

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПН-1.1 И СРАВНЕНИЕ ЕГО С МЕТОДИКОЙ А.Р. РЖАНИЦЫНА

А.Ю. КУЗЬМИЧЕВСКИЙ, инженер
А.Ф. ГЕТМАН, д-р техн. наук, профессор
Москва, ул. Ферганская, 25, ВНИИАЭС

Описан метод оценки ресурса оборудования и трубопроводов АЭС в вероятностном аспекте. Метод является развитием классического подхода Ржаницына А.Р. к определению вероятности разрушения конструкции при статических нагрузках. Он позволяет учитывать качество конструкций, оборудования и трубопроводов по критерию их дефектности, в том числе после проведения неразрушающего контроля и ремонта выявленных дефектов. На основе метода разработан один из модулей вычислительного комплекса на основе Maple 12, позволяющий проводить расчет вероятностей разрушения, течей и дефектов оборудования и трубопроводов АЭС, оптимизацию их неразрушающего контроля и технического обслуживания во время эксплуатации. Даны примеры оценки ресурса и вероятности разрушения элементов оборудования АЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка ресурса оборудования, вероятность разрушения конструкций, статические нагрузки, вычислительный комплекс, АЭС.

На статистический разброс характеристик прочности и ресурса конструкции оказывает влияние большое число факторов. Однако можно выделить несколько факторов, которые оказывают решающее влияние. К таким факторам можно отнести статистический разброс прочностных характеристик материала, характеристик условий эксплуатации, прежде всего термосиловых и коррозионных, а также характеристик остаточной дефектности материала конструкций, если она содержит сварные соединения, литые или другие элементы, в которых под действием технологии изготовления или условий эксплуатации могут возникнуть несплошности. В методике учитывают законы распределения прочностных свойств, нагрузки, дефектов, а также влияние цикличности приложения нагрузки, влияние коррозионной среды и механизмов разрушения [1].

Основное уравнение для вычисления вероятности разрушения P_p имеет вид:

$$P_p = \iiint_{\omega} \rho(x_1) \rho(x_2) \rho(a) da dx_1 dx_2, \quad (1)$$

где $\rho(x_1)$ – дифференциальная функция распределения прочностной характеристики, конкретный вид которой зависит от критерия прочности или критерия разрушения; $\rho(x_2)$ – дифференциальная функция распределения характеристики нагружения, конкретный вид которой зависит также от критерия прочности и условий эксплуатации; a – характеристический размер дефекта; ω – область интегрирования, зависит от используемых критериев прочности или критериев разрушения. Для каждого механизма разрушения (хрупкое, вязкое и квази-хрупкое) обобщенное уравнение имеет собственный вид. Например, если конструкция находится в состоянии, при котором возможно хрупкое разрушение, и имеется вероятность существования в ней несплошностей, то вероятность хрупкого разрушения такой конструкции можно описать уравнением [1]:

$$P_p = \int_{K_{1c \min}^*}^{K_{1c \max}^*} \rho_{K_{1c}}(K_{1c}) \int_{\sigma_{\min}^*}^{\sigma_{\max}} \rho_{\sigma}(\sigma) P_a(a \geq a_{kp}) d\sigma dK_{1c}, \quad (2)$$

в котором $\rho_{K_{1c}}$ и ρ_{σ} – функции плотности вероятностей соответственно критических коэффициентов интенсивности напряжений K_{1c} и эксплуатационного напряжения σ ; P_a – интегральная функция вероятностей существования в рассматриваемом оборудовании трещины размером, не меньше a .

Область интегрирования в выражении (2) определяется условием

$$f_1 \sqrt{\pi a} > K_{1c}, \quad (3)$$

в котором f_1 – функция, зависящая от формы трещины, места ее расположения в конструкции и их геометрических размеров. Использование условия (3) дает следующие выражения для пределов интегрирования:

$$K_{1c \max}^* = \sigma_{\max} f_1 \sqrt{\pi a_{\max}}, \quad \sigma_{\min}^* = K_{1c} / (f_1 \sqrt{\pi a_{\max}}), \quad a_{kp} = K_{1c}^2 / (\pi f_1^2 \sigma^2). \quad (4)$$

