

6. ДГН 6.6.1. – 6.5.001-98. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97).
7. ДГН 6.6.1. – 6.5.061-2000. Нормы радиационной безопасности Украины, Приложение: Радиационная защита от источников потенциального облучения (НРБУ-97/Д-2000).
8. ДСП 6.074.120-01. Основные санитарные правила противорадиационной защиты Украины (ОСПУ).
9. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки АС (ОПБУ-2008)
10. Основы управления запроектными авариями на АЭС с ВВЭР/Скалозубов В.И., Ключников А.А., Колыханов В.Н. – ИПБ АЭС НАНУ. – Чернобыль. – 2010г. – 400 с.
11. Борисенко В.И., Ключников А.А., Пампура В.И. Обоснование показателей безопасности АЭС / Проблемы безопасности АЭС и Чернобыля. – Вып. 15. – 2011.
12. Бурдаков Н.С., Русинов Н.Я. К вопросу безопасности ядерных реакторов. Озерск. ВРБ-2005г. – 42с.

УДК 621.039

**Скалозубов В.И., Скалозубов К.В. (Украина, Одесса),
Ващенко В.Н., Злочевский В.В., Яровой С.С. (Украина, Киев)**

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БАРЬЕРОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ С ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ С ПОМОЩЬЮ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТОДОВ

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 – оболочки тепловыделяющих элементов, корпус реактора, система гермооболочки (контаймент) 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 т.ч. межконтурные течи).

2). Отсутствует до настоящего времени расчетно-методическое и экспериментальное обеспечение инструкций/руководств по управлению тяжелыми авариями (РУТА), в т.ч. при ИСА с ВВЭС. Более того, используемые в ОАБ подходы исключают из рассмотрения 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 Украины показали (в частности, для Запорожской АЭС), что вероятность МРЗ составляет 10^{-3} /(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, вызванная 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]).

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).

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

$$N = A a^{-n} \tag{1}$$

где A, n – коэффициенты, зависящие от свойств материала, технологии и качества изготовления и технического обслуживания.

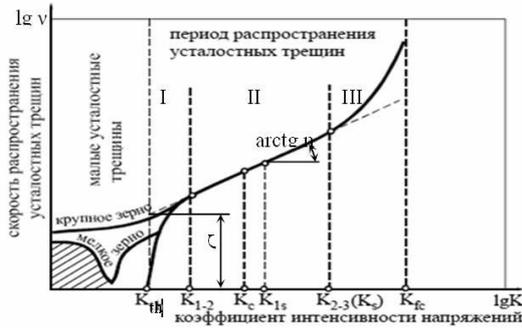


Рис. 1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

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]:

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

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:

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

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 разбросам K_{fc} и σ или принятии консервативно осредненных значений, уравнения (3) имеет вид:

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

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}).

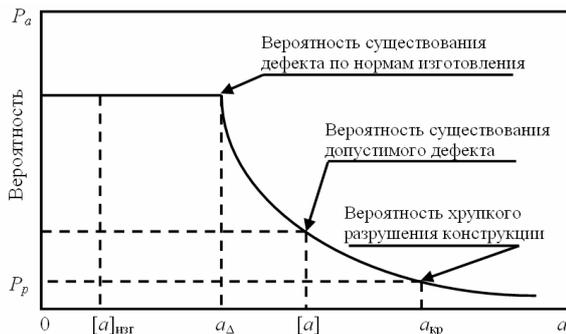


Рис. 2. Вероятность существования дефектов различных размеров

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.

При необходимости учета двух размеров несплошности можно использовать соответствующую функцию $P_{a,c}(a, c)$ (рис. 3).

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

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

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 эксплуатационные нагрузки.

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

$$P_p(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \Pi_1^n (1 - \Pi_2^n) d\tau, \tag{6}$$

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 т.ч. при нормальных условиях эксплуатации, нарушениях и аварийных режимах).

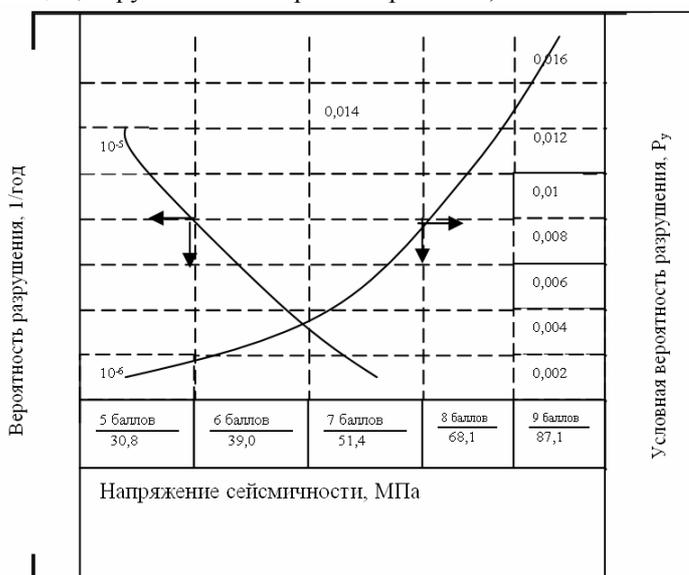


Рис. 3. Результаты расчета вероятности разрушения хранилища ВАО при землетрясениях

Соотношения для оценки параметров, входящих в (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:

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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