

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА РИСКА АВАРИИ

С развитием представлений в области промышленной безопасности стало необходимо использовать количественный показатель безопасности в виде риска аварии  $R$ . Он описывается, казалось бы, простой формулой, имеющей вид:

$$R = P \times V, \quad (1)$$

где  $P$  – вероятность аварии (но, как правило, используют показатель частоты аварии),  $V$  – оценка величины потерь в результате аварии. Это короткое выражение включает в себя множество сложнейших процессов, каждый из которых весьма трудно оценить количественно.

В оценку последствий  $V$  включают сценарии развития событий, которые следуют за разрушением технического устройства, подсчет убытков и возможных летальных исходов. Основные операции, предусмотренные действующими методиками оценки риска аварии: идентификация опасностей, определение сценариев развития аварии, оценка частоты возможных сценариев аварий, оценка возможных последствий аварий по рассматриваемым сценариям, расчет показателей риска аварии. Большинство методов, таких как HAZOP, FMEA, проверочный список, можно назвать скорее качественными. В результате получаем недопустимый для промышленности разброс оценок, достигающий 2–4-го порядка величины.

В статистике отсутствуют данные о техническом состоянии конкретного технического устройства, получаемые только при выполнении неразрушающего контроля (НК) и технического диагностирования (ТД).

Приближение размера дефекта к предельному значению, при котором происходит разрушение, увеличивает риск эксплуатации.

В соответствии с моделями механики разрушения объект, содержащий трещину, разрушается, когда коэф-

фициент интенсивности напряжений превышает критическое значение  $K_{Ic}$ . Это условие для трещины отрыва имеет вид:

$$K_I = q\sigma \sqrt{2\pi a} \geq K_{Ic}, \quad (2),$$

где  $a$  – глубина трещины,  $q$  – коэффициент, определяемый видом нагружения, размерами и формой конструкции,  $\sigma$  – приложенное напряжение, а величина  $K_{Ic}$  определяется прочностными свойствами материала. При постоянной нагрузке и увеличении размера дефекта неопределенность момента разрушения (вероятность разрушения) связана<sup>1</sup> с неопределенностью знания свойств материала ( $K_{Ic}$ ) и ошибками измерения размеров трещины  $a$ .

Увеличение вероятности разрушения при увеличении размера дефекта с учетом разброса измеренной величины дефекта  $\hat{a}$  и критической величины дефекта  $a_c$ , определяемой механическими свойствами материала  $K_{Ic}(a_c)$  схематично представлено на рисунке 1. Степень опасности, например, самого коварного дефекта – трещины можно оценить, сравнивая глубину трещины  $a$  с критической глубиной для данного объекта –  $a_c$ . Критическая величина трещины соответствует величине, при которой происходит хрупкое (или квазихрупкое) разрушение объекта (точка  $Fr$  на рисунке 1). Эта величина определяется методами механики разрушения из соотношения (2).

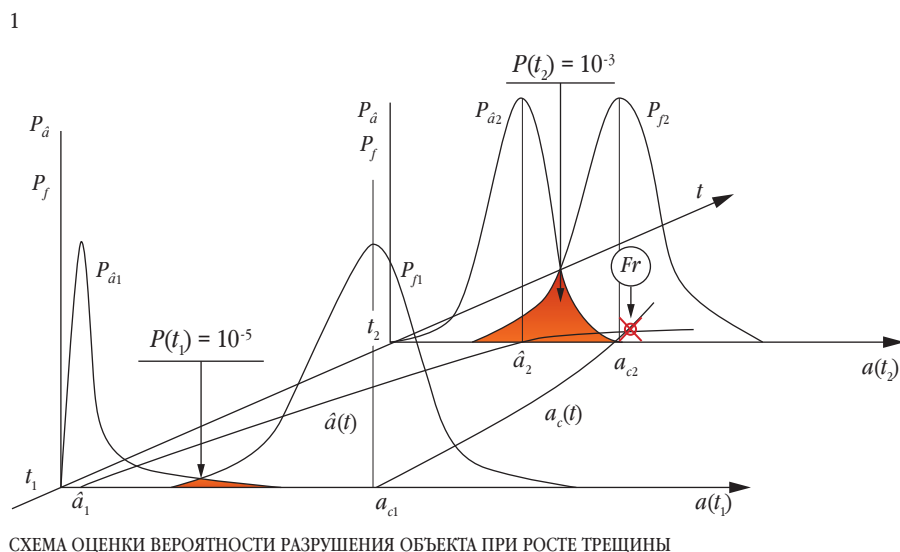
В момент  $t_1$  глубина трещины равна  $a_1$  (измеренная величина  $\hat{a}_1$ ). При этом необходимо учитывать неопределенность знания размеров трещин, которая задается функцией плотности вероятности  $P_{\hat{a}_1}$ . Разброс свойств материала объекта описывается плотностью распределения критического размера трещины  $P_L$ . При этом вероятность разрушения  $P(t_1)$  определяется площадью под пересекающимися кривыми плотностей веро-

