

УДК 621.039.53

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ ЯЭУ

© 2012 г. **Ф.М. Митенков, М.А. Большухин, А.В. Козин,
Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, В.А. Пахомов, С.Н. Пичков**

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

varanov@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 21.05.2012

На базе современных достижений механики поврежденной среды и механики разрушения разработаны математические модели, алгоритмы и программы для расчета процессов неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в материале опасных зон оборудования и систем ЯЭУ. Разработанные модели позволяют учитывать влияние на скорость процессов накопления повреждений многоосности напряженного состояния, вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций, учитывать нелинейное суммирование повреждений при изменении режимов нагружения. Данные модели наряду с экспериментальными методами исследования технического состояния материала использовались для создания методики оценки выработанного и прогноза остаточного ресурсов оборудования и систем ЯЭУ по заданной истории эксплуатационного нагружения, положенной в основу системы эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР). Рассмотрены технология и основные задачи ЭМР на различных этапах жизненного цикла ЯЭУ: проектирования, изготовления, монтажа, эксплуатации, продления назначенных срока службы и ресурса.

Ключевые слова: конструкционный материал, поврежденность, выработанный и остаточный ресурс, эксплуатационный мониторинг ресурса.

Введение

Современные требования по обеспечению высокого уровня безопасности при увеличении сроков службы оборудования и систем ЯЭУ свыше 30 лет диктуют необходимость решения следующих основных задач:

- управления ресурсом (сроком службы) оборудования и систем, перехода к эксплуатации оборудования и систем по их фактическому техническому состоянию;
- сокращения экономических затрат на проведение регламентных работ по периодическому освидетельствованию технического состояния оборудования и систем путем оптимизации межконтрольных интервалов;
- обоснования продления назначенного срока службы оборудования и систем на следующий временной интервал.

С точки зрения контроля выработанного и остаточного ресурсов конструктивных элементов эксплуатация ЯЭУ имеет ряд существенных особенностей по срав-

нению с другими ответственными инженерными объектами. Эксплуатационные условия, в которых работают оборудование и системы первого контура, характеризуются нестационарными термосиловыми нагрузками, радиационными воздействиями на некоторые конструктивные элементы и воздействиями теплоносителя. Ресурс конструктивных элементов, по существу, определяется ресурсом материала локальных зон с наибольшими темпами накопления повреждений и развития образовавшихся трещин по различным механизмам деградации материала, определяемым условиями эксплуатации ЯЭУ.

Доступ средств неразрушающего контроля (СНК) технического состояния материала к этим зонам в процессе эксплуатации возможен только на стадиях изготовления и монтажа конструктивного элемента или, в отдельных случаях, при продлении назначенного срока службы оборудования и систем. В то же время темпы накопления повреждений материала в этих зонах и развития образовавшихся дефектов в значительной степени зависят от фактической модели эксплуатации ЯЭУ и фактических физико-механических характеристик конструкционных материалов. В связи с этим разработка методов и средств контроля выработанного и прогнозирования остаточного ресурса оборудования и систем ЯЭУ в процессе эксплуатации является сложной научно-технической и организационной проблемой.

На стадии проектирования при обосновании назначенного срока службы ЯЭУ эти проблемы решаются на базе консервативного подхода путем разработки проектной модели эксплуатации, соответствующей максимальным темпам истощения ресурса конструктивных элементов, использования минимальных гарантированных физико-механических характеристик материалов, выбора соответствующих коэффициентов запаса и т.д.

Тем не менее, многие эксплуатационные факторы, существенно влияющие на ресурсные характеристики конструктивных элементов оборудования, на стадии проектирования являются неопределенными и могут быть учтены только путем выбора соответствующих коэффициентов запаса и обоснования с известной долей вероятности безотказной работы оборудования в течение назначенного срока службы ЯЭУ.

Уровни термосилового нагружения конструктивных элементов существенно зависят от скоростей изменения температур и давления теплоносителя (параметров эксплуатационных режимов и их последовательности), фактических физико-механических характеристик конструкционных материалов, конструктивного исполнения элементов оборудования и систем, условий их закрепления и т.д. Эти условия определяют основные механизмы деградации конструкционных материалов оборудования и систем ЯЭУ.

