

В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко*, В. В. Злочевский*

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

**Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, Киев*

РАЗВИТИЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ С ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Рассмотрен альтернативный подход определения вероятностных показателей безопасности объектов с высокорadioактивными источниками, основанный на оценках вероятности разрушения защитных барьеров безопасности под действием усталостных механизмов деградации.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, защитные барьеры безопасности, вероятность разрушения; остаточная дефектность; ядерные энергоустановки, хранилища радиоактивных источников.

Актуальность вопроса

Под объектами с высокорadioактивными источниками излучений в данной работе подразумеваются ядерные энергоустановки (ЯЭУ); включая бассейн перегрузки ядерного топлива, хранилища высокоактивных отходов (ВАО), а защитными барьерами их безопасности являются оболочки тепловыделяющих элементов, корпус реактора, система гермооболочки (контеймент) ЯЭУ, конструкции хранилищ ВАО и др.

Последние события, связанные с тяжелой аварией на АЭС Фукусима (Япония), определили целый ряд актуальных вопросов перед мировыми ядерными державами. Одним из них является переоценка безопасности АЭС при внешних и внутренних экстремальных событиях (ВВЭС) – землетрясения, затопления, ураганы, катастрофические динамические воздействия и т.п.

В разработанных ГП НАЭК «Энергоатом» согласованных с регулирующим органом отчетах по анализу безопасности (ОАБ) энергоблоков АЭС Украины с ВВЭР вопросы безопасности АЭС при ВВЭС изучены недостаточно по следующим основным причинам.

1. Основное внимание в ОАБ и при разработке инструкций/руководств по управлению запроектными авариями (РУЗА) уделяется наиболее доминантным для безопасности проектов ВВЭР группам исходных аварийных событий (ИСА) с течами теплоносителя (в том числе межконтурные течи). В частности, недостаточно проанализированы вопросы безопасности при ИСА с полным обесточиванием энергоблока в режимах работы реактора на мощности и останова, а также условий одновременного возникновения нескольких ИСА с ВВЭС (по причине малой вероятности возникновения). Авария на АЭС Фукусима подтвердила возможность таких событий.

2. Отсутствует до настоящего времени расчетно-методическое и экспериментальное обеспечение инструкций/руководств по управлению тяжелыми авариями (РУТА), в том числе при ИСА с ВВЭС. Более того, используемые в ОАБ подходы исключают из рассмотрения (углубленный анализ и обоснование компенсирующих мероприятий) относительно маловероятные события и аварийные последовательности запроектных аварий (см., например, [1]), которые фактически имели место на АЭС Фукусима.

3. В качестве основного внешнего экстремального события (как наиболее вероятного для АЭС Украины) определены сейсмические воздействия. При этом оборудование систем важных, для безопасности (СВБ), по проекту ВВЭР квалифицировано на проектное землетрясение (ПЗ) в 5 баллов по шкале MSK (вероятность возникновения 1 раз в 100 лет) и на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) – 6 баллов по шкале MSK (вероятность возникновения 1 раз в 10 тыс. лет). Последние исследования по сейсмичности площадок АЭС

© В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко, В. В. Злочевский, 2012

Украины показали (в частности, для Запорожской АЭС), что вероятность МРЗ составляет 10^{-3} 1/(реактор·год), а вероятность землетрясения в 7 баллов – 1 раз в 5000 лет (см., например, [2]).

4. В методических обеспечениях ОАБ АЭС Украины вероятность отказа/разрушения защитных барьеров безопасности (оболочки тепловыделяющих элементов, корпуса реактора, гермооболочки реакторной установки) определяются на основе детерминистского анализа достижения критических значений соответствующих температур и давлений. При этом фактически не учитывается вероятность разрушения/нарушения герметичности защитных барьеров безопасности (ЗББ) по причине остаточной дефектности материалов, обусловленная качеством изготовления и условиями эксплуатации.

