

Таким образом, можно констатировать, что за последнее десятилетие создан и успешно внедряется комплекс управляющих систем и оборудования для реакторных установок, которые отвечают современным требованиям безопасности и обладают характеристиками, не уступающими аналогичным лучшим отечественным и зарубежным системам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Канальный** ядерный энергетический реактор РБМК. Под общ. ред. Ю.М.Черкашова. М., НИКИЭТ, 2006.
2. **Лысиков Б.В., Кондратьев В.В., Михайлов М.Н. и др.** Опыт создания и развития управляющих систем и средств для реакторных установок разработки НИКИЭТ. – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2005, вып.10, с. 5.

УДК 621.039.514

УПРАВЛЕНИЕ СРОКОМ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ДЕЙСТВУЮЩИХ И СООРУЖАЕМЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК*Европин С.В., Стрелков Б.П. (НИКИЭТ им. Н.А.Доллежалея)*

Методология управления сроком службы элементов ядерных установок была сформирована на рубеже третьего тысячелетия [1–4]. В последние годы специалистами НИКИЭТа (или при их непосредственном участии) была подготовлена серия руководящих документов [5–12] эксплуатирующей организации, внедрение которых не только обеспечило подтверждении сроков службы основных элементов энергоблоков АЭС и обоснование возможности продления безопасной эксплуатации энергоблоков первого поколения, но и позволило выработать рекомендации по оптимизации контроля состояния металла оборудования и трубопроводов.

В основу методологии управления ресурсными характеристиками положены принципы, предусматривающие:

выявление и изучение процессов старения элементов энергоблоков;

внедрение мер по смягчению эффектов старения;

выполнение периодического эксплуатационного контроля состояния металла, оценку технического состояния элементов и срока их дальнейшей безопасной эксплуатации.

В настоящей статье описано практическое применение методологии управления ресурсными характеристиками элементов АЭС для изготовленных из аустенитной коррозионно-стойкой стали марки 08X18H10T трубопроводов Ду300 КМПЦ РБМК-1000.

Согласно действующим нормативным документам контроль состояния металла сварных соединений трубопроводов должен проводиться каждые 6 лет эксплуатации. В 1996 г. в нескольких сварных соединениях трубопроводов Ду300 с номинальной толщиной стенки 15 мм были зафиксированы плоскостные несплошности типа трещин. Дефектные сварные соединения были отремонтированы, однако, учитывая наличие 11 действующих энергоблоков с РБМК и число сварных соединений на каждом из них, были развернуты полномасштабные работы по внедрению технологии управления ресурсными характеристиками применительно к трубопроводам Ду300.

Основными работами явились [13]:

анализ проектных расчетных прочностных характеристик сварных соединений и учет эксплуатационных реальных параметров нагружения;

анализ механизма зарождения дефектов и оценка скорости прогрессирования деградации металла (роста дефектов);

разработка руководящих документов по безопасной эксплуатации трубопроводов и формирование требований к диагностированию состояния металла;

разработка методик, средств, организационных мероприятий по качественному (достоверному) диагностированию состояния металла;

внедрение указанных организационных и технических мероприятий на АЭС;

разработка и внедрение мероприятий по снижению или исключению деградации металла.

Исследованиями было установлено, что причиной трещинообразования следует признать возможные отклонения от технологии выполнения сварных соединений многопроходной сваркой, которые привели к повышенному тепловложению и повреждению (сенсibilизации) металла пришовной зоны. При этом механизм зарождения и развития дефектов был идентифицирован как коррозионное растрескивание под напряжением. Непосредственными причинами образования и развития трещин явились остаточные напряжения растяжения выше предела текучести стали 08Х18Н10Т в корневой части сварного соединения, наличие сенсibilизированного металла в пришовной зоне и коррозионно-активная среда теплоносителя с повышенным содержанием кислорода по отношению к реакторам с водой под давлением.