<sup>1</sup> Nevile D.J., Knott J.F. Statistical distributions of toughness and fracture stress homogeneous

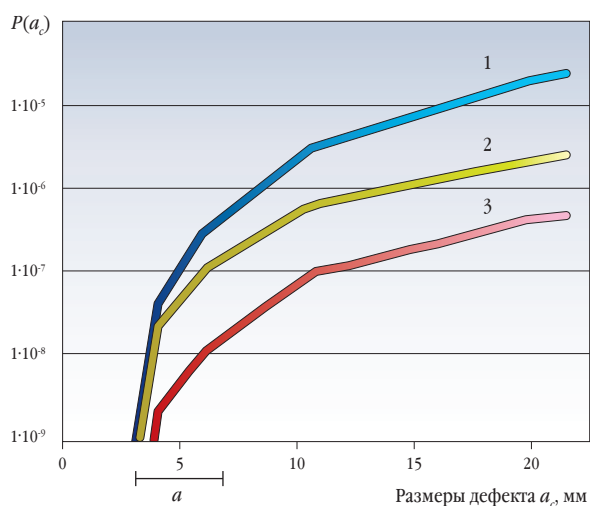
and inhomogeneous materials // J. Mech. Phys. Solids. 1986. Vol. 34. №3. P. 243–291;

Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ

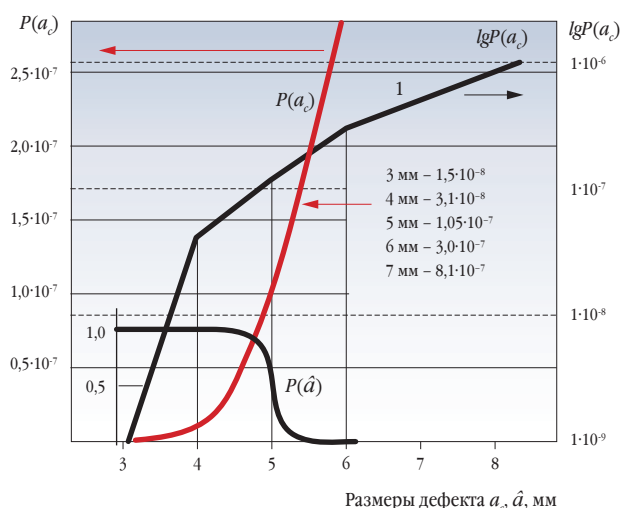
конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.



2



А. ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОБЪЕКТА (РЕАКТОР ВВЭР АЭС)  $P(a_c)$  ОТ ВЕЛИЧИНЫ ДЕФЕКТА КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА  $a_c$



Б. ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ РЕАКТОРА  $P(a_c)$  И ВЕРОЯТНОСТЬ  $P(\hat{a})$  НЕПРЕВЫШЕНИЯ ИЗМЕРЕННОГО РАЗМЕРА ДЕФЕКТА  $\mu = 5$  ММ

ятности  $P_{\hat{a}1}$  и  $P_{f1}$ . Положим,  $P(t_1) = 10^{-5}$ . Со временем трещина увеличивается в размере по закону  $\hat{a}(t)$ , свойства материала несколько деградируют, а критический размер  $a_c(t)$  уменьшается. При этом увеличивается вероятность разрушения до величины, например,  $P(t_2) = 10^{-3}$ , как изображено на рисунке 1. Когда размер трещины достигнет критической величины, то есть будет выполнено условие  $a(t) = a_c(t)$ , объект разрушится.

