

В. Н. Ващенко¹, В. В. Злочевский¹,
В. И. Скалозубов²

¹Государственная экологическая академия
последипломного образования и управления,
г. Киев, Украина

²Институт проблем безопасности АЭС НАНУ,
г. Чернобыль, Украина

Риск-ориентированные подходы оценки экологической безопасности объектов с радиоактивными отходами

В статье предложены оригинальные риск-ориентированные методы оценки экологической безопасности объектов с радиоактивными отходами. В качестве критериев безопасности использованы вероятностные нормы по летальным исходам и надежности защиты барьеров безопасности. На основе полученных вероятностных показателей установлено, что условия экологической безопасности выполняются по нормативному критерию летальных исходов.

Ключевые слова: радиоактивные отходы (РАО); риск-ориентированный подход (РОП); вероятностные показатели и критерии экологической безопасности.

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

Ризик-орієнтовані підходи оцінки екологічної безпеки об'єктів з радіоактивними відходами

У статті запропоновані оригінальні ризик-орієнтовані методи оцінки екологічної безпеки об'єктів з радіоактивними відходами. Як критерії безпеки використані імовірнісні норми з летальних результатів і надійності захисту бар'єрів безпеки. На основі отриманих імовірнісних показників встановлено, що умови екологічної безпеки виконуються по нормативному критерію летальних результатів.

Ключові слова: радіоактивні відходи (РАВ), ризик-орієнтований підхід (РОП); імовірнісні показники і критерії екологічної безпеки.

© В. Н. Ващенко, В. В. Злочевский, В. И. Скалозубов, 2011

Анализ опыта регулирования экологической безопасности объектов с РАО показывает, что известные технические обоснования условий безопасности используют, в основном, детерминистские критерии и показатели экологической безопасности [1—4]. Перспективно и применение риск-ориентированного подхода (РОП) оценки экологической безопасности объектов с РАО, основанного на вероятностных показателях и критериях. В рамках РОП можно оценивать и сопоставлять вероятностные показатели безопасности и радиационной защиты отдельных объектов при возникновении гипотетических аварий; выявлять критические для безопасности системы/оборудования; определять доминантные для безопасности вероятные пути развития аварийных процессов и т. п.

Условия экологической безопасности объектов с РАО в рамках традиционных РОП имеют следующий вид:

$$\sum_{i=1}^k I_i \sum_{j=1}^n P_{ij} < N, \quad (1)$$

где I_i — вероятность возникновения i -го потенциально опасного аварийного события; P_{ij} — вероятность негативного события в j -й аварийной последовательности i -го исходного аварийного события; N — нормативный критерий вероятности граничного (предельно-допустимого) выброса/сброса радиоактивных продуктов в окружающую среду.

Однако в настоящее время критерий N не определен нормами по экологической безопасности.

В соответствии с международной практикой считается, что риск пренебрежимо мал, если вероятность смерти за год менее 10^{-6} ; риск приемлем для персонала, если вероятность смерти за год не выше 10^{-4} [5, прил. 9]). Граница индивидуального риска для облучения лиц из персонала принимается равной 10^{-3} .

Потенциально опасными исходными аварийными событиями для объектов с РАО являются внутренние и внешние экстремальные события (землетрясения, наводнения, смерчи, падения самолетов, ураганы и т. п.), а также транспортно-технологические операции (ТТО) при загрузке хранилища РАО.

Вероятность (частота) исходного потенциально опасного события I_i оценивается по статистическим данным из опыта и регламента эксплуатации объектов с РАО. Анализ этих данных (на примере площадки захоронения РАО Одесского спецкомбината ПЗРО ОГМСК) показал, что частоты ТТО при загрузке хранилищ твердыми (ТРО) и высокоактивными (ВРО) радиоактивными отходами являются доминантными для условий экологической безопасности:

$$I_1 P_1 + I_2 P_2 < 10^{-4}, \quad (2)$$

где I_1, I_2 — частота аварийных событий, возникающих при загрузке хранилища с ТРО и хранилища ВРО соответственно; P_1, P_2 — вероятность смертного случая по причине облучения в результате аварийных ситуаций при загрузке ТРО и ВРО соответственно.

Вероятность смертного случая по причине облучения [5]

$$P_j = 1 - \exp(-KD_j), \quad (3)$$

где $K = 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ — коэффициент вероятности стохастических эффектов; D_j — максимально возможная доза облучения при аварии на j -м типе хранилища РАО.