В соответствии с выявленными эксплуатационными факторами, оказывающими влияние на состояние конструкционных материалов, и анализом этих факторов определены основные механизмы деградации материалов в нормальных условиях эксплуатации:

- малоцикловая и многоцикловая усталость;
- развитие усталостных трещин;
- радиационное охрупчивание корпусных сталей в зонах интенсивного нейтронного облучения.

Модель оценки выработанного и остаточного ресурса

В ОКБМ проводятся работы по созданию методов и средств контроля выработанного и прогнозирования остаточного ресурсов конструктивных элементов в процессе эксплуатации ЯЭУ [1], организации комплекса исследований, созданию расчетной и критериальной базы для прогнозирования развития деградационных процессов в опасных зонах оборудования и систем, формированию соответствующих баз данных.

На рис. 1 представлена схема, иллюстрирующая влияние на расчетную оценку выработанного и остаточного ресурсов учета фактической модели эксплуатации (ФМЭ) и физического закона накопления повреждений ω . По вертикальной оси отложена текущая поврежденность ω , соответствующая наработке t (горизонтальная ось). Прямые линии соответствуют линейному закону накопления повреждений $\omega_d = \sum N_i/N_{fi}$, кривая OP – фактическому закону накопления $\omega = V/V_f$, где V – объемная доля дефектов, V_f – критическая объемная доля. Горизонтальная линия AB соответствует критическому значению ω_{fd} с проектными коэффициентами запаса. Линия BC соответствует проектному назначенному ресурсу $T_{наз}$ по проектной модели эксплуатации, которой соответствует расчетное линейное накопление повреждений ω_d по линии OB . Реальная накопленная поврежденность ω соответствует линии OC . Видно, что учет ФМЭ позволяет при более мягкой фактической модели эксплуатации увеличить назначенный ресурс на наработку BD с сохранением проектных коэффициентов запаса. Фактическая поврежденность материала за назначенный ресурс $T_{наз}$ будет для фактической модели эксплуатации меньше расчетной линейной.



Рис. 1. Концепция оценки остаточного ресурса

Теоретическое моделирование изменения начального предельного состояния элементов оборудования и систем ЯЭУ в результате деградационных процессов (кри-

вая EP) и кривая фактических темпов накопления повреждений (кривая OCP) по ФМЭ с коррекцией результатов расчетов неразрушающими методами контроля позволяют установить фактический выработанный ресурс T_b , остаточный ресурс, фактический коэффициент запаса до наступления предельного состояния (точка P на кривой OCP) и обоснованно продлить назначенный срок службы на следующий временной интервал.

Конструктивные элементы оборудования и систем ЯЭУ в процессе долговременной эксплуатации подвергаются нестационарным термомеханическим воздействиям, которые имеют, как правило, нерегулярный характер. В результате многочисленных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что история нестационарного неизотермического нагружения (последовательность и параметры режимов нагружения), циклический характер изменения термосиловых нагрузок существенно влияют на темпы накопления повреждений в конструкционных материалах. Поэтому первостепенное значение в разработанной методологии обоснования прочности и ресурса конструктивных элементов ЯЭУ придается адекватному моделированию процессов неизотермического упругопластического деформирования материалов и накопления термоусталостных повреждений на базе соответствующих математических моделей указанных процессов, учитывающих нелинейный характер накопления и суммирования повреждений (кривая OP на рис. 1) и влияние эксплуатационных условий на предельные состояния материалов (кривая EP на рис. 1).

На базе современных достижений механики разрушения разработаны математические модели, алгоритмы и программные средства для расчета параметров процессов нестационарного неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в материале опасных зон оборудования и систем ЯЭУ по заданной истории термомеханического нагружения, которые позволяют учитывать влияние на скорость процессов накопления повреждений многоосности напряженного состояния, вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций, осуществлять нелинейное суммирование повреждений при изменении режимов нагружения.

Математическое моделирование реальных процессов деградации материала для каждой контролируемой зоны по фактической истории ее нагруженности (малоцикловая, многоцикловая усталость) осуществляется с помощью методов и моделей механики поврежденной среды и механики разрушения.

Мерой текущей поврежденности ω_j контролируемой j -й зоны является отношение текущего объема микродефектов ΔV_j к критическому V_{jf} в материале данной зоны или отношение текущего характерного параметра растущего дефекта (длины трещины) a_j к критическому a_{jf} :

$$\omega_j = \sum \frac{\Delta V_{ji}}{V_{jf}}, \quad \omega_j = \sum \frac{\Delta a_{ji}}{a_{jf}}, \quad (1)$$

где ΔV_{ji} , Δa_{ji} – приращение объемной доли микродефектов или параметра растущей трещины в j -й зоне от i -го режима нагружения.