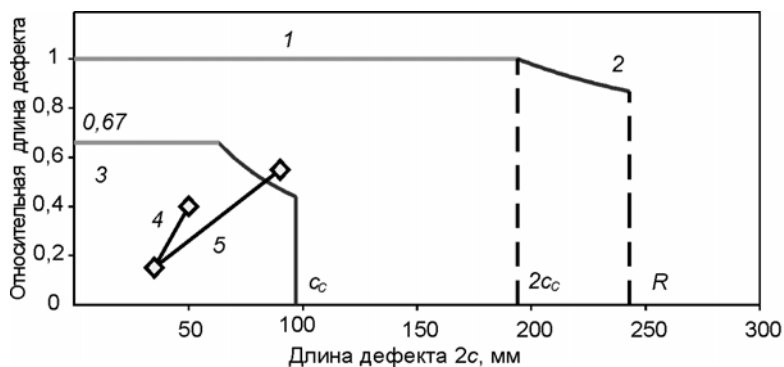
Базовым подходом для обеспечения и управления безопасной эксплуатацией трубопроводов Ду300 стала концепция «исключение разрушения». Здесь следует дать пояснения, что в отличие от уже классической концепции безопасности «течь перед разрушением», которая распространяется только на трубопроводы и рост трещин при циклическом нагружении, рассматриваемая концепция является более общей, а именно предусматривает любые другие механизмы развития дефектов и может применяться и к корпусным деталям. Вместе с тем обе концепции исходят из единого принципа – останов реакторной установки до перехода надежно фиксируемой течи в элементе в состояние, соответствующее разрушению поперечного сечения элемента, и тем самым исключение возможности механического воздействия этого элемента на соседние конструкции.

Внедрение указанных концепций не является основанием для отказа от систем безопасности реакторной установки, рассчитанных на потерю теплоносителя при разрушении поперечного сечения трубопровода, но может рассматри-

ваться в качестве основания для увеличения периода эксплуатационного контроля состояния металла. На действующих энергоблоках объемы контроля, как правило, не пересматривают, так как простой энергоблока после образования безопасной протечки теплоносителя ведет к значительным экономическим потерям и срыву поставок продукции потребителю. Именно это обстоятельство вынуждает эксплуатирующую организацию даже после внедрения любой концепции безопасности руководствоваться критериями экономического риска и сохранять нормативные объемы и периодичность эксплуатационного контроля состояния металла элементов.

Для элементов Ду300 РБМК концепция «исключение разрушения» внедряется на базе повышения эффективности эксплуатационного контроля металла сварных соединений, контроля протечек и ограничения размеров допускаемых в эксплуатации несквозных дефектов. Их определяют путем построения диаграмм конструкционной целостности, которые включают в себя критическую диаграмму разрушения сечения трубопровода в зоне сварного соединения и диаграмму допускаемых состояний (рис. 1).

Данный подход позволил сформулировать требования к неразрушающему контролю сварных соединений и системе контроля течей теплоносителя для сквозных дефектов, а также совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» разработать нормы допускаемых размеров несквозных дефектов [9]. Практическое применение норм возможно, если для определения геометрических размеров (глубины и длины) плоскостных несплошностей окружной ориен-



Р и с. 1. Типичная диаграмма конструкционной целостности: 1 — течь перед разрушением; 2 — разрушение; 3 — безопасная область; 4 — допускаемое развитие дефекта; 5 — недопустимое развитие дефекта

тации в околошовной зоне сварных соединений применяются методики и средства дефектоскопического контроля, аттестованные в качестве измерительных. При этом их погрешность согласно [9] не должна выходить за пределы ± 2 мм по глубине несплошности и ± 10 мм по длине. Вторым и базовым требованием к проводимому контролю является демонстрация высокой вероятности выявления дефектов [14]. Допустимыми на срок 1, 2 и 4 года считаются несплошности, размеры которых с учетом их развития не превышают установленных нормами значений для соответствующего межконтрольного периода.

Указанные требования к неразрушающему контролю потребовали разработки методик и средств ультразвукового контроля, способных измерять геометрические размеры дефектов с заданной точностью. Применяемые в настоящее время методики и средства верифицированы на реальных дефектах сварных соединений Ду300, что позволило провести их аттестацию в качестве средств измерения размеров дефектов.

