

2. Пугачев В.С., Синицын И.Н. Теория стохастических систем. М.: Логос, 2004.
3. Ерыкалов А.Н., Захаров А.С., Коноплев К.А. и др. Конструкция активной зоны и отражателя реактора ПИК: Препринт ПИЯФ-2472, 2002.

4. Ковальчук М.В., Аксенов В.Л., Коноплев К.А. и др. Физический пуск реактора ПИК: Препринт ПИЯФ-2924, 2013.

Поступила в Редакцию 06.04.15

УДК 621.039

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ КАК ОДНА ИЗ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ АЭС С ВВЭР-1000

*Потапов В.В., Логинов А.М., Ильин В.А., Коломиец В.Г. (АО «ВНИИАЭС», г. Москва),
Пустовгар А.П. (МГСУ, г. Москва)*

В настоящее время продление срока эксплуатации АЭС рассматривается в контексте определения ресурсных характеристик элементов энергоблоков АЭС, что позволяет достичь максимальной эффективности их эксплуатации.

Основными задачами определения ресурсных характеристик защитной оболочки — одного из основных элементов энергоблока АЭС являются повышение эффективности и обеспечение длительной и безопасной эксплуатации на протяжении жизненного цикла АЭС. Для объективной оценки технического состояния и остаточного ресурса защитной оболочки необходим системный подход к установлению срока службы железобетонной предварительно напряженной защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1000, базирующийся на сопоставлении требований норм безопасности в ядерной энергетике к объемно-планировочным и конструктивным решениям с результатом контроля, инструментального и визуального обследования и поверочных расчетов. Практика продления срока эксплуатации АЭС позволила формализовать подход и разработать поэтапную методику оценки технического состояния и остаточного ресурса защитной оболочки.

Основные этапы оценки технического состояния и срока службы защитной оболочки выполняются в соответствии с нормативными документами и включают сбор и анализ технической документации, расчетный анализ состояния конструкций защитной оболочки, разработку программы обследования и рабочей программы контроля, проверку работоспособности установленных систем диагностики (мониторинга), обследование защитной оболочки, пове-

рочные расчеты, заключение о техническом состоянии и сроке службы, разработанное на основании результатов обследования, оформление решения о возможности, сроках и условиях дальнейшей эксплуатации или выводе из эксплуатации, а также оформление программы определения ресурсных характеристик защитной оболочки энергоблока АЭС.

Сбор и анализ исходных данных о состоянии защитной оболочки проводятся для расчетного анализа. Наиболее важными являются проектно-конструкторская, исполнительная, эксплуатационная документация, результаты контрольно-профилактических работ системы предварительного напряжения защитной оболочки, а также оценки работоспособности струнных измерительных преобразователей автоматизированной системы контроля напряженно-деформированного состояния. Расчетный анализ состояния конструкций выполняется для определения необходимых зон обследования защитной оболочки. Программа обследования и рабочая программа контроля защитной оболочки согласовываются с генеральным проектировщиком, подразделениями АЭС, привлекаемыми к работам специализированными организациями, головной материаловедческой организацией и утверждаются руководством эксплуатирующей организации.

Целями оценки технического состояния защитной оболочки являются выявление степени физического износа, причин, обуславливающих состояние защитной оболочки, фактической эксплуатационной пригодности защитной оболочки и разработка мероприятий по обеспечению эксплуатационных качеств.



Р и с. 1. Лазерное сканирование защитной оболочки

Инструментальное обследование включает определение прочности методами упругого отскока, ультразвукового, отрыва со скалыванием, водонепроницаемости и морозостойкости бетона, характеристик защитного слоя бетона, степени коррозии арматуры, геометрических размеров и раскрытия трещин при их наличии, геометрических размеров элементов строительных конструкций, прогибов, отклонений, дефектов и повреждений методом лазерного сканирования, измерение твердости и оценка механических свойств металла конструкций, выполнение ультразвуковой толщинометрии облицовки защитной оболочки.