Таким образом, необходимо дальнейшее развитие и совершенствование риск-ориентированных методов анализа надежности и безопасности ЗББ как для вероятностных оценок ИСА, так и для оценок вероятности разрушения защитных барьеров безопасности.

Основные положения

Перспективным направлением совершенствования *вероятностных* оценок разрушения ЗББ являются применение риск-ориентированных подходов, основанных на вероятностных методах *теории надежности по остаточной дефектности* (см., например, [3]). В ядерной энергетике этот подход получил активное развитие в последние годы для решения задач по оценке и прогнозу остаточного ресурса трубопроводов и корпусов оборудования, а также для реализации перспективной концепции «течь перед разрушением».

Основные положения этого подхода заключаются в следующем.

1. В процессе изготовления и эксплуатации под действием внешних воздействий и различных механизмов деградации в материале возникают и развиваются дефекты.

В зависимости от размера несплошности (дефекты) можно разделить на три группы: субмикроскопические (сравнимые с размерами атомов), микроскопические (сравнимые с размерами зерен в металле) и макроскопические (сравнимые с размерами элементов конструкций). Число субмикроскопических дефектов в металле (их еще называют дефекты межкристаллической решетки – дислокации, вакансии и т.п.) очень велико. В сечение 1 см^2 попадает $10^8 - 10^{12}$ дислокаций. Микроскопические дефекты связаны с процессами получения слитка, его обработки давлением, изготовления полуфабриката детали. Это в основном микропоры, неметаллические включения, микронадрывы и т.п. Число микроскопических дефектов существенно меньше числа субмикроскопических, но все еще велико. На 1 см^2 может быть несколько дефектов. Макроскопические несплошности характерны, как правило, для сварных соединений. Вероятность попадания в эксплуатацию конструкции с макродефектом в основном металле очень мала, и, возможно, на 3 – 5 порядков меньше, чем для сварных соединений¹.

В общем случае число дефектов в концентрации N уменьшается с увеличением характерного размера дефектов a [3]:

$$N = A a^{-n}, \quad (1)$$

где A , n – коэффициенты, зависящие от свойств материала, технологии и качества изготовления и технического обслуживания. Примеры значений этих коэффициентов приведены в таблице.

При длительной эксплуатации оборудования и трубопроводов неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации. Это обусловлено особенностями эксплуатации: высокими температурой, давлением и скоростью потоков, наличием переменных температурных деформаций и сложного напряженного состояния металла оборудования. Воздействие указанных факторов в течение длительного времени вызывает повреждение метал-

¹ Исключение составляют литые детали.

ла, развитие микродефектов на поверхностях нагруженных элементов оборудования и трубопроводов.

Примеры исходной дефектности оборудования

Оборудование	Исходная дефектность	
	$A, \text{мм}^n$	n
Наплавка корпуса реактора (КР) ВВЭР-1000	1482	2,17
Основной металл и сварные швы главного циркуляционного трубопровода ГЦТ ВВЭР-1000	241,7	1,58
Трубопроводы ГЦТ ВВЭР-440 после входного, предэксплуатационного и эксплуатационного контролей	234	1,37

2. С позиции механики разрушения комплексной характеристикой сопротивления усталости металлов и сплавов является кинетическая диаграмма усталостного разрушения (рис. 1). По оси ординат откладывается логарифм скорости роста трещины v , а по оси абсцисс – логарифм размаха коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ или его максимальное значение K_{\max} .

На диаграмме можно выделить три участка, каждый из которых характеризуется своими феноменологическими и физическими закономерностям развития трещин:

I – стадия припорогового роста усталостной трещины (РУТ) ($0 < da/dN < 5 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл);

II – стадия стабильного РУТ ($5 \cdot 10^{-5} < da/dN < 10^{-3}$);

III – стадия ускоренного (нестабильного) РУТ ($da/dN > 10^{-3}$ мм/цикл).

