеек на графитовых колоннах.

Было подтверждено, что ресурс реакторной установки определяется состоянием графитовой кладки. И хотя все предпосылки для достижения 45-летнего срока службы были, именно неопределенность с прогнозом в части начала и развития растрескивания графитовых блоков и изменения состояния кладки в целом привела к необходимости выполнять каждые последующие 4—5 лет ее дополнительное обследование и уточнение остаточного ресурса.

Дополнительный срок эксплуатации энергоблоков. За пределами назначенного срока эксплуатации было выявлено увеличенное искривление ячеек реактора вследствие растрескивания графитовых блоков под действием радиационно-термических напряжений. Искривление ячеек могло достигнуть предельно допустимого размера и привести к необходимости останова реакторов. Для РБМК было принято неординарное решение — уменьшать искривление ячеек путем резки графитовых блоков. Такое решение стало возможным благодаря выполненным АО «НИКИЭТ» и НИЦ «Курчатовский институт» исследованиям и оптимизации предельно допустимых значений основных параметров конструкций реактора, определяющих его ресурс (см. табл. 2) [5].

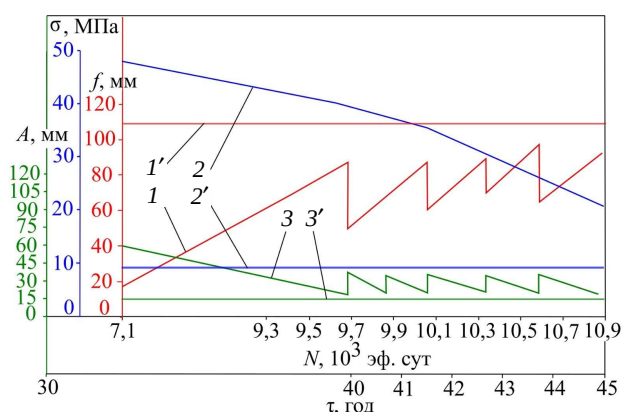


Р и с. 3. Робототехнический комплекс ТДК-ТСТ (а) и узел телескопического соединения трактов изнутри реакторного пространства (б)

Таблица 2. Оптимизация критериев предельного состояния технологического канала и графитовой кладки в период дополнительного срока эксплуатации энергоблоков

Элемент	Критерий	Введение нового критерия и/или изменение предельно допустимого значения	Возможность восстановления	Использование запаса до предельно допустимого значения
Графитовая кладка	Прочность графита	Введен вместо критического флюенса	Нет	Да
	Температура графита	Не изменен	»	»
	Несущая способность графитового блока	Введен вместо целостности графитового блока	»	»
	Зацепление в узле телескопического соединения трактов	Не изменен	Да	Нет
	Зазор графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ»	Введен с установлением предельно допустимого значения	»	»
	Диаметр	Изменено предельно допустимое значение	»	»
Технологический канал	Прогиб	То же	»	»
	Необратимое удлинение	»	»	»

На рис. 4 на примере первого энергоблока Ленинградской АЭС показан характер изменения параметров графитовой кладки в период дополнительного срока эксплуатации с учетом ремонтно-восстановительных работ. Расчетные и экспериментальные исследования позволили уточнить предельно допустимые определяющие ресурс реакторной установки параметры (табл. 3). Начиная с 2012 г., ремонтно-восстановительные работы стали выполняться на большинстве энергоблоков РБМК [5]. На основании опыта восстановительных работ на Ленинградской и Курской АЭС были определены объемы контроля и диагностики элементов реакторной установки, позволяющие определить ресурсные



Р и с. 4. Характер изменения определяющих параметров состояния графитовой кладки в период дополнительного срока эксплуатации: 1, 1' — максимальная и предельно допустимая стрела прогиба; 2, 2' — максимальная и предельно допустимая прочность графита на сжатие; 3, 3' — минимальное и предельно допустимое зацепление в узле телескопического соединения трактов

характеристики реактора и планировать как объем ремонтных работ, так и эксплуатацию энергоблоков. Как видно из табл. 4, объем контроля существенно возрос, при этом сократилась его периодичность. Так, до начала формоизменения каналов контроль выполнялся 1 раз в 4 года, затем ежегодно.