При этом σ_{\max} – максимально возможное эксплуатационное напряжение; a_{\max} – максимально возможный в рассматриваемом оборудовании дефект; $K_{1c \min}$ – нижняя граница для возможных значений коэффициента интенсивности напряжений. Функции $\rho_{K_{1c}}$ и ρ_{σ} могут быть описаны уравнениями типа нормального закона Гаусса. При стремлении дисперсии к нулю нормальное распределение стремится к δ – функции. В этом случае из уравнения (2) можно получить более простые выражения:

$$P_p = \int_{K_{1c \min}^*}^{K_{1c \max}^*} \rho_{K_{1c}}(K_{1c}) P_a(a \geq a_{kp}) dK_{1c} \quad \text{при отсутствия разброса } \sigma; \quad (5)$$

$$P_p = \int_{\sigma_{\min}^*}^{\sigma_{\max}} \rho_{\sigma}(\sigma) P_a(a \geq a_{kp}) d\sigma \quad \text{при отсутствия разброса } K_{1c}; \quad (6)$$

$$P_p = P_a(a \geq a_{kp}) \quad \text{при отсутствии разброса } K_{1c} \text{ и } \sigma. \quad (7)$$

В последнем выражении в наиболее простом виде проявляется прямая связь между неразрушающим контролем, остаточной дефектностью и прочностью. Если в конструкции отсутствуют дефекты, то из уравнения (2) выпадает член, связанный с размером дефекта. Например, для вероятности разрушения бездефектной конструкции с критерием прочности материала в виде предела текучести σ_T и случайной статической нагрузкой, характеризуемой напряжением σ , получим:

$$P_p = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \rho_{\sigma_m}(\sigma_m) \int_{\sigma_m}^{\sigma_{\max}} \rho_{\sigma}(\sigma) d\sigma d\sigma_m. \quad (8)$$

Видно, что в этом случае получено описание модели Ржаницина А.Р. [2].

При использовании описанной выше методики расчетов был разработан один из модулей программного комплекса ПН-1.1 (Определение вероятности разрушения, течей и дефектов оборудования и трубопроводов АЭС, оптимизация их неразрушающего контроля и технического обслуживания во время эксплуатации) предназначенный для расчета вероятности разрушения. Один из результатов расчета с использованием этого модуля приведен ниже для случая определения вероятности разрушения в задаче А.Р. Ржаницина [2].

Сравнение результатов расчета по двум методикам проведем на примере расчета стальных конструкций.

Расчет стальных конструкций по методу А.Р. Ржаницина [2].

В соответствии концепцией допускаемого напряженно-деформированного состояния условие прочности записывается в виде:

$$\left(\begin{array}{l} \text{напряженно-деформированное} \\ \text{состояние элемента конструкции} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{l} \text{допускаемая в эксплуатации характеристики} \\ \text{напряженно-деформированного состояния} \end{array} \right).$$

Простейшим примером такого условия может служить формула прочности растянутого стержня

$$R = \sigma_{np} - N/F > 0, \quad (9)$$

где N – растягивающее усилие; F – площадь сечения стержня; σ_{np} – предел прочности материала стержня.

В общем случае условие (1) можно записать в виде:

$$R(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0, \quad (10)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n представляют собой некоторые расчетные величины. Каждая из расчетных величин x_1, x_2, \dots, x_n может иметь некоторые отклонения от своего среднего (ожидаемого) значения, и эти отклонения могут быть охарактеризованы какой-то функцией распределения их $p_z(x_1, x_2, \dots, x_n)$, полученной статистическим путем или на основании теоретических соображений. От этой функции можно перейти к кривой распределения R при помощи формулы

$$p_R = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{(n-1 \text{ раз})} \dots \int \frac{dR}{dx_1} p_z(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_2 dx_3 \dots dx_n. \quad (11)$$

Остается определить вероятность невыполнения неравенства (10) или, что то же, вероятность выполнения условия разрушения

$$R(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0. \quad (12)$$

Зная кривую p_R , это сделать очень легко. Достаточно только проинтегрировать ее от минус бесконечности до нуля, т. е. определить ординату интегральной кривой распределения R для значения $R = 0$:

$$V = \int_{-\infty}^0 p_R dR = P_R(0). \quad (13)$$

Здесь V означает вероятность разрушения. В общем случае произвольной функции распределения r и q вероятность разрушения V может быть определена

$$p_R = \int_{-\infty}^{\infty} p(R+q, q) dq,$$

$$V = P_R(0) = \int_{-\infty}^0 p_R dR = \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^{\infty} p(R+q, q) dq dR = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{r=q} p(r, q) dr dq. \quad (14)$$

Таким образом, функцию распределения $p(r, q)$ следует интегрировать в плоскости r, q по площади, лежащей ниже прямой $r = q$. Практически это сделать нетрудно численным путем, так как значения функции $p(r, q)$ во всех направлениях довольно быстро затухают.