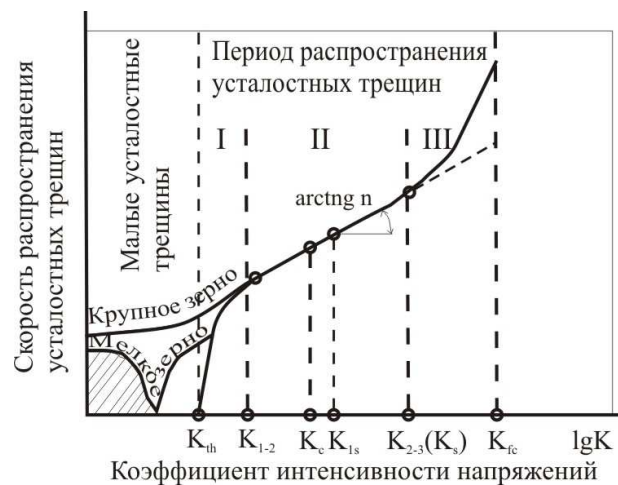


Рис. 1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения.

Основными характеристиками циклической трещиностойкости материалов, вытекающими из рассматриваемой диаграммы, являются следующие: пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{th} , ниже которого усталостная трещина не распространяется и критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{fc} , при котором происходит усталостное разрушение.

Критические внутренние напряжения K_{fc} и эксплуатационные внешние нагрузки σ связаны с соответствующими размерами дефектов (трещин) $a_{кр}$ известным соотношением [3]

$$a_{кр} = \left(\frac{K_{fc}}{\sigma} \right)^2 n_1, \quad (2)$$

где n_1 – коэффициент, зависящий от формы трещины и ее расположения в конструкции.

3. В рамках рассматриваемого риск-ориентированного подхода *основным показателем риска* является *условная вероятность хрупкого разрушения* P_p конструкции при достижении условий $a \geq a_{кр}$ (критерий риска).

В общем случае вероятность разрушения в момент времени t определяется решением

$$P_p = \frac{1}{t} \int_0^t \int_{K_{fc\min}}^{K_{fc\max}} \rho_{kf}(K_{fc}) \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \rho_{\delta}(\sigma) P_a(a > a_{кр}) d\sigma dK_{fc} d\tau, \quad (3)$$

где ρ_{kf} и ρ_{δ} – функции плотности вероятностей соответственно критических коэффициентов напряжений и эксплуатационного напряжения, P_a – интегральная функция вероятностей существования трещин (дефектов) размером не менее a .

Функция ρ_{kf} и ρ_{δ} могут быть описаны уравнениями нормального распределения закона Гаусса. При стремлении к нулю дисперсии нормальное распределение соответствует δ -функции. Так, в случае пренебрежения разбросами K_{fc} и σ вероятность разрушения может быть выражена через соотношение критических дефектов и общего количества дефектов в следующем виде:

$$P_p(\tau) = P_a(a \geq a_{кр}) = \frac{\int_{n_1}^{n_2} dN(a \geq a_{кр})}{\int_{n_0}^{n_2} dN(a_{\min} \leq a \leq a_{\max})}, \quad (4)$$

где N_0 – число дефектов размером a_{\min} (соответствующих K_{th}); N_1 – число дефектов размером $a_{кр}$ (соответствующих K_{fc}); N_2 – число дефектов с максимально возможными дефектами a_{\max} (соответствующие K_{\max}).

В соответствии с уравнением (3) условная вероятность разрушения P_p равна вероятности существования в элементе конструкции несплошности с размером $a \geq a_{кр}$. Вероятность существования в материале конструкции дефекта $a \geq a_{кр}$ определяется функцией остаточной дефектности P_a , т.е. вероятностной частью остаточной дефектности. Критический размер несплошности определяется коэффициентом K_{fc} и действующим в рассматриваемом элементе конструкции напряжением σ . На рис. 2 графически изображена схема решения уравнения (3). На схеме показаны вероятности существования в конструкции дефектов $a \geq [a]$, т.е. вероятность ремонта при использовании норм дефектности при эксплуатации, и вероятность $a \geq [a]_{изг}$, т.е. вероятность ремонта при использовании норм дефектности при изготовлении.