На рис. 2 видно, что достигнутая вероятность выявления дефектов для диапазона размеров дефектов, регламентируемых руководящим документом РД ЭО 0489-03, высокая для данного типа металла и конструктивных

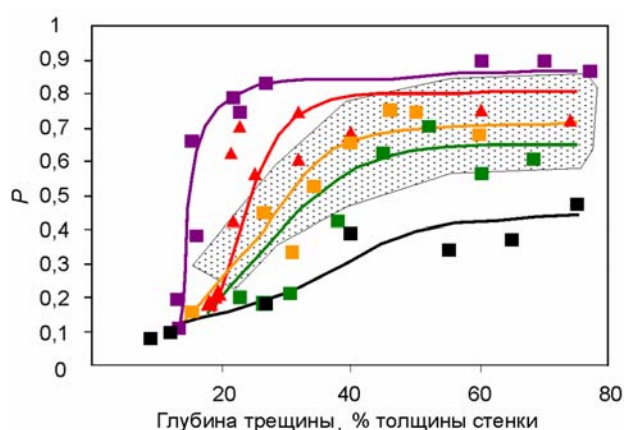


Рис. 2. Динамика повышения достоверности контроля сварных соединений трубопроводов Ду300: ■ — автоматизированный ультразвуковой контроль с регистрацией, 2005 г. (80 % N_2); ▲ — полуавтоматизированный ультразвуковой контроль, 2004 г. (80 % N_2); ■ — автоматизированный ультразвуковой контроль 1997 г. (25 % N_2); ■ — ручной ультразвуковой контроль, 1997 г. (97 % N_2); ■ — радиографический контроль, 1996 г.

особенностей сварных соединений трубопроводов Ду300.

Для регистрации сквозных дефектов по стыковым соединениям трубопроводов Ду300 согласно концепции «исключение разрушения» [10] необходима система оперативного контроля герметичности. НИКИЭТом была разработана и в настоящее время внедряется на всех АЭС с РБМК автоматизированная система обнаружения течей теплоносителя, отвечающая требованиям действующей нормативной документации, а именно:

использование в системе, по крайней мере, трех независимых подсистем обнаружения течей, основанных на разных методах контроля. При этом радиационный контроль воздушной среды в боксах, где размещены трубопроводы, является обязательным;

обнаружение течи на ранней стадии появления с чувствительностью около 3,8 л/мин (для паровых коммуникаций 19 л/мин) в течение 1 ч;

определение местоположения течи. Рекомендованная погрешность определения ± 2 м;

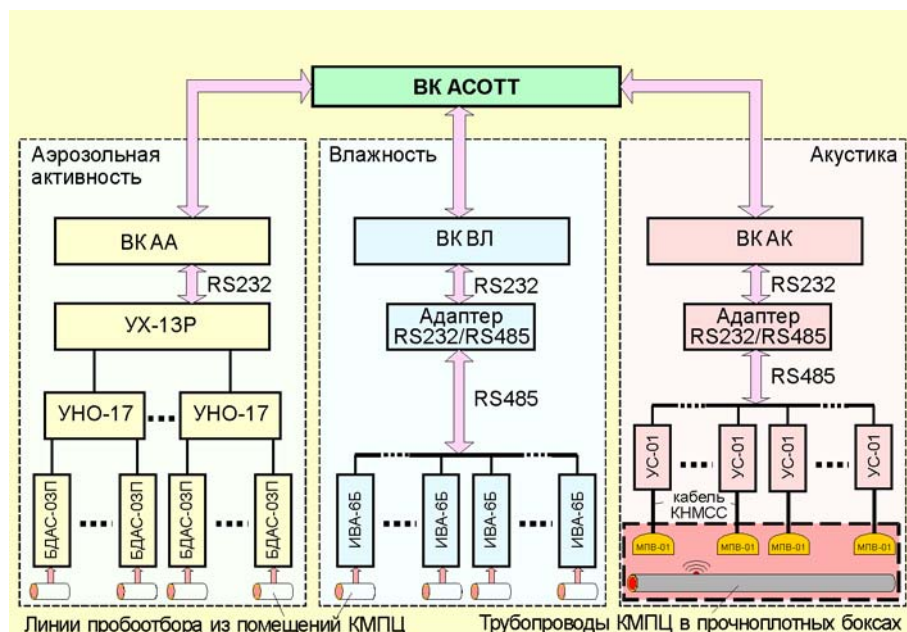
количественная оценка утечки теплоносителя;

выдача аварийного сигнала оперативному персоналу на блочном щите управления при достижении предельной утечки.