В стальных конструкциях условно за разрушающее напряжение принимают предел текучести σ_T . Допускаемое напряжение в конструкциях $[\sigma]$ определяется коэффициентом запаса прочности, которой в разных нормативных документах может иметь разное значение, например для стали марки Ст. 3 принимали 1400 кг/см^2 , а затем было повышено до 1600 кг/см^2 . Предполагалось, что в первом случае обеспечивался запас прочности относительно минимального предела текучести 2200 кг/см^2 : $2200/1400 = 1,57$; а во втором $2200/1600 = 1,37$.

В описанном выше подходе запас прочности должен исчисляться не относительно минимального, а относительно среднего ожидаемого предела текучести. Для определения последнего будем исходить из фактической кривой распределения пределов текучести для стали марки Ст. 3 (рис.1). Обработывая эту кривую, получаем для предела текучести

$$m_{\sigma_T} = 2663 \text{ кг/см}^2; \quad \sqrt{D_{\sigma_T}} = 284 \text{ кг/см}^2.$$

Коэффициент вариации предела текучести, таким образом, равен

$$A_r = A_{\sigma_T} = 284/2663 = 0,106.$$

Коэффициенты запаса по отношению к ожидаемому пределу текучести будут: $2663/1400 = 1,90$ и $2663/1600 = 1,67$.

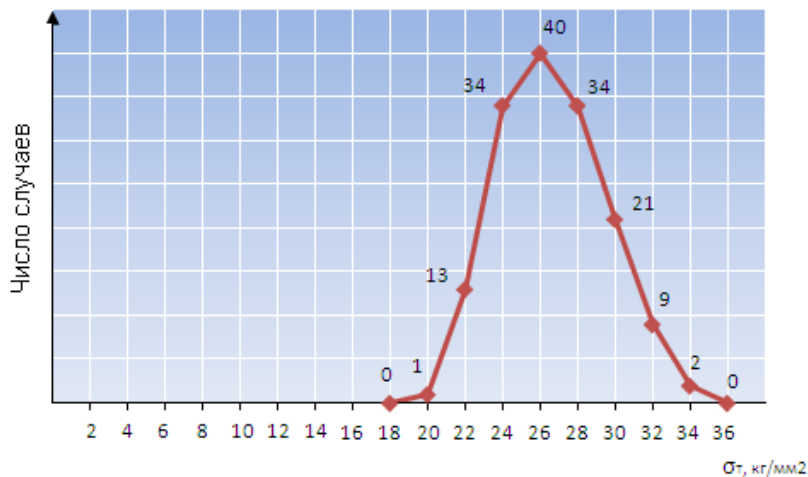


Рис. 1. Кривая распределения пределов текучести стали марки Ст. 3

При этом допускаемое напряжение принимаем за ожидаемое напряжение в опасном сечении при заданной нагрузке. Однако расчетчики иногда несколько преувеличивают нагрузки и сечения при проектировании, и поэтому ожидаемое

напряжение будет несколько меньше. Учет этого обстоятельства может быть сделан лишь после статистической обработки физических опасных напряжений в конструкциях.

Примем коэффициент вариации нагрузки $A_q = 0,100$, т. е. примерно такой же, как и для прочности материала σ_T . Корреляцию между нагрузкой и прочностью будем считать равной нулю. Тогда характеристики безопасности и вероятности разрушения для обоих рассматриваемых случаев можно определить по формулам:

$$\text{при } [\sigma] = 1400: \quad \gamma = \frac{1,90 - 1,0}{\sqrt{0,106^2 \cdot 1,90^2 + 0,1^2}} = 4; \quad V = 0,000032;$$

$$\text{при } [\sigma] = 1600: \quad \gamma = \frac{1,67 - 1,0}{\sqrt{0,106^2 \cdot 1,67^2 + 0,1^2}} = 3,3; \quad V = 0,00045.$$

Отсюда следует, что повышение допускаемых напряжений на 200 кг/см² увеличило для данного случая вероятность разрушения примерно в 14 раз. Однако эта вероятность все же осталась достаточно малой. Фактическая вероятность разрушения будет еще меньше вследствие указанного выше уменьшения ожидаемого (расчетного) напряжения в опасном сечении по сравнению с допускаемым. Далее можно сделать вывод о том, что при расчете с подбором сечений дисперсия опасного напряжения будет больше, чем при проверочном расчете конструкций. Действительно, в первом случае отклонения напряжений зависят не только от отклонения внешней нагрузки от расчетной величины, как во втором случае, но и от ограниченности ассортимента размеров сечений элементов, которые может выбирать конструктор. Поэтому при расчете с подбором сечений изменчивость будет больше, и допускаемые напряжения должны быть ниже (при условии, что конструктор в равной мере отклоняется от допускаемых напряжений в обе стороны).