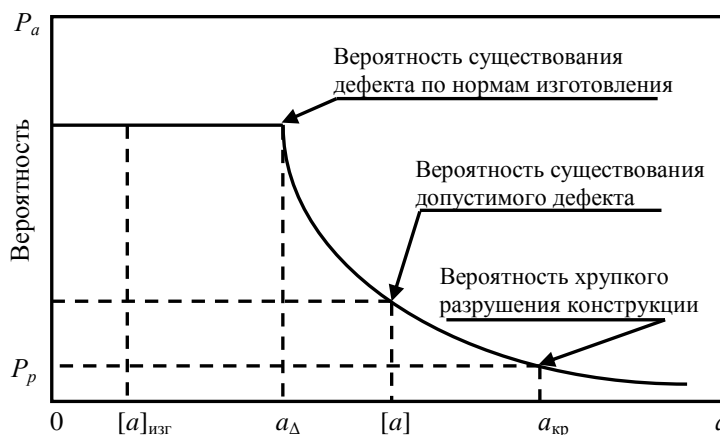


Рис. 2. Вероятность существования дефектов различных размеров.

С учетом формул (1) и (4) при сосредоточенных нагрузках упрощенная оценка условной вероятности разрушения конструкции в момент t имеет вид

$$P_p(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \left(\frac{a_{\min}}{a_{kp}} \right)^n \left[1 - \left(\frac{a_{kp}}{a_{\max}} \right)^n \right] d\tau, \quad (5)$$

где $a_{\min} = \frac{K_{th}^2}{\sigma_{\max}^2} n_1$; $a_{\max} = \frac{K_{\max}^2}{\sigma^2} n_1$; σ_{\max} - максимально допустимое напряжение в конструкции;

σ – удельные (на единицу поверхности напряжения, вызванные внешними воздействиями: механические, термические, нейтроннофизические, физико-химические и др.) эксплуатационные нагрузки.

Тогда, с учетом формулы (2) вероятностные оценки формулы (5) имеют вид

$$P_p(t) = \frac{1}{t} \int_0^t P_1^n (1 - P_2^n) d\tau, \quad (6)$$

где параметры $P_1 = \frac{K_{th}^2 \sigma^2}{K_{fc}^2 \sigma_{\max}^2}$ и $P_2 = \frac{K_{fc}^2}{K_{\max}^2}$ определяются конструктивно-техническими ха-

рактеристиками конструкции, качеством и условиями изготовления, эксплуатации, контроля, технического обслуживания и ремонта, а также суммарным воздействием эксплуатационных нагрузок (в том числе при нормальных условиях эксплуатации, нарушениях и аварийных режимах).

Соотношения для оценки параметров, входящих в формулу (6), определяются в зависимости от рассматриваемой системы и постановки задач, а также области применимости расчетных соотношений.

Рассмотренный риск-ориентированный метод позволяет развивать альтернативный подход оценки вероятностных показателей безопасности энергоблоков АЭС. В частности, нормируемый вероятностный показатель частоты предельного аварийного выброса (ЧПАВ) можно определить как совокупность произведений частоты возникновения исходных аварийных событий и вероятностей разрушения ЗББ. В отличие от традиционной методологии вероятностного анализа безопасности (ВАБ) такой подход более корректно и обоснованно учитывает:

- 1) возможность разрушения ЗББ до достижения условий предельных детерминистских параметров в процессе аварии (температур оболочек тепловыделяющих элементов и корпуса реактора, давления в гермообъеме и др.);
- 2) предысторию влияния (до момента аварии) на надежность ЗББ различных эксплуатационных режимов (в нормальных условиях, при нарушении нормальных условий эксплуатации и в аварийных ситуациях).

