

## ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС С ПОЗИЦИИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

*Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

В связи со строительством в Республике Беларусь атомной электрической станции особую актуальность приобретает расчетное обоснование ресурса и безопасной эксплуатации несущих конструкций АЭС.

Количественный анализ условий прочности, долговечности, живучести при возникновении и развитии аварийных ситуаций потенциально опасных элементов атомных станций проводят для таких стадий жизненного цикла, как [1–3]:

- проектирование;
- изготовление;
- испытания и доводка;
- эксплуатация.

**Состояние вопроса.** Основы оценки ресурса работы элементов атомных станций заложены в [3, 4]. Расчетное обоснование ресурса и безопасной эксплуатации несущих конструкций АЭС нужно проводить поэтапно с учетом непрерывного развития традиционных инженерных подходов: на прочность, жесткость и устойчивость (с применением методов сопротивления материалов); на прочность и циклический ресурс, долговечность (с применением методов теории много- и малоциклового усталости); на прочность и временной ресурс – долговечность (с применением методов теории ползучести и длительной прочности); на сопротивление хрупкому разрушению и радиационный ресурс (с учетом изменения физико-механических свойств под действием облучения); на динамическую прочность и ресурс (с применением методов динамики деформирования и разрушения); на трещиностойкость (с применением методов линейной и нелинейной механики разрушения) [3, 4].

**Механика разрушения применительно к несущим конструкциям АЭС.** Базовые соотношения механики деформирования и разрушения, а также механики катастроф в общем случае можно записать в виде

$$\{S, R_{t,N}, P, R_{\sigma}\} = F\{f^3, P^3, t, N, \tau, \Phi, f_{\sigma} \times \sigma_b, \sigma_T, \sigma_{bT}, \sigma_{-1}, E, \lambda, H_B, m, \psi, K_{lc}, f_l, l, \alpha_{\sigma}, F_i\}, \quad (1)$$

где  $S$  – характеристики безопасности;  $R_{t,N}$  – то же ресурса;  $P$  – то же надежности;  $R_{\sigma}$  – то же прочности (сопротивления разрушению);  $f^3$  – функционал эксплуатационной нагруженности;  $P^3$  – параметры эксплуатационной нагруженности в нормальных и аварийных ситуациях;  $t$  – температура в данный момент времени;  $N$  – число циклов нагружения;  $\tau$  – время эксплуатации;  $\Phi$  – параметры полей физических воздействий (радиация, среда, магнитные поля);  $f_{\sigma}$  – функционал физико-механических свойств конструкционных материалов;  $\sigma_b$  – предел прочности;  $\sigma_T$  – то же текучести;  $\sigma_{bT}$  – то же длительной прочности;  $\sigma_{-1}$  – то же выносливости;  $E$  – модуль упругости;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $H_B$  – твердость (микротвердость);  $m$  – показатель упрочнения в упруго-пластической области;  $\psi_c$  – предельная пластичность материала;  $K_{lc}$  – характеристика трещиностойкости;  $f_l$  – функционал конструктивных форм несущего элемента конструкции;  $l$  – размер дефекта;  $\alpha_{\sigma}$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений;  $F_i$  – характеристика поперечного сечения в рассматриваемой зоне.

Расчеты живучести несущих элементов АЭС необходимо проводить по критериям трещиностойкости. Эти расчеты отражают способность сопротивляться действию механических, тепловых, гидродинамических, электромагнитных нагрузок при наличии в элементах дефектов (исходных технологических или возникающих при эксплуатации). Наиболее опасными из дефектов являются микро- и макротрещины, со-

здающие предельно высокую концентрацию напряжений и деформаций. Характеристиками живучести для поврежденных дефектами элементов могут являться ресурс, прочность и надежность

$$\{R_{\tau, N}, P, R_{\sigma}\} = F\{f^3(P^3, t, N, \tau, \Phi) f_{\sigma} \times \sigma_b, \sigma_T, \sigma_{b\tau}, \sigma_{-1}, E, \lambda, H_B, m, \psi, K_{Ic}, f_l, l, \alpha_{\sigma}, F_i\}. \quad (2)$$

Основные расчетные уравнения для нормальных условий эксплуатации (когда номинальные и местные напряжения находятся в пределах упругости  $\{\sigma_n^2, \sigma_{\max, k}^2\} \leq \{\sigma_T\}$ ) могут быть получены на базе линейной механики разрушения – при однократном нагружении, действии длительных и циклических нагрузок [5].