Такие же требования к системе обнаружения течей вытекают из анализа зарубежных нормативных документов [15] и международных стандартов (IEC-1250-1994).

Выбранные подсистемы контроля течей автоматизированной системы обнаружения течей теплоносителя приведены на рис. 3. Сочетание и взаимное дополнение методов контроля по данным параметрам явилось оптимальным для удовлетворения предъявленных требований, что и было показано в реальных условиях на Курской АЭС.

Автоматизированная система обнаружения течей теплоносителя в различном объеме внедрена на всех энергоблоках с РБМК. Внедрение началось в 1997 г. с помещений, содержащих наиболее ответственные элементы контура циркуляции теплоносителя. В настоящее время такая система в составе трех подсистем, объединенных центральным вычислительным комплексом, работает на первых двух энергоблоках Курской АЭС, 4-м



Р и с . 3. Структура автоматизированной системы обнаружения течи теплоносителя

Ленинградской и 3-м энергоблоке Смоленской АЭС. На остальных энергоблоках подсистемы различного объема работают автономно.

Как отмечалось, неотъемлемой частью управления ресурсными характеристиками оборудования и трубопроводов является снижение влияния факторов эксплуатации на повреждение элементов ядерных установок и восстановление свойств материалов. Хорошо известен отжиг радиационных повреждений корпусов ВВЭР-440, позволивший продлить срок их эксплуатации. Применительно к сварным соединениям трубопроводов Ду300 РБМК-1000 были разработаны и внедрены следующие меры подавления трещинообразования:

автоматизированная технология выполнения ремонтных сварных соединений;

высокотемпературная термообработка, обеспечивающая снижение сенсбилизации металла и снятие остаточных напряжений;

механическое обжатие сварных соединений, изменяющее знак остаточных напряжений на внутренней поверхности трубопроводов в зоне сварного соединения;

деаэрированный пуск реакторной установки, позволяющий в режиме разогрева не превышать концентрацию кислорода в теплоносителе в стационарном режиме.

Внедрение перечисленных мероприятий и автоматизированной системы обнаружения

течей позволяет поставить вопрос об оптимизации объемов и периодичности контроля сварных соединений Ду300 РБМК-1000.

Сегодня можно констатировать, что выполненные работы дали возможность апробировать технологию управления ресурсными характеристиками эксплуатации трубопроводов Ду300 и накопить положительный опыт ее внедрения. В настоящее время при содействии эксплуатирующей организации данная технология распространяется на все трубопроводы, оборудование и металлоконструкции реакторных установок. Конечным результатом такой работы является не только оптимизация объемов неразрушающего контроля и ремонтных работ, но и повышение безопасности действующих энергоблоков АЭС за счет получения объективной картины технического состояния конструкций.

Для вновь проектируемых или уже сооружаемых энергоблоков целесообразно технологию управления ресурсными характеристиками закладывать в проектную документацию как важный аргумент обеспечения назначаемого срока безопасной эксплуатации до 60 лет. Для сооружаемых энергоблоков следует создавать архив исходного состояния элементов ядерной установки для последующего эффективного применения представленной технологии с минимальными затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко В.А. Некоторые концептуальные вопросы управления сроком службы российских энергоблоков АЭС. — Теплоэнергетика, 2000, № 5, с. 2–8.
2. Бугаенко С.Е., Савченко В.А., Денисов И.Н. и др. Управление сроком службы АЭС. — В сб.: Материалы международной конференции «PLIM + PLEX'99». Мадрид, Испания, 1999: Препринт INSC-01-01. М., МЦЯБ, 2001.
3. Бугаенко С.Е., Аржаев А.И., Европин С.В. и др. Управление сроком службы атомных станций. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 4, с. 255–261.