Для процесса накопления усталостных повреждений модель записывается в виде:

$$\dot{\omega}_j = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta_j) Z_j^\alpha (1 - \omega_j)^{-r} \dot{Z}_j, \quad (2)$$

где α , r – экспериментально определяемые материальные параметры (функции температуры), $f(\beta_j)$ – функция, учитывающая влияние объемности напряженного состояния (вида напряженного состояния) на скорость накопления повреждений, $Z_j = (W_j - W_{cj}) / (W_{jf} - W_{cj})$ – относительная величина энергии, затраченной в j -й зоне на образование дефектности структуры материала в фазе развития поврежденности путем слияния микроскопических трещин, W_j – общая величина энергии, затраченной на образование усталостных повреждений, W_{jf} – критическая величина этой энергии, W_{cj} – величина энергии, соответствующая окончанию первой фазы накопления усталостных повреждений (образование и рост микропор, микротрещин; в пределах этой фазы отсутствует влияние накопленной поврежденности на физико-механические характеристики материала). Величины энергий для данной зоны конструктивного элемента вычисляются путем интегрирования по заданной истории нагружения этой зоны полных эволюционных уравнений механики поврежденной среды, включающих в себя как эволюционные уравнения накопления повреждений (2), так и уравнения процесса упругопластического деформирования материала. Интеграл уравнения (2) можно представить в виде:

$$\omega = 1 - [1 - Y_j^{\alpha+1}]^{1/(r+1)}, \quad (3)$$

где $Y_j = AZ_j$;

$$A = \left\{ \frac{(\alpha + 1) \int_0^Z f(\beta_j) Z_j^\alpha dZ_j}{Z_j^{(\alpha+1)}} \right\}^{1/(\alpha+1)}, \quad (4)$$

здесь A – параметр приведения индивидуальных кривых накопления повреждений к единой обобщенной кривой, Y_j – так называемое «внутреннее время» процесса накопления усталостных повреждений. Соотношения (3), (4) позволяют устанавливать эквивалентность процессов накопления повреждений между собой и их эквивалентность экспериментальным данным для различных видов напряженных состояний и различных историй нагружения.

Такой подход позволяет проводить анализ развития поврежденности в любой зоне конструктивного узла в зависимости от исходного состояния материала и конкретных параметров нагружения этой зоны. Точность прогноза зависит от адекватности применяемых моделей реальному процессу деградации материала и соответствия моделируемого режима нагружения в данной зоне фактическим условиям эксплуатации ЯЭУ. Метод требует периодической коррекции теоретических оценок ресурса материала в контролируемых зонах с помощью средств неразрушающего контроля при ремонтах или продлении назначенных сроков службы.

На рис. 2–5 представлены результаты расчета циклической долговечности цилиндрического образца для одноосного растяжения–сжатия при блочном циклическом растяжении–сжатии с различными амплитудами пластических деформаций Δe_{11}^p в блоках нагружения. Расчет циклической долговечности проводился по программе «Ресурс-НН», реализующей модель накопления усталостных повреждений [1–4].

На рис. 2 показаны кривые накопления усталостных повреждений для регулярного нагружения, построенные с учетом норм расчета из [4] (штриховая линия) и по рассмотренной выше модели: кривая 1 – для амплитуды $\Delta e_{11}^p = 0,002$, кривая 2 – для амплитуды $\Delta e_{11}^p = 0,003$, кривая 3 – для амплитуды $\Delta e_{11}^p = 0,004$. По оси абс-

цисс отложено отношение N_i/N_{fi} , по оси ординат – поврежденность ω . Результаты расчета по [4] и по разработанной модели [1] совпадают. На рис. 3 расчетные кривые приведены в координатах «поврежденность ω – число циклов до образования макротрещины N ».