За 8 лет со времени первого успешного восстановления ресурсных характеристик было выполнено 24 ремонта на семи энергоблоках РБМК, направленных на безопасную эксплуатацию в условиях ускоренного формоизменения.

Необходимость реализации возросшего объема контроля, а также пересмотр эксплуатационных критериев стали причиной появления новых роботизированных систем, позволивших существенно увеличить производительность выполняемых работ как по контролю, так и по ремонту [6]. Указанные в табл. 5 робототехнические комплексы были сконструированы для передвижения в реакторном пространстве и позволили в условиях ионизирующего излучения контролировать, а также восстанавливать зацепления в узле телескопического соединения трактов с помощью установки хомутов на тракт технологического канала (рис. 5). Данная работа послужила основой для дальнейшего создания систем восстановления зазора графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ» (рис. 6, 7).

Созданная технология управления ресурсом элементов реакторных установок и соответствующая робототехника находятся в постоянном

Таблица 3. Основные параметры, определяющие ресурс технологических каналов и графитовой кладки в период дополнительного срока эксплуатации энергоблока, и их предельно допустимые значения

Конструкция	Механизм старения	Контролируемый параметр	Предельно допустимые значения
Графитовая кладка	Растрескивание графитовых блоков под действием радиационно-термических напряжений и раскрытие трещин	Стрела прогиба канала	Не более 100—110 мм*
	Уменьшение высоты колонны в результате радиационно-термической усадки графита	Зазор графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ»	Более 0 мм
	Деградация графита в результате накопления радиационных дефектов	Размер телескопического соединения трактов	Не менее 15—30 мм*
Технологический канал	Диаметральная ползучесть циркониевого сплава	Предел прочности на сжатие	Не менее 9 МПа
	Осевая ползучесть циркониевого сплава	Внутренний диаметр	Не более 84 мм
		Необратимое удлинение канала	Не более 30—60 мм*

*В зависимости от энергоблока РБМК.

Таблица 4. Основной объем контроля реакторных конструкций

Контроль	Период эксплуатации	
	1993—2009 гг.	2010—2020 гг.
Измерение внутреннего диаметра технологических каналов, ед.	50	Более 50
Измерение осевого удлинения технологических каналов, ед.	20	До 100%
Ультразвуковой контроль сплошности металла технологических каналов	30—50	30
Измерение искривления каналов, ед.	50	До 240
Визуально-измерительный контроль внутренней поверхности графитовых блоков колонн, ед.	11	До 300
Измерение диаметра отверстия графитовых колонн, ед.	11	Более 30
Измерение размера телескопического соединения трактов	11	До 100%
Измерение зазора графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ»	—	До 100%

развитии (табл. 6). В настоящее время создаются устройства выявления скоплений гидридов циркония в каналах системы управления и защиты, а также системы контроля стрелы прогиба при работе реактора на мощности.

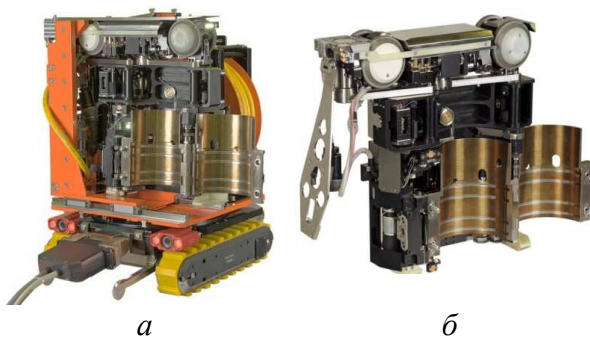
Оптимизация запасов до предельного состояния элементов РБМК и развития робототехники стала залогом положительного управления ресурсом реакторных установок в период дополнительного срока эксплуатации. Таким образом, робототехника позволила сделать ранее необслуживаемое реакторное пространство обслуживаемым, графитовую кладку ремонтнопригодной, а также существенно повысить эффективность диагностических и ремонтных работ, выполняемых при восстановлении ресурсных характеристик. В свою очередь, это способствовало возникновению и развитию направления робототехники, что позволило не только на принципиально новом уровне решить задачи, связанные с управлением ресурсом, но и до-