На основе анализа эксплуатационных данных и проектно-технической документации ПЗРО ОГМСК [6] оценки этих вероятностных показателей (по верхней границе) $P_1 = 7,3 \cdot 10^{-3}$ (для ТРО) и $P_2 = 4,0 \cdot 10^{-4}$ (для ВРО), а значения частоты аварийных событий, соответственно, $I_1 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ 1/год, $I_2 = 8,2 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

Исходя из полученных результатов можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Условия экологической безопасности (2) для ПЗРО ОГМСК по критерию летальных исходов обслуживающего персонала выполняются. Вместе с тем, эти результаты в общем случае не могут быть распространены на другие объекты по хранению РАО, так как зависят от условий эксплуатации и проектно-технических данных систем и оборудования.

2. Более обоснованные оценки условий экологической безопасности можно получить при нормировании показателя риска граничного (предельного) аварийного выброса/ сброса РАО в окружающую среду.

Перспективным направлением совершенствования вероятностных оценок разрушения защитных барьеров безопасности (ЗББ) является применение риск-ориентированных подходов, основанных на вероятностных методах теории надежности по остаточной дефектности (см., например, [9]). 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 влиянием 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). Количество субмикроскопических дефектов в металле (их еще называют дефектами межкустальной решетки — дислокации, вакансии и т. п.) очень велико. В сечение площадью 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 пр. Количество микроскопических дефектов существенно меньше, чем количество 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 три — пять порядков меньше, чем для сварных соединений*.

В общем случае количество дефектов в концентрации N уменьшается с увеличением характерного размера дефектов a [9]:

$$N = A \cdot a^{-n}, \quad (4)$$

где A , n — коэффициенты, зависящие от свойств материала, технологии и качества изготовления, технического обслуживания (табл. 1).

* Исключение составляют литые детали.

Таблица 1. Примеры исходной дефектности оборудования

Оборудование	Исходная дефектность	
	A , мм	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

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 металла, развитие дефектов на поверхностях нагруженных элементов.

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



Рис. 1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ или его максимальное значение K_{\max} . На диаграмме можно выделить три участка, каждый из которых характеризуется своими феноменологическими и физическими закономерностями развития трещин:

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

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

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

Основными характеристиками циклической трещиностойкости материалов, вытекающими из рассматриваемой

диаграммы, являются 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.

Коэффициент интенсивности напряжения K_{fc} и эксплуатационные внешние нагрузки σ связаны с соответствующими размерами дефектов (трещин) $a_{кр}$ известным соотношением [9]

$$a_{кр} = \left(\frac{K_{fc}}{\sigma} \right)^2 n_1, \quad (5)$$

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

$$P_p = \frac{1}{t} \int_{K_{fc\min}}^{K_{fc\max}} \rho_{kf}(K_{fc}) \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \rho_{\delta}(\sigma) P_a(a > a_{кр}) d\sigma \cdot dK_{fc} d\tau, \quad (6)$$

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 . Функции 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 разбросам K_{fc} и σ или принятия консервативно осредненных значений уравнение (6) имеет вид

$$P_p(\tau) = P_a(a \geq a_{кр}) = \frac{\int_{N_1}^{N_2} dN(a \geq a_{кр})}{\int_{N_0}^{N_2} dN(a_{\min} \leq a \leq a_{\max})}, \quad (7)$$

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

В соответствии с уравнением (6) 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 (6). На схеме показаны вероятность существования в конструкции дефектов $a \geq [a]$, т. е. вероятность ремонта при использова-

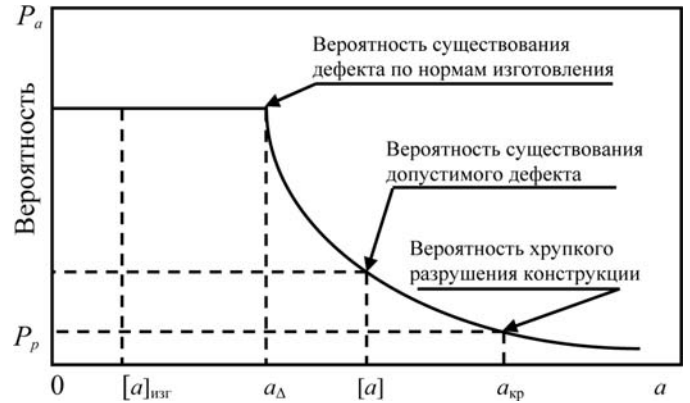


Рис. 2. Вероятность существования дефектов различных размеров

нии норм дефектности при эксплуатации, и вероятность $a \geq [a]_{изг}$, т. е. вероятность ремонта при использовании норм дефектности при изготовлении.

С учетом (4), (7) при сосредоточенных нагрузках упрощенная оценка условной вероятности разрушения конструкции в момент t имеет вид

$$P_p(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \left(\frac{a_{\min}}{a_{кр}} \right)^n \left[1 - \left(\frac{a_{кр}}{a_{\max}} \right)^n \right] d\tau, \quad (8)$$

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, нейтронно-физические, физико-химические и др.) эксплуатационные нагрузки.