Таким образом, необходимость количественной оценки (измерения) риска и рассмотренная схема инициируют «ударное и реальное» (burst and real) использование ряда параметров и показателей НК, которые ранее были придуманы, но не нашли достаточно широкого применения на практике. К таким показателям надежности и достоверности применяемых методов НК

относятся показатели a-hat-versus-a-graph ( $a \rightarrow \hat{a}$ -graph), graphs Po Dand ROC.

В первую очередь рассмотрим использование измеренного размера дефекта  $\hat{a}$  для оценки вероятности разрушения объекта. Полученные при выполнении НК размеры дефектов используются затем для расчета прочности объекта. Чтобы оценить вероятность разрушения объекта, необходимо использовать зависимости вероятности разрушения от критической величины дефектов  $a_c$ . Например, в литературе приведены результаты расчетов  $P(a_c)$  для различных объектов АЭС<sup>2</sup>. На рисунке 2А представлены зависимости вероятности разрушения корпуса атомного реактора от величины дефекта  $a_c$ , где кривая 1 – консервативная оценка, 2 – реалистическая оценка, 3 – оптимистическая оценка, 4 – допустимый

<sup>2</sup> Махутов Н.А., Фролов К.В., Драгунов В.Г. и др. Анализ риска и по-

вышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов /

под ред. Н.А. Махутова и М.М. Галенина. М.: Наука, 2009. 499 с.



## МАТРИЦА ДОСТОВЕРНОСТИ

Метод НК и оценка его результатов для $n\Sigma$ ( $n\Sigma$ – общее количество испытаний объектов)		Оценка результатов НК	
		Количество объектов, принятых в соответствии с результатами НК, – $n_a$	Количество объектов, отклоненных в соответствии с результатами НК, – $n_r$
Метод НК	Количество объектов, принятых в соответствии с методом испытаний НК, – $n_a$	Принимаемые два раза (по методу и результатам) – $n_{aa}$	Принимаемые методом испытаний, но отвергнутые по результатам – $n_{ar}$
	Количество объектов, отклоненных в соответствии с методом испытаний НК, – $n_r$	Отвергнутый методом испытаний, но принимаемый по результатам (неполный отказ) – $n_{ra}$ (ложная тревога)	Отклонено дважды (правильный отказ) – $n_{rr}$

уровень вероятности разрушения ( $10^{-7}$  на реактор в год). Отметим, что кривые, подобные приведенным на рисунке 2А, следует рассчитывать для каждого объекта, риск разрушения которого необходимо определить.

При оценке вероятности разрушения с использованием измеренного размера дефекта необходимо учитывать ошибки измерений. Схема учета указанных ошибок приведена на рисунке 2Б. Если ошибки распределены по нормальному закону, то вероятность того, что истинный размер дефекта не превышает среднего значения, определяется выражением:

$$P(\hat{a}) = 1 - \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\hat{a} - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (3),$$

где  $\mu$  – среднее значение измеренного размера дефекта,  $\sigma^2$  – дисперсия. Таким образом, измерив глубину трещины  $\hat{a}$ , и используя  $P(\hat{a})$  (кривая 2 на рисунке 2Б), можно оценить вероятность разрушения объекта, используя выражение:

$$P_f = P(\hat{a}) \times P(a_c) \quad (4).$$

Чтобы реализовать схему, изображенную на рисунках 1 и 2, необходимо иметь информацию о дефектности объекта, полученную с использованием следующих характеристик НК:

1. Калибровочная характеристика – характеристика дефектометрической корреляции, представляющая собой зависимость, связывающую реальные размеры дефектов и приборные показания размеров дефектов ( $a \rightarrow \hat{a}$ -graph).
2. Вероятность обнаружения дефекта PoD (выявляемость) и, соответственно, вероятность пропуска дефекта ( $1 - P_{од}$ ).

## 3. Диаграмма информативности НК (ROC-диаграмма).

В отечественной практике эти диаграммы представляют в форме «матрицы достоверности» (табл. 1).

Основной показатель НК, с помощью которого в настоящее время непосредственно оценивают вероятность разрушения объекта, – калибровочная характеристика. Она позволяет по показанию системы НК определить параметры дефектов. Для этого необходима предварительная информация о  $P(a_c)$ , а также значения величин  $\mu$  и  $\sigma$ . Эти величины должны быть известны предварительно для конкретного оборудования НК и системы контроля (включая объект контроля) в целом.