биться значимого экономического эффекта. Восстановление зацепления в узле телескопического соединения трактов без замены каналов в 7,5 раза дешевле, чем при замене. Продолжение эксплуатации РБМК при восстановлении ресурсных характеристик позволит накопить в 2014—2035 гг. инвестиционный ресурс ~600 млрд руб., что в 2 раза больше, чем без реализации.

Вывод из эксплуатации реакторных установок. Концепцией подготовки и вывода из эксплуатации блоков атомных станций установлена стратегия немедленного демонтажа [2]. Ее реализация невозможна без полной взаимосвязи проектных работ по реактору с разработкой и внедрением робототехнических комплексов для демонтажа конструкций, их сортировки, дезактивации, компактирования, упаковки и транспортировки к месту захоронения. Инженерно-радиационные исследования и контроль наиболее труднодоступных с точки зрения наве-

Таблица 5. Основные устройства и робототехника для контроля и ремонта каналов и графитовой кладки [6]

Назначение	Модель	Разработчик	Зона работ
Измерение стрелы прогиба: технологический канал ТВС Контроль размера «К» (осевое удлинение канала)	ИСТК-5М СИПИ-М ИКС-49 ИСПК-9 РКМ-16	Устройства для выполнения контроля	
		ООО «Пролог»	Технологический канал
		АО «Диаконт»	
		ООО «Пролог»	ТВС, технологический канал
		»	Технологический канал—сильфон
		»	
Измерение телескопического соединения трактов (осевой усадки графитовых колонн) Контроль зазора между графитовой кладкой и металлоконструкциями схемы «КЖ»	МР-18 ТДК-ТСТ-М МР-18КЖ СК-Э-М	Робототехнические комплексы	
		ООО «Пролог»	Реакторное пространство, телескопическое соединение трактов
		АО «Диаконт»	
		ООО «Пролог»	Реакторное пространство, зазор между графитовой кладкой и металлоконструкциями схемы «КЖ»
Удаление графита на ячейках отражателя	РТК-74 РТК-КЖ	ООО «Пролог» АО «Диаконт»	То же
Восстановление телескопического соединения трактов: сегменты	УВТСТ-43	ООО «Пролог»	Графитовая колонна, тракт технологического канала
хомуты	РТК-72 РТК-ТСТ	» АО «Диаконт»	Реакторное пространство, тракт технологического канала
Контроль размера «К» (осевое удлинение канала)	СИРК	»	Технологический канал—сильфон



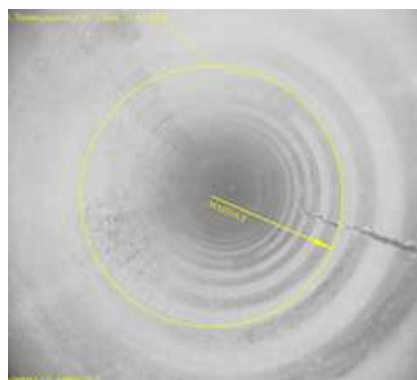
Р и с. 5. Робототехнический комплекс РТК-ТСТ для восстановления телескопического зацепления трактов: а — робот-доставщик хомутов; б — робот-установщик хомутов



Р и с. 6. Робототехнический комплекс РТК-74 для восстановления зазора графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ» внутри реакторного пространства

денной активности и физической затесненности мест возможны только с применением робототехники.