С учетом (5) вероятностные оценки (8) имеют вид

$$P_p(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \Pi_1^n (1 - \Pi_2^n) d\tau, \quad (9)$$

где параметры $\Pi_1 = \frac{K_{th}^2 \sigma^2}{K_{fc}^2 \sigma_{\max}^2}$; $\Pi_2 = \frac{K_{fc}^2}{K_{\max}^2}$ определяются

конструктивно-техническими характеристиками 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 (9), определяются в зависимости от рассматриваемой системы и постановки задач, а также области применимости расчетных зависимостей.

Ниже приведен упрощенный пример результатов оценки вероятности разрушения ЗББ хранилища высоко-радиоактивных отходов (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 400 мм, с внутренним диаметром 32 мм и высотой 450 мм [10].

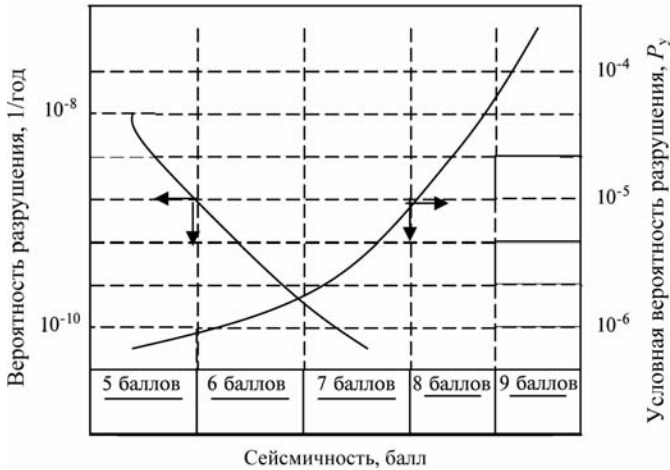


Рис. 3. Результаты расчета вероятности разрушения хранилища ВАО при землетрясениях

Вероятность разрушения ЗББ под воздействием сейсмических нагрузок связана с условной вероятностью разрушения соотношением

$$P = P_{\text{ИСА}} \cdot P_p, \quad (10)$$

где $P_{\text{ИСА}}$ — 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 [11]. Вероятность ИСА при землетрясении силой 5 баллов принималась равной 10^{-2} 1/год; силой 6 баллов — 10^{-3} ; силой 7 баллов — $2 \cdot 10^{-4}$ 1/год [8].

Результаты расчетов приведены на рис. 3.

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.

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. Однако при получении вероятностных оценок принят ряд допущений по характерной геометрии дефектов и пороговому значению коэффициента интенсивности напряжений, связанных с неопределенностью этих параметров. Поэтому в дальнейшем необходим анализ неопределенностей и чувствительности расчетных значений, который позволит более корректно определить область оценок вероятностей разрушения.

Список литературы

1. Корчагин, П. А. Обращение с РАО в Украине / П. А. Корчагин, П. В. Замостьян, В. М. Шестопапов // НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. — Чернобыль, 2000. — 178 с.
2. Корчагин, П. А. Долговременное хранение и захоронение отработанных ИИИ в Украине / П. А. Корчагин, П. В. Замостьян, В. М. Шестопапов. — К.: ВЦ «ДрУк», 2001. — 128 с.
3. Саенко, С. Ю. Математическое моделирование тепло- и массопереноса в геологическом защитном барьере после захоронения отработавшего ядерного топлива / С. Ю. Саенко, И. М. Неклюдов, Г. А. Холомеев и др. // Ядерная и радиационная безопасность. — 2000. — № 4. — С. 66–73.
4. Федоров, А. Л. Оценка безопасности хранилища с отвержденными радиоактивными отходами, упакованными в бетонные контейнеры / А. Л. Федоров, А. И. Дорожкин, В. Т. Сорокин // Атомная энергетика. — 1996. — Т. 81, вып. 1. — С. 40–47.
5. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ).
6. Изучение хранилищ ВАО, ТРО, ЖРО на предмет оценки их эксплуатационных характеристик: Отчет о НИР / НТК КОРО. А—1078—3. — Желтые Воды, 2005.
7. Скалозубов, В. И., Основы управления запроектными авариями на АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Колыханов // НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. — Чернобыль, 2010. — 400 с.
8. Скалозубов, В. И. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков // НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. — Чернобыль, 2010. — 200 с.
9. Скалозубов, В. И. Оптимизация плановых ремонтов энергоблоков АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкин, В. Н. Колыханов, В. Ю. Кочнева // НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. — Чернобыль, 2008. — 496 с.
10. Экспертный анализ состояния безопасности: Отчет № 35/05. — Одесский филиал ГНТЦ ЯРБ/ОГМСК. — Одесса, 2005.
11. ПН АЭ Г-7—002—86. Нормы расчета на прочность.

Надійшла до редакції 05.07.2011