Применительно к наиболее опасному хрупкому разрушению имеем

$$P, R_{\sigma} = F f^3 P^3, t, \Phi f_{\sigma} K_{Ic} f_l l. \quad (3)$$

Расчеты прочности  $R_{\sigma}$  по критериям трещиностойкости сводятся к определению расчетных дефектов  $l$ , выбору наибольших эксплуатационных нагрузок  $P^3$  и соответствующих им минимальных температур  $t$ , учету воздействий физических полей  $\Phi$  и специальному экспериментальному определению показателей трещиностойкости конструкционных материалов (критическое значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ ) [6]. При этом параметры вероятности хрупкого разрушения  $P$  могут быть оценены с учетом рассеяния характеристик  $P^3, \Phi, K_{Ic}$  и  $l$ .

Сопротивление хрупкому разрушению можно свести к удовлетворению соотношений

$$K_I^3 = f P_{\max}^3, t_{\min}, l \leq K_I = \frac{K_{Ic}}{n_k}, \quad (4)$$

где  $[K_I]$  – допустимое значение коэффициента интенсивности напряжений с учетом минимальной температуры эксплуатации  $t_{\min}$ ;  $n_k$  – запас по критическому коэффициенту интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , определяемому при температуре  $t_{\min}$ .

С учетом выраженной зависимости  $K_{Ic}$  от  $t_{\min}$  конструкционных сталей расчет по  $K_I^3$  мож-

но дополнять расчетом по критическим температурам хрупкости

$$t_{\min}^3 = f l, F \geq t = t_c + \Delta t_c, \quad (5)$$

где  $[t]$  – допустимая минимальная температура эксплуатации;  $t_c$  – критическая температура хрупкости, соответствующая резкому снижению  $K_{Ic}$ ;  $[\Delta t_c]$  – запас по критическим температурам хрупкости.

Поскольку номинальные напряжения при хрупких разрушениях по уравнениям линейной механики разрушения зависят от размеров дефектов  $l$  и размеров поперечных сечений  $F_i$ , расчеты живучести по критериям трещиностойкости можно сводить к расчетам допустимых размеров дефектов  $[l]$

$$l_{\max}^3 = f K_{Ic}, F, \Phi, P_{\max}^3 \leq l = \frac{l_c}{n_l}, \quad (6)$$

где  $l_{\max}^3$  – максимальный размер дефекта при эксплуатации, устанавливаемый средствами дефектоскопии;  $l$  – критический размер дефекта;  $n_l$  – запас по размеру дефекта.

Ресурс  $R_{\tau, N}$  на стадии развития дефектов при нормальных условиях эксплуатации по критериям трещиностойкости определяют в соответствии с (2) на основе диаграмм разрушения при длительном статическом или циклическом нагружении, связывающих скорости роста трещин  $l$  (по времени  $\tau$  или по числу циклов  $N$ ):

$$R_{\tau, N} = F f^3 P^3, t, N, \tau, \Phi f_{\sigma} K_{Ic} f_l l, F_i = f \left( \frac{dl}{d\tau}, \frac{dl}{dN}, K_{Ic} \right). \quad (7)$$

При этом ресурс получают путем интегрирования уравнения для диаграммы разрушения по текущему размеру дефекта

$$R_{\tau, N} = \int_{l_0}^{l_c} dl_{\tau, N} \leq \tau, N = \left\{ \frac{\tau_c}{n_{\tau}}, \frac{N_c}{n_N} \right\}, \quad (8)$$

где  $l_c$  – критический размер дефекта, устанавливаемый по соотношениям (3), (6);  $l_0$  – исходный (начальный) дефект на данной стадии эксплуатации;  $[\tau, N]$  – допустимое время или число циклов эксплуатационного нагружения;  $n_{\tau}, n_N$  – запасы по ресурсу.