Метод лазерного сканирования — технология, позволяющая создать цифровую трехмерную модель объекта, представив его набором точек с пространственными координатами. Он основан на использовании лазерных сканеров, измеряющих координаты точек поверхности объекта со скоростью, примерно равной нескольким десяткам тысяч точек в 1/с. Полученный набор точек впоследствии может быть представлен в виде трехмерной модели объекта, плоского чертежа, набора сечений, поверхности.

Цель применения данного метода — сбор данных о геометрических размерах элементов защитной оболочки для уточнения трехмерной расчетной модели, используемой в расчетном обосновании состояния защитной оболочки АЭС (рис. 1).

Одна из основных задач лазерного сканирования — опре-

деление геометрии листа облицовки на участках между анкерующими элементами. Данная информация позволяет оценить степень герметичности облицовки, в том числе при наличии аварийных параметров в зоне локализации аварий, а также подтвердить отсутствие поперечного расслоения стенки оболочки.

Для комплексной оценки состояния бетона лабораторные исследования включают в себя, помимо стандартных испытаний прочности образцов-цилиндров на сжатие, определение плотности бетонных образцов с учетом влажности на момент испытаний, водонепроницаемости, морозостойкости, карбонизации бетона, химического и фазового состава растворной части бетона и вида крупного заполнителя (рис. 2, 3).

Целью этапа выполнения поверочных расчетов является расчетное обоснование эксплуатационной пригодности защитной оболочки энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 на дополнительный срок эксплуатации. Поверочные расчеты выполняются по первой (прочность, устойчивость) и второй (раскрытие трещин, деформации, перемещения) группам предельных состоя-



Р и с. 2. Отбор образцов для лабораторных исследований



Р и с. 3. Лабораторные исследования

ний. Они проводятся на основе федеральных законов и нормативных документов на текущие и прогнозируемые к концу срока эксплуатации свойства материалов.

Прочностные расчеты защитной оболочки проводятся на следующие нагрузки и воздействия: нагрузки от собственной массы строительных конструкций и оборудования (шлюзы, проходки, полярный кран, трубопроводы), эксплуатационные температурные нагрузки, расчетное избыточное давление при протекании проектной аварии с уровнем 0,39 МПа, распор стальной герметизирующей облицовки, обусловленный ее прогревом, а также ползучестью и усадкой бетона, прогрев при протекании проектной аварии, минимально требуемое обжатие защитной оболочки по предварительному напряжению, сейсмическое воздействие при максимальном расчетном и проектном землетрясении.

Наиболее критичным с точки зрения прочности строительных конструкций является режим проектной аварии в сочетании с максимальным расчетным землетрясением при минимальном уровне обжатия. Это расчетное сочетание рассматривается для конструкции, входящей в состав герметичного ограждения зоны локализации аварии, в соответствии с НП-031—01. Для нижнего узла оболочки рассматривается сочетание нагрузки от максимального уровня обжатия и максимально расчетного землетрясения, вызывающего наибольший изгибающий момент.

После утверждения заключения о техническом состоянии, сроке службы и решения о возможности, сроках и условиях дальнейшей эксплуатации или выводе из эксплуатации разрабатывается и оформляется программа определения ресурсных характеристик защитной оболочки энергоблока АЭС с учетом факторов старения,

включающая в том числе регламент контроля технического состояния.

Апробация методики оценки технического состояния и остаточного ресурса защитной оболочки. Рассматриваемый подход был использован при обследовании, оценке технического состояния и обосновании срока службы

защитной оболочки 1-го энергоблока Калининской АЭС и реализуется на 2-м, 3-м энергоблоках Балаковской и 2-м Калининской АЭС. Анализ технического состояния строительных конструкций защитной оболочки показал, что:

полученный неразрушающими методами контроля и лабораторными испытаниями класс бетона конструкций в целом соответствует проектному. На отдельных участках прочность оказалась заниженной. За длительный срок эксплуатации в этих местах не появилось каких-либо дефектов, например, трещин, свидетельствующих о недостаточной несущей способности конструкций, поэтому технические мероприятия по их усилению не требуются;

бетон по водонепроницаемости, морозостойкости соответствует проектному;

рабочая арматура соответствует проектному классу. Толщина защитного слоя в целом соответствует, в большинстве случаев выше требуемой проектом и строительными нормами;

глубина карбонизации бетона значительно меньше толщины защитного слоя бетона конструкций;

коррозионных повреждений стальной арматуры не обнаружено;

металлоконструкции облицовки защитной оболочки находятся в работоспособном состоянии: повреждений и деформаций, влияющих на снижение несущей способности, не наблюдается;

анкерные зоны бетона находятся в удовлетворительном состоянии;

подтверждена работоспособность системы предварительного напряжения защитной оболочки.