Ниже приведен упрощенный пример результатов оценки вероятности разрушения ЗББ хранилища ВАО под воздействием сейсмических экстремальных нагрузок. В качестве критического элемента рассматривается непосредственный контейнер с ВАО вне железобетонной шахты хранилища (например, на стадиях загрузки, транспортировки, захоронения и т.п.). Контейнер с ВАО выполнен в форме цилиндрического резервуара высотой 1,5 м и диаметром 0,4 м, с внутренним диаметром 32 мм и высотой 450 мм [4]. Вероятность разрушения ЗББ под воздействием сейсмических нагрузок связана с условной вероятностью разрушения соотношением

$$P = P_{uca} \cdot P_p, \quad (7)$$

где P_{uca} – вероятность ИСА с землетрясением.

Основные прочностные характеристики (коэффициенты интенсивности напряжений, максимально допустимые напряжения, модули упругости, изгибающие моменты и напряжения и др.), а также сейсмические нагрузки в вертикальном и горизонтальном направлениях рассчитывались в соответствии с нормами расчета на прочность [5]. Вероятность ИСА при

землетрясении принималась: 10^{-2} 1/год для 5 баллов; 10^{-3} 1/год для 6-ти баллов; $2 \cdot 10^{-4}$ 1/год для 7 баллов [2].

Выводы

1. С ростом сейсмических нагрузок условная вероятность разрушения ожидаемо увеличивается; однако интегральная оценка вероятности разрушения хранилища уменьшается. Этот несколько неожиданный результат связан с тем, что вероятность возникновения землетрясений более 5 баллов существенно меньше проектного землетрясения (вероятностные оценки возможности землетрясений для промышленных площадок Украины более 7 баллов пока вообще не определены [2]).

2. Полученные оценки вероятности разрушения защитных барьеров безопасности хранилища ВАО превышают установленные для Украины нормы вероятностных показателей безопасности по допустимым выбросам/сбросам продуктов в окружающую среду. Этот результат определяет необходимость дальнейшего изучения надежности защитных барьеров безопасности и разработки соответствующих контрмер по повышению безопасности при сейсмических воздействиях хранилищ ВАО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Основы управления запроектными авариями на АЭС с ВВЭР* / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Колыханов. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. - 400 с.
2. *Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР* / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. - 200 с.
3. *Оптимизация плановых ремонтов энергоблоков АЭС с ВВЭР* / В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкин, В. Н. Колыханов, В. Ю. Кочнева. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины. - 2008. - 496 с.
4. *Экспертный анализ состояния безопасности: (Отчет № 35/05)* / Одесский филиал ГНТЦ ЯРБ/ОГМСК. - Одесса, 2005.
5. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность.

В. І. Скалозубов, В. М. Ващенко, В. В. Злочевський

РОЗВИТОК РИЗИК-ОРІЄНТОВАНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЗАХИСНИХ БАР'ЄРІВ ОБ'ЄКТІВ З ВИСОКОРАДІОАКТИВНИХ ДЖЕРЕЛАМИ

Розглянуто альтернативний підхід визначення ймовірнісних показників безпеки АЕС, заснований на оцінках імовірності руйнування захисних бар'єрів безпеки під дією втомних механізмів деградації.

Ключові слова: ризик-орієнтований підхід, захисні бар'єри безпеки, імовірність руйнування, залишкова дефектність, ядерні енергоустановки, сховища радіоактивних джерел.

V. I. Skalozubov, V. M. Vashchenko, V. V. Zlochevsky

DEVELOPMENT OF RISK-ORIENTED METHODS FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF PROTECTIVE BARRIERS SECURITY OBJECTS WITH HIGHLY RADIOACTIVE SOURCES

The paper discusses an alternative approach is the definition of probabilistic safety indicators NPP, based on estimates of the probability of failure of protective safety barriers under the influence of fatigue mechanisms of degradation of.

Keywords: risk-based approach, protective safety barriers, the probability of failure, the residual defects, nuclear power plants, storage of radioactive sources.

Поступила в редакцию 05.07.11