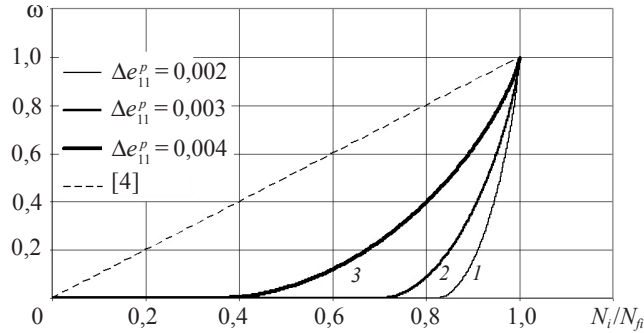


Рис. 2. Кривые накопления повреждений для различных амплитуд деформаций

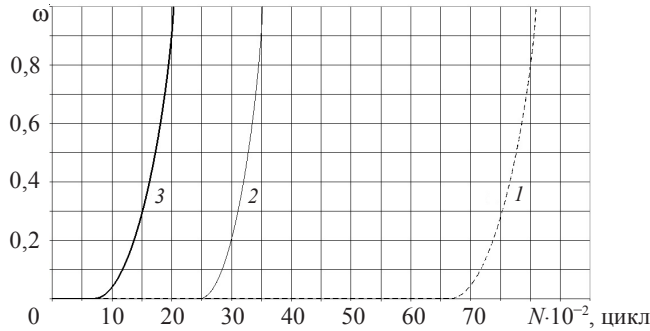


Рис. 3. Кривые накопления повреждений

На рис. 4 приведены результаты расчета усталостной долговечности при блочном нагружении при переходе с большей амплитуды пластических деформаций на меньшую: 0,004 \rightarrow 0,003 \rightarrow 0,002.

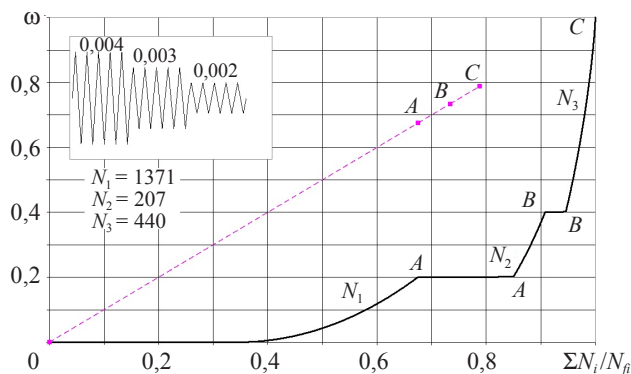


Рис. 4. Кривые накопления повреждений при 3-блочном нагружении

Штриховой линией показан расчет по [4] $\omega = \Sigma N_i/N_{fi}$, сплошной линией – расчет по разработанной модели [1]. Точка A соответствует поврежденности в конце первого блока, точка B – поврежденности в конце второго блока, точка C – повреж-

денности $\omega = 1$ при нелинейном суммировании повреждений по модели [1].

В соответствии с законом линейного суммирования повреждений, согласно [4], $\omega = \sum N_i/N_{fi} = 0,78$, что соответствует результатам экспериментов при блочном нагружении с уменьшением амплитуды деформаций. В этом случае [4] дает погрешность в неконсервативную сторону $\sim 22\%$.

На рис. 5 приведены аналогичные результаты для блочного циклического растяжения–сжатия при переходе с меньшей амплитуды пластических деформаций на большую $0,002 \rightarrow 0,003 \rightarrow 0,004$. При линейном суммировании повреждений $\omega = \sum N_i/N_{fi} = 1,16$. Расчеты по [4] в этом случае дают погрешность в консервативную сторону $\sim 16\%$.

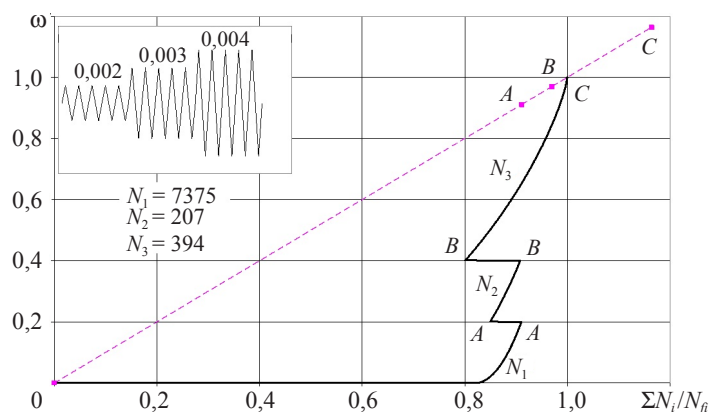


Рис. 5. Кривые накопления повреждений для различных амплитуд деформаций

Система эксплуатационного мониторинга ресурса

Вновь проектируемые ЯЭУ должны оснащаться системой эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР). Наличие такой системы позволяет оперативно в процессе эксплуатации контролировать выработанный ресурс конструктивных элементов, заранее проводить обоснование, подготовку и принятие решения о продлении ресурса установки, а также оперативно управлять ресурсом путем разработки и внедрения соответствующих мероприятий.