В рамках разработки программы определения ресурсных характеристик защитной обо-

лочки 1-го энергоблока Калининской, 2-го и 3-го энергоблоков Балаковской АЭС запланирована поэтапная замена арматурных канатов СПН-1000 на более современные и надежные СПЗО-М. Выполненными работами обоснован 30-летний дополнительный срок эксплуатации защитных оболочек этих энергоблоков.

На основании опыта продления срока эксплуатации защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000 совместно с АО «Атомэнергoproject» была пересмотрена Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса защитных оболочек атомных станций с ВВЭР-1000, введенная в действие в 2013 г.

Поступила в Редакцию 26.03.15

УДК 621.039.536

ОЦЕНКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕЖТВЭЛЬНЫХ ТРАКТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ С ЧЕТЫРЕХЛОПАСТНЫМИ ТВЭЛАМИ

*Гарусов Е.А. (ПИЯФ им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский ин-т»,
Гатчина, Ленинградская обл.)*

В настоящее время в ядерных реакторах разного назначения используются твэлы четырехлопастного профиля с закрученными по длине лопастями. Подобные твэлы установлены в энергодвигательных системах космических аппаратов, в активных зонах реакторов ледоколов и газоохлаждаемых реакторах [1—5]. Ведутся исследовательские работы в целях перевода на твэлы аналогичного профиля энергетических реакторов BWR и PWR [6—8]. Твэлы крестообразного поперечного сечения установлены также в ТВС мощных исследовательских реакторов: функционирующего СМ и строящегося ПИК [9, 10].

Теплотехнические преимущества реакторов с подобными твэлами по отношению к использующим твэлы кругового поперечного сечения даже при наличии на поверхностях последних интенсифицирующих теплоотдачу устройств обеспечиваются относительным увеличением удельной поверхности теплосъема S/V (S — полная поверхность теплосъема, V — объем активной зоны), а также интенсификацией теплоотвода благодаря закрутке потока теплоносителя в межтвэльных зазорах и его частичному перемешиванию в соседних трактах [7—10]. Наличие закрученных лопастей обеспечивает также самодистанционирование твэлов на протяжении всей высоты активной зоны, ограничивает амплитуды их вибраций в потоке теплоносителя, препятствует опасному температурному

прогибу. В тесных решетках твэлов данная форма их поперечного сечения исключает возможность перекрытия тракта теплоносителя в межтвэльных зазорах в случае распухания твэлов или их местной поломки [3, 11]. Подобная форма исключает также необходимость установки дистанционирующих устройств, ведущей к росту затрат мощности на прокачку теплоносителя и паразитного поглощения нейтронов. Упомянутые преимущества подобных твэлов особенно важны при их эксплуатации в активных зонах исследовательских реакторов, работающих на топливе высокого обогащения и имеющих значительный объемный коэффициент неравномерности энерговыделения $K_V \sim 3—5$ [9, 10].

К негативным сторонам использования данных твэлов следует отнести более высокие градиенты и асимметрию температурных полей в их поперечных сечениях, которые приводят к росту неравномерности по периметру сечений снимаемых тепловых потоков, вызывающей локальное повышение температуры оболочек [12—15]. Это снижает коэффициент запаса до начала возможного кипения теплоносителя, а также до возникновения кризиса теплоотдачи [9, 16]. Данные негативные моменты еще более значимы в силу высоких коэффициентов K_V [17]. Использование ТВС с подобными твэлами вызывает также относительный рост перепада давления теплоносителя на активной зоне, сле-