4. Бугаенко С.Е., Габараев Б.А., Европин С.В. и др. Управление сроком службы атомных станций. Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. Т. IV-25. Машиностроение ядерной техники. М.: Машиностроение, 2005, кн. 2, гл. 8.8, с. 912–929.
5. **Положение** по управлению ресурсными характеристиками элементов энергоблоков АС. РД ЭО 0281-01. М., концерн «Росэнергоатом», 2001.
6. **Руководство** по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации. РД ЭО 0330-01. М., концерн «Росэнергоатом», 2004.
7. **Типовые** требования к порядку разработки технического задания, проведению испытаний и условиям применения средств и методик эксплуатационного неразрушающего контроля на объектах использования атомной энергии. РД ЭО 0487-03. М., концерн «Росэнергоатом», 2003.
8. **Методические** рекомендации по оценке достоверности средств и методик неразрушающего контроля. РД ЭО 0488-03. М., концерн «Росэнергоатом», 2003.
9. **Методика** расчета и нормы допускаемых размеров дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду300 КМПС РБМК. РД ЭО 0489-03. М., концерн «Росэнергоатом», 2003.
10. **Применение** концепции «исключение разрывов» для трубопроводов и коллекторов Ду300 КМПС и СВБ энергоблоков АЭС с РБМК-1000. РД ЭО 0513-03. М., концерн «Росэнергоатом», 2004.
11. **Аттестация** персонала в области неразрушающего и разрушающего контроля оборудования и трубопроводов, элементов и конструкций атомных станций. РД ЭО 0583-2004. М., концерн «Росэнергоатом», 2005.
12. **Руководство** по применению концепций безопасности «течь перед разрушением» к трубопроводам АЭУ. Р-ТПР-01-99. РД 95.10547-99.
13. Петров А.А., Сапрыкин Г.Н., Европин С.В. и др. Обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводов Ду300 АЭС с реакторами РБМК. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2004, вып. 6, с. 30–35.
14. **Унифицированные** методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. ПНАЭ Г-7-014-89. М.: Энергоатомиздат, 1990.
15. **Improvement of In-Service Inspection in Nuclear Power Plants.** IAEA-TECDOC-1400. Vienna: IAEA, July 2004.

УДК 621.039.573

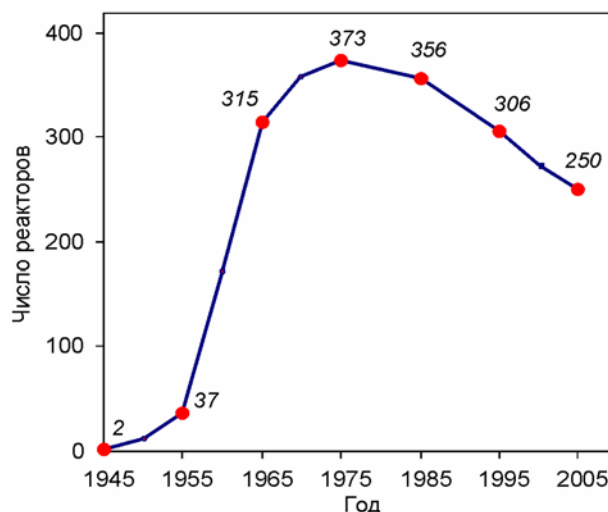
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РЕАКТОРЫ – ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

*Габараев Б.А., Лопаткин А.В., Третьяков И.Т., Хмельщиков В.В.
(НИКИЭТ им. Н.А. Доллежале), Аксенов В.Л. (РНИЦ «Курчатовский ин-т»)*

Исследовательские реакторы прошли в своем развитии этап освоения, характеризующийся стремительным ростом их числа, становления и совершенствования, когда был достигнут исторический максимум эксплуатируемых реакторов, старения и их количественно-качественной оптимизации в соответствии с перспективными задачами [1] (см. рисунок). Как показано в табл. 1, сегодня эксплуатируется около трети созданных за весь период истории исследовательских реакторов.

Наша страна обладает обширным и гармонизированным комплексом исследовательских ядерных установок, в число которых принято включать исследовательские реакторы, критические и подкритические стенды (табл. 2). Текущее состояние исследовательских ядерных установок, которые по-прежнему являются проверенным эффектив-

ным, а часто и незаменимым инструментом для развития ядерной энергетики, фундамен-



Динамика действующих исследовательских реакторов в мире