Система ЭМР предназначена для:

- осуществления контроля за выработанным и остаточным ресурсами оборудования и систем ЯЭУ в процессе эксплуатации с учетом фактической истории эксплуатации, фактических свойств конструкционных материалов, отклонений от чертежно-технической документации при изготовлении и монтаже и выявленных дефектов;
- определения конкретных возможностей по долговечности элементов оборудования и систем, лимитирующих ресурс ЯЭУ, обоснования продления назначенных сроков службы и ресурса;
- повышения безопасности эксплуатации ЯЭУ путем снижения степени вероятности возникновения внезапных отказов по условиям прочности (снижение степени вероятности возникновения скрытых деградационных отказов).

ЭМР реализуется путем выполнения следующих основных этапов.

На первом этапе (технологическом) проводится анализ объекта исследования

(структура, условия эксплуатации, материалы, технология изготовления, требуемый ресурс, начальная дефектность и методы ее контроля, уровни допускаемых напряжений, коэффициенты запаса и т.д.). Цель этапа – максимальный учет основных факторов физических воздействий на конструктивные элементы, получение информации о параметрах фактической модели эксплуатации элементов ЯЭУ, выбор доминирующих механизмов деградации материала, проведение экспериментальных исследований закономерностей их развития в конкретных условиях эксплуатации, построение математических моделей данных процессов и определение их материальных параметров, построение прогнозных моделей расчета остаточного ресурса для доминирующих механизмов деградации по фактической модели эксплуатации ЯЭУ. Путем проведения соответствующих натурных и численных экспериментов осуществляется верификация или адаптация к конкретным условиям разработанных моделей механики поврежденной среды, механики развития трещин, прогнозных моделей оценки остаточного ресурса, аттестация выбранных методов неразрушающего контроля состояния материала.

Проектная модель эксплуатации ЯЭУ представляется в виде некоторой последовательности стандартных эксплуатационных режимов. С использованием соответствующих вычислительных кодов, разработанных моделей механики поврежденной среды и механики разрушения для каждого режима модели эксплуатации и ответственных элементов ЯЭУ проводятся расчеты процессов тепломассопереноса, кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС), процессов накопления повреждений, развития начальных дефектов, если таковые имеют место, или предполагаемых дефектов с параметрами, определяемыми выбранными методами контроля дефектности материала конструктивных узлов при изготовлении и монтаже. На основании расчетов выбираются контролируемые зоны с наибольшими темпами деградации материала, ресурс которых определяет назначенный срок службы оборудования и систем ЯЭУ в целом. Для каждой контролируемой зоны определяются параметры нагруженности и процессов накопления повреждений или развития дефектов, соответствующих каждому режиму нагружения модели эксплуатации. В дальнейшем в процессе эксплуатации контроль за заданными зонами осуществляется либо путем периодического контролирования состояния металла неразрушающими методами в случае возможности доступа к данной зоне, либо путем расчета процесса накопления повреждений по фактической истории нагруженности рассматриваемой зоны. Разрабатывается система регистрации фактической истории эксплуатации ЯЭУ, включающая в себя регистрацию имевших место с начала эксплуатации до момента контролирования штатных режимов модели эксплуатации, их характеристик, последовательности, идентификации нештатных режимов модели эксплуатации и регистрации их параметров. Формируются соответствующие базы данных технологического и рабочего компонентов ЭМР. Разработанные прогнозные модели, адаптированные к каждой контролируемой зоне, с соответствующими базами данных и пакетами прикладных программ, реализующих расчетную оценку выработанного ресурса по фактической истории нагруженности каждой зоны, используются в рабочем компоненте ЭМР, устанавливаемом непосредственно на объекте. Разработанные алгоритмы могут также использоваться для анализа живучести ЯЭУ при развитии гипотетических аварий по различным сценариям, обоснования или оптимизации с точки зрения ресурса конструктивных решений. Первый этап, как правило, реализуется на стадии проектирования объекта.