Следует отметить, что, как правило, измеренные размеры дефектов имеют значительный разброс, который необходимо учитывать при оценке вероятности разрушения.

Другая важная характеристика, способная повлиять на оценку вероятности разрушения объекта, – вероятность обнаружения дефекта PoD, которая к тому же служит показателем качества системы НК (система включает применяемые методики, прибор, квалификацию оператора). Если обнаружился относительно крупный дефект, вероятность разрушения оценивают описанным выше способом. Вероятность присутствия в объекте двух дефектов, каждый из которых существенно влияет на прочность объекта, весьма мала. Разрушение объекта, как правило, происходит в результате развития одной трещины максимального размера<sup>3</sup>. Но, построив зависимость PoD в координатах  $OPoD-a/a_c O(a_c = a_f$  – размер дефекта, при котором разрушается объект) или в координатах  $OPoD-a/tO$ , где  $t$  – толщина стенки объекта, получаем возможность оценить вероятность присутствия необнаруженного дефекта катастрофического размера.

<sup>3</sup> Иванов В.И., Куранов В.Н., Рябов А.Н. цикловой усталости // Доклады АН СССР. 1986. Т. 288. №6. С. 1335–1338. Об акустической эмиссии при мало-



Следующая важная характеристика системы НК – ROC-диаграмма (Receiver Operation Characteristic). Это название пришло из радиолокации (1940-е годы). Мы ее называем диаграммой информативности НК. Диаграмма информативности содержит наиболее полную информацию, характеризующую уровень компетентности системы НК. Она объединяет PoD и PfD, то есть вероятность ложного обнаружения – показание дефекта при отсутствии дефекта.

Используя приведенную выше матрицу, показатель достоверности определяют числом правильных решений ( $n_{aa} + n_{rr}$ ) при выполнении  $n_{\Sigma}$  контролей и вычисляют по формуле:

$$R(\text{Reliability}) = \frac{n_{aa} + n_{rr}}{n_{\Sigma}} \quad (8).$$

Диаграммы PoD( $a$ ) и ID-ROC в практике промышленного НК пока не нашли широкого применения. Однако, по нашему мнению, их применение неизбежно, хотя оно потребует значительных затрат и повышения культуры НК. Можно констатировать, что научная база НК и ТД, а также методические аспекты проработаны в степени, позволяющей адекватно использовать такие показатели, как калибровочная характеристика, показатель выявляемости и диаграмма информативности при оценке риска аварии. Но для реального освоения этих новых подходов и их практического использования необходимо создавать соответствующие методические документы-стандарты.

В качестве заключения отметим, что использование количественной оценки риска с применением подхода: НК → ТД → РИСК (QRA – Quantitative Risk Assessment) представляется весьма актуаль-

ным. Поэтому необходимо включать в практику те методики оценки промышленной безопасности, которые ранее были придуманы, но практически не использовались ( $a \rightarrow \hat{a}$ -график, PoD, ROC, показатель надежности). А использование методов НК → ТД позволяет существенно, на несколько порядков повысить точность оценки риска. Тогда оценка промышленной безопасности фактически получает статус измерительного процесса, где измеряемой величиной становится промышленная безопасность.

Использование НК → ТД при оценке риска аварии позволяет:

1. Сделать показатель величины риска действительно количественной характеристикой промышленной безопасности и существенно уменьшить погрешность измерения и расчета риска аварии.
2. Придать импульс дальнейшему развитию количественных методов оценки (измерения) риска и использования наработанных в лабораториях методик в области НК → ТД в промышленности.
3. Оптимизировать затраты на обеспечение промышленной безопасности и ввести в практику количественное обоснование оптимальных затрат.

В случаях, когда обнаружен дефект, размером превышающий нормы браковки, следует проводить экспертный НК. По его результатам, после того как используется металлографический анализ, проверяется коррозионное состояние и применяются методы механики разрушения, уже определяют необходимость ремонта либо возможность и сроки дальнейшей эксплуатации. Это позволит сократить время простоя и отменить напрасные работы по ремонту технических устройств.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР ЗАО «ГИАП-ДИСТЦЕНТР»

Виктор Владимирович Мусатов

ЧЛЕН ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

НИИИИ МНПО «СПЕКТР»

Валерий Иванович Иванов

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА

ЗАО «ГИАП-ДИСТЦЕНТР»

Александр Анатольевич Сазонов