Характеристики надежности  $P$  по параметрам временного или циклического ресурса могут быть найдены так же, как для случая хрупкого разрушения, по формулам (3)–(6) при введении в расчет функций распределения для  $P^3$ ,  $t$ ,  $\Phi$ ,  $K_{Ic}$ ,  $l$ . Эти расчеты можно сводить к установлению запасов по минимально допустимым (для заданной вероятности)  $K_{Ic}$  и максимально возможным (для той же вероятности) скоростям трещин ( $dl/dt$  и  $dl/dN$ ) и уровням нагрузок  $P^3$ .

Для аварийных ситуаций расчеты живучести по критериям трещиностойкости проводят в соответствии с (2)–(8). При этом для данного момента развития аварийной ситуации следует использовать соответствующие экстремальные уровни нагрузок  $P_{\max}^3$ , минимальные и максимальные уровни температур  $t$ , максимальные размеры дефектов  $l$  и минимальные характеристики механических свойств. Для анализа живучести в аварийных ситуациях следует использовать уравнения нелинейной механики разрушения с полным набором расчетных параметров (2). Базовые характеристики линейной механики разрушения – коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  и  $K_{Ic}$  заменяют на характеристики нелинейной механики разрушения:  $\delta$  – раскрытие трещин;  $J$  – интеграл;  $I$  – предел трещиностойкости;  $T$  – критерий.

Для обеспечения сопоставимости результатов анализа живучести в нормальных условиях эксплуатации и при аварийных ситуациях рекомендуется использовать условные значения коэффициентов интенсивности напряжений, определяемых через коэффициенты интенсивности деформаций

$$K_I^* = f K_{Ic}, E, m, \sigma_n^2 / \sigma_T. \quad (9)$$

Нелинейную механику деформирования и разрушения, а также механику катастроф как фундаментальную научную дисциплину следует рассматривать в качестве научной основы анализа источников возникновения и процессов развития аварийных и катастрофических ситуаций в сложных технических системах с повышенной потенциальной опасностью; проектирования по традиционным и новым критериям живучести и безопасности; принятия решений о допустимости реализации проектов, возмож-

ной эксплуатации и продлении ресурса безопасной эксплуатации.

Механика разрушения и механика катастроф позволяют назначить показатели ресурса и безопасности с использованием расчетно-экспериментального обоснования прочности, ресурса, надежности и живучести для всех стадий жизненного цикла конструкций.

## ВЫВОДЫ

Безопасность АЭС с позиций механики катастроф следует рассматривать как комбинированную способность несущих элементов потенциально опасных технических систем противостоять всем неблагоприятным наиболее вероятным факторам экстремально высоких внешних и внутренних воздействий при наиболее вероятных пониженных характеристиках сопротивления деформациям и разрушению.

Безопасность  $S$  в нормальных условиях и при возникновении аварийных ситуаций можно считать обеспеченной, если удовлетворяется комплекс требований не только к запасам прочности, но и трещиностойкости в наиболее опасные моменты возникновения и развития аварий.

Разработанные базовые подходы прошли многоуровневую проверку во время длительной стажировки автора на атомной станции в г. Бушер (Исламская Республика Иран).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Нормы** расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. **Исследования** напряжений и прочности ядерных реакторов. – М.: Наука, 1987–1990. – Т. 1. – 232 с. – Т. 2. – 312 с. – Т. 3. – 296 с.
3. **Прочность** конструкций при малоцикловом нагружении / Н. А. Махутов [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
4. **Mahoutov, N. A.** Bases for estimation of power stations elements service life / N. A. Mahoutov, M. M. Gadenin // *Diagnostics, prediction and improvement of structural element durability*. Edit. V.V. Panasyuk. – Lviv: Physico-mechanical institute, 1999. – P. 15–25.
5. **Леонович, С. Н.** Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. – Брест: БрГТУ, 2006. – 380 с.
6. **Гузев, Е. А.** Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест: БПИ, 1999. – 215 с.

Поступила 17.07.2008