На втором этапе реализации ЭМР, соответствующем изготовлению, монтажу и начальной стадии эксплуатации ЯЭУ, проводится анализ отклонений от принятых проектных решений, выявленных при контроле дефектов, уточняются контролируемые зоны и физико-механические характеристики конструкционных материалов. На базе тензо- и термометрирования уточняются параметры фактической нагруженности контролируемых зон. На основании уточненных расчетов и прогнозируемой модели эксплуатации ЯЭУ проводится дополнительное обоснование назначенного срока службы элементов оборудования ЯЭУ, уточняются базы данных.

На третьем этапе реализации ЭМР, соответствующем процессу эксплуатации, осуществляется регистрация фактической истории эксплуатации ЯЭУ. По заданной последовательности прохождения режимов модели эксплуатации в каждой контролируемой зоне на базе прогнозной модели развития поврежденности в этой зоне проводится расчет текущей поврежденности материала или размера имеющегося макроскопического дефекта (выработанного ресурса) для прогнозируемых моделей эксплуатации. Оценивается остаточная наработка до достижения в этой зоне предельного состояния в результате снижения остаточной прочности до критической величины. На базе этих оценок проводится при необходимости обоснование возможности продления назначенных сроков службы или ресурса оборудования и систем ЯЭУ на следующий временной интервал либо для заданного срока службы выбирается надлежащая модель эксплуатации, при которой реализуются темпы накопления повреждений, не приводящие на заданном временном интервале к достижению предельного состояния. Таким образом, на третьем этапе ЭМР осуществляется эксплуатация оборудования и систем ЯЭУ по их фактическому техническому состоянию.

Заключение

Эксплуатационный мониторинг ресурса оборудования и систем в процессе эксплуатации ЯЭУ позволяет физически достоверно контролировать выработанный и прогнозировать остаточный ресурс ее критических конструктивных элементов на базе учета фактической модели эксплуатации, фактических физико-механических характеристик материалов, фактических индивидуальных запасов по долговечности. Изложенная методология обоснования прочности и оценки выработанного и остаточного ресурсов оборудования и систем ЯЭУ была успешно применена для обоснования возможности продления эксплуатационного ресурса реакторных установок атомного ледокола «Арктика» до 175 тыс. часов, атомных ледоколов «Россия», «Таймыр» и «Вайгач» до 150 тыс. часов.

Список литературы

1. Методы обоснования ресурса оборудования ЯЭУ / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких и др. М.: Машиностроение, 2008. 445 с.
2. Методы обоснования прочностных и ресурсных характеристик оборудования и систем ЯЭУ в процессе эксплуатации / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких и др. // Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС: Сб. трудов X Международ. конф. Санкт-Петербург, 6–10 октября 2008 г.
3. Контроль ресурса оборудования и систем ЯЭУ на базе математического моделирования процессов деградации конструкционных материалов в условиях эксплуатации / Ф.М. Митенков, Д.Л. Зверев, В.Б. Кайдалов и др. // Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС: Сб. трудов XI Международ. конф. ФГУП

ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, 14–18 июня 2010 г. Т. 2. С. 231–242.

4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПН АЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

A TECHNOLOGY OF OPERATIONAL MONITORING OF NPP EQUIPMENT AND SYSTEMS

**F.M. Mitenkov, M.A. Bolshukhin, A.V. Kozin, Yu.G. Korotkikh,
V.A. Panov, V.A. Pakhomov, S.N. Pichkov**

Based on the modern advances in damaged medium mechanics and fracture mechanics, mathematic models, algorithms and programs were developed to analyze the processes of non-isothermal elastic-plastic deformation and accumulation of fatigue damage in the material of critical zones of NPP equipment and systems. The developed models take account of the effect on the damage accumulation rate of multiaxial stressed state, rotation of principal cross-sections of stress tensors and deformations, non-linear damage summation when changing loading conditions. The above models in combination with the experimental study of material technical condition were used to develop a procedure for estimating the spent life and predicting the residual life of NPP equipment and systems based on the specified history of thermo-mechanical loading taken as a basis for an operational monitoring system. The technology and the main objectives of the operational monitoring system during various NPP lifecycles, such as design, fabrication, installation, operation, extension of specified service life and lifetime, are considered.

Keywords: structural material, damage, spent and residual life, operational monitoring.