Определения вероятности разрушения конструкции по предлагаемой методике

Используя программный комплекс ПН-1.1 [3] проводился расчет на основании примера для расчета стальных конструкций по методу А.Р. Ржаницына (см. выше). В результате проведенных расчетов были получены вероятности разрушения при входных данных из примера А.Р. Ржаницына:

Расчет №1:

$\bar{\sigma}_T = 2663 \text{ кг/см}^2 \approx 266,3 \text{ МПа}$ – средний ожидаемый предел текучести,
 $\sqrt{D} \sigma_T = 284 \text{ кг/см}^2 \approx 28,4 \text{ МПа}$ – среднеквадратическое отклонение предела текучести; $\bar{\sigma} = 1400 \text{ кг/см}^2 \approx 140 \text{ МПа}$ – среднее значение напряжения;
 $\sqrt{D} \sigma = 140 \text{ кг/см}^2 \approx 14 \text{ МПа}$ – среднеквадратическое отклонение напряжения.

Расчет №2:

$\bar{\sigma}_T = 2663 \text{ кг/см}^2 \approx 266,3 \text{ МПа}$ – средний ожидаемый предел текучести,
 $\sqrt{D} \sigma_T = 284 \text{ кг/см}^2 \approx 28,4 \text{ МПа}$ – среднеквадратическое отклонение предела текучести; $\bar{\sigma} = 1600 \text{ кг/см}^2 \approx 160 \text{ МПа}$ – среднее значение напряжения;
 $\sqrt{D} \sigma = 160 \text{ кг/см}^2 \approx 16 \text{ МПа}$ – среднеквадратическое отклонение напряжения.

Получили вероятности разрушения при варьировании размаха распределения нагрузки и предела текучести.

Получили при допускаемых напряжениях в конструкциях $[\sigma] = 1400 \text{ кг/см}^2$ вероятность разрушения $P_p = 3,3 \cdot 10^{-5}$ и при $[\sigma] = 1600 \text{ кг/см}^2$ вероятность разрушения $P_p = 5,5 \cdot 10^{-4}$.

Расчет №1

	$2\sqrt{D}_\sigma$	$3\sqrt{D}_\sigma$	$4\sqrt{D}_\sigma$	$5\sqrt{D}_\sigma$	$6\sqrt{D}_\sigma$
$2\sqrt{D}_{\sigma_T}$	-	-	-	$0,2*10^{-10}$	$2,0*10^{-9}$
$3\sqrt{D}_{\sigma_T}$	-	$2,2*10^{-8}$	$1,4*10^{-6}$	$1,6*10^{-6}$	$1,6*10^{-6}$
$4\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$8,7*10^{-6}$	$1,9*10^{-5}$	$2,2*10^{-5}$	$2,2*10^{-5}$	$2,2*10^{-5}$
$5\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$2,0*10^{-5}$	$3,0*10^{-5}$	$3,2*10^{-5}$	$3,2*10^{-5}$	$3,2*10^{-5}$
$6\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$2,0*10^{-5}$	$3,0*10^{-5}$	$3,2*10^{-5}$	$3,3*10^{-5}$	$3,3*10^{-5}$

Расчет №2

	$2\sqrt{D}_\sigma$	$3\sqrt{D}_\sigma$	$4\sqrt{D}_\sigma$	$5\sqrt{D}_\sigma$	$6\sqrt{D}_\sigma$
$2\sqrt{D}_{\sigma_T}$	-	-	$9,2*10^{-6}$	$1,1*10^{-5}$	$1,1*10^{-5}$
$3\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$1,0*10^{-4}$	$2,1*10^{-4}$	$2,4*10^{-4}$	$2,5*10^{-4}$	$2,5*10^{-4}$
$4\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$3,2*10^{-4}$	$4,8*10^{-4}$	$5,2*10^{-4}$	$5,2*10^{-4}$	$5,3*10^{-4}$
$5\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$3,4*10^{-4}$	$5,1*10^{-4}$	$5,5*10^{-4}$	$5,5*10^{-4}$	$5,5*10^{-4}$
$6\sqrt{D}_{\sigma_T}$	$3,4*10^{-4}$	$5,1*10^{-4}$	$5,5*10^{-4}$	$5,5*10^{-4}$	$5,5*10^{-4}$