Следует отметить, что немедленный демонтаж такого масштабного объекта, как РБМК-1000, не имеет аналогов, многие решения по демонтажу элементов активной зоны находятся в стадии концептуальной проработки. Наиболее сложными для демонтажа и последующей дезактивации, паспортизации и компактированию являются крупногабаритные и высокоактивные элементы активной зоны (барабаны-



Р и с. 7. Контроль отверстия графитовой колонны дистанционно управляемым диагностическим комплексом КТК-ГК

Таблица 6. Эволюция ремонтно-диагностических систем реакторных установок РБМК

Изменения	1973—1980 гг.	1980—1990 гг.	1990—2000 гг.	2000—2010 гг.	2010—2020 гг.
Контролируемые параметры	—	Диаметр каналов и графитовых колонн	Диаметр каналов и графитовых колонн, необратимое удлинение каналов, размер телескопического соединения трактов, наличие дефектов циркониевой трубы канала и переходников	—	Стрела прогиба каналов, зазор графитовая кладка—металлоконструкции схемы «КЖ»
Ремонтные технологии	Замена каналов, расточка графитовых колонн	—	Установка сегментов в узле телескопического соединения трактов	Установка хомутов на узел телескопического соединения трактов	Резка графитовых блоков, резка углов графитовых блоков ячеек охлаждения бокового отражателя
Оборудование	Сварочные автоматы	Дистанционные механические диаметры, штангенциркули	Системы ультразвукового контроля, дистанционно управляемые манипуляторы	Роботизированные комплексы контроля и ремонта	Робототехнические системы для выполнения ремонтных и контрольных операций в реакторном пространстве

сепараторы, металлоконструкции, графитовая кладка). Имеющийся задел по созданию роботизированных систем и оснастки позволит осуществить немедленный демонтаж до уровня радиационно безопасного состояния объекта.

Разработанные оборудование и оснастка с учетом соответствующей доработки могут найти применение при подготовке и выводе из эксплуатации АЭС с РБМК-1000. Диагностическое оборудование при дооснащении можно применять для радиационного обследования энергоблока, включая такие сложные для исследования элементы, как внутренние поверхности сепараторов пара или металлоконструкций. Для демонтажных работ высокоактивного оборудования может быть рассмотрено устройство лазерной резки.

Заключение. Проекты РБМК разрабатывались в 1960—1970 гг. на стадии становления и начала развития ядерной энергетики. Но уже тогда в них были заложены передовые методы автоматизации дистанционно реализуемых ремонтных процессов. Появление и развитие подходов к управлению ресурсом РБМК происходило как ответ на задачи, возникавшие при их эксплуатации.

В период дополнительного срока эксплуатации энергоблоков РБМК научно обоснованная оптимизация использования и восстановления критических параметров, выполненная специалистами АО «НИКИЭТ» и НИЦ «Курчатовский институт», стала методической основой управления ее ресурсом. Одним из важнейших ин-

струментов ее реализации для достижения 45-летнего срока эксплуатации энергоблоков стало создание и внедрение на основе технических заданий предприятия главного конструктора реактора специалистами АО «Диаконт» и ООО «Пролог» систем диагностики и ремонта реактора с использованием дистанционно управляемых устройств и робототехники. Именно синергия процессов управления ресурсом реактора и развития робототехники стала залогом успеха в достижении поставленной цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канальный ядерный реактор РБМК. Изд. 2-е, испр. и доп. Под. общей ред. Ю.М. Черкашова. М., ФГУП «НИКИЭТ», 2006.
2. Концепция подготовки и вывода из эксплуатации блоков атомных станций АО «Концерн Росэнергоатом» КЦП 1.2.2.04.1240—2017. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 2017.
3. Адамов Е.О., Балдин В.Д., Родченков Б.С. и др. Замена технологических каналов на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС. — Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 3, с. 221—227.
4. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции НП-017—2000. М., Госатомнадзор России, 2000.
5. Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Слободчиков А.В. и др. Технология восстановления ресурсных характеристик РБМК: разработка, реализация и опыт внедрения. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 5, с. 245—251.
6. Федосовский М.Е., Дунаев В.И., Слободчиков А.В. и др. Разработка технологического оборудования для восстановления ресурсных характеристик РБМК. — Там же, с. 260—266.