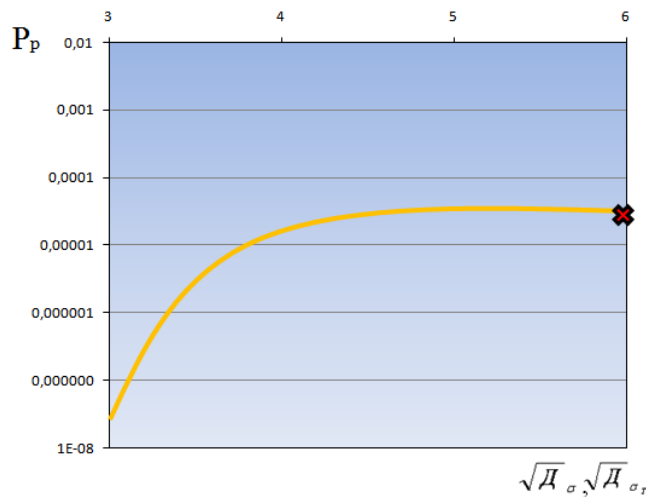


Рис. 2. Вероятность разрушения конструкции при $[\sigma] = 1400 \text{ кг/см}^2$

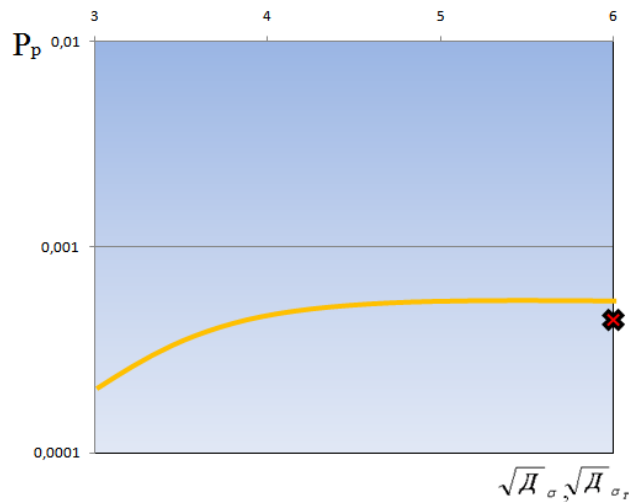


Рис. 3. Вероятность разрушения конструкции при $[\sigma] = 1600 \text{ кг/см}^2$

Полученные вероятности близки к результатам, полученными по методике А.Р. Ржаницына (отмечены крестиком на Рис. 2, 3), небольшое расхождение связано с возможным различием выбора среднеквадратичного отклонения во втором случае и погрешностью компьютерного (программа ПН-1.1) и расчета с использованием табличных значений [2].

Л и т е р а т у р а

1. *Гетман А. Ф., Козин Ю. Н.* Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. – М: Энергоатомиздат, 1997. – 288 с.
2. *Ржаницын А. Р.* Расчет Сооружений с учетом пластических свойств металлов. – 1979 г. – 236с.
3. *Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Кузьмичевский А.Ю.* Программный комплекс ПН-1.1 (Определение вероятности разрушения, течей и дефектов оборудования и трубопроводов АЭС, оптимизация их неразрушающего контроля и технического обслуживания во время эксплуатации), Москва, ВНИИАЭС.

CALCULATION OF PROBABILITY OF STRUCTURE DESTRUCTION BY MEANS OF THE SOFTWARE (PN-1.1) AND COMPARISON WITH RZHANITSYN'S METHODOLOGY

A. Kuz'michevskiy, A. Getman

The method of the resource estimation of equipment and pipelines of nuclear power plants in probability aspect is described. The method is development of the classical approach of A. Rzhanitsyn to definition of probability of destruction of a design at static loadings. The method allows to consider quality of designs, the equipments and pipelines by criterion of their faultiness, including after carrying out of non-destroying test and repair of the revealed defects. Based on the method developed by one of modules of the computer complex is based on the Maple 12 to carry out the calculation of the probability of destruction, leaks and defects in equipment and pipelines of nuclear power plant, optimization of non-destructive testing and maintenance during operation. There are examples of resource assessment and the probability of destruction of nuclear power plant equipment.

