

## Вероятностное моделирование предельных состояний и оценка ресурса и надежности трубопроводов\*

А. М. ЛЕПИХИН

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия*  
e-mail: ted@icm.krasn.ru

Е. В. МОСКВИЧЕВ

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*  
e-mail: jugr@icm.krasn.ru

In this paper, we present reliability estimation for the weld joints of pipelines with spill defects. Random distribution of loads and initial technological defects is taken into account in our study.

Трубопроводные системы относятся к числу наиболее протяженных и нагруженных инженерных коммуникаций. Аварии таких систем приводят к серьезным экономическим ущербам и экологическим потерям. Для предотвращения аварий ведутся глубокие исследования механизмов аварий, их причин и способствующих факторов. Особое внимание в этих исследованиях уделяется оценке опасности дефектов сварных соединений трубопроводов как основных источников разрушения [1–3].

Случайная природа дефектов, статистическая структурно-механическая неоднородность металла, разбросы характеристик механических свойств, пульсации рабочих давлений приводят к необходимости вероятностной постановки указанной задачи оценки опасности дефектов. В условиях многообразия типоразмеров труб, методов монтажа, неразрушающего контроля, условий эксплуатации, внешней среды наиболее эффективным методом ее решения является численное вероятностное моделирование предельных состояний сварных соединений.

Рассмотрим особенности такого моделирования на основе методов механики разрушения. Положим, что сварное соединение трубопровода содержит трещиноподобный дефект с характерными размерами  $l = \{l_x, l_y, l_z\}$ , причем  $l_z \ll l_x, l_y$ . Примем в качестве характеристики напряженного состояния на контуре дефекта коэффициент интенсивности напряжений (КИН):

$$K_i = \sigma_i \sqrt{\pi l_i} \varphi_i(\theta, l), i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  — действующие напряжения;  $l_i$  — размер дефекта;  $\varphi_i(\theta, l)$  — функция, зависящая от размера дефекта и угла  $\theta$ , определяющего положение расчетной точки на контуре дефекта.

Разрушение соединения происходит тогда, когда коэффициент интенсивности напряжений (1) достигает критического значения  $K_{ci}$ , определяемого характеристикой

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00477)

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

трещиностойкости материала. С учетом этого уравнение предельного состояния в параметрическом пространстве  $K_i$  в общем случае можно представить как

$$\sum_i \left( \frac{K_i}{K_{ci}} \right)^{\alpha_i} = 1, i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Вероятностная интерпретация данного соотношения приводит к выражению

$$P\{K_i \leq K_{ci}\} = \int_{\Omega_s} f(K_i) dK_i, \quad (3)$$

где

$$\Omega_s = \left\{ K \left| \sum_i \left( \frac{K_i}{K_{ci}} \right)^{\alpha_i} \leq 1 \right. \right\}.$$

Учтем возможность роста дефекта при циклическом нагружении в процессе эксплуатации трубопровода. Для этого положим, что  $K_i = K_i(N)$ , где  $N$  — число циклов нагружения. Тогда вместо (3) получаем

$$P\{K_i(N) \leq K_{ci}\} = \int_{\Omega_s} f_N(K_i) dK_i. \quad (4)$$

Решение задачи (4) в явном виде оказывается весьма затруднительным из-за сложности многопараметрических функций  $f(K_i)$  для реальных ситуаций. Дополнительные сложности связаны с необходимостью прогнозирования этих функций с учетом числа циклов нагружения. Поэтому более эффективно функцию  $P(N)$  вычислять методом статистических испытаний — методом Монте-Карло. Тогда алгоритм решения задачи заключается в многократной реализации выборочных значений параметров по заданным законам распределения вероятностей и определениям принадлежности рассматриваемого состояния области  $\Omega_s$ . Особенность задачи заключается в многомерности параметрического пространства. В этом случае использование стандартных одномерных генераторов случайных чисел приводит к нарушению условия равномерности заполнения пространства. В связи с этим для решения рассматриваемой задачи будем использовать генератор на основе ЛПТ-сеток, позволяющий получить равномерное заполнение области точек, независимых по координатам [4].

С учетом изложенного проведем вероятностный расчет кольцевого сварного соединения трубопровода и определим функции надежности и живучести.

Положим, что в сварном соединении имеется дефект в виде непровара в корне шва. Дефект схематизируем [5] поверхностной полуэллиптической поперечной трещиной, представленной на рис. 1.

Коэффициент интенсивности напряжений для рассматриваемой трещины [8] определим по формуле

$$K_I = \frac{2 - 0,82\alpha}{A} \sigma \sqrt{l} \left[ 1 - \frac{(1 - \sqrt{\alpha})}{\sqrt{hr}} \right],$$

где  $\alpha$  — отношение малой полуоси трещины к большой;

$$A = \left[ 1 - (0,89 - 0,57\sqrt{\alpha})^3 (l/h)^{1,5} \right]^{3,25};$$

$$\sigma = \frac{p(r-h)}{2h}.$$

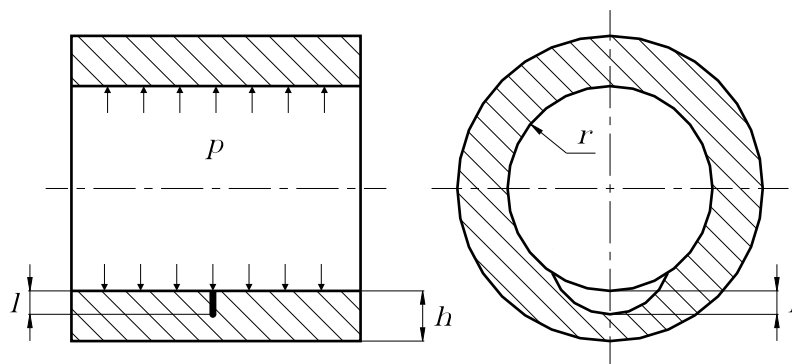


Рис. 1. Расчетная схема трубопровода с поперечной поверхностной полуэллиптической трещиной

Глубину трещины  $l$  примем случайной величиной, распределенной по закону [6]

$$F_l = 1 - \exp\left(-\left(\frac{l}{\theta_l}\right)^{\beta_l}\right),$$

где  $\theta_l$  и  $\beta_l$  — параметры распределения глубины трещины.

Для описания изменения амплитуды давления  $p$  используем распределение вида

$$F_p = 1 - \exp\left(-\left(\frac{p}{\theta_p}\right)^{\beta_p}\right),$$

где  $\theta_p$  и  $\beta_p$  — параметры распределения давления [7].

Для нахождения размера дефекта применим критерий критического коэффициента интенсивности напряжений, определяемый с учетом приведенной температуры хрупкости  $T_k$ , характеризующей состояние металла после длительного срока эксплуатации:

$$T_k = T_{ko} + \Delta T_{ko} (\tau/\tau^*)^{1/m} + \Delta T_e + \Delta T_k + \Delta T_t,$$

где  $T_{ko}$  — критическая температура хрупкости (КТХ) стали в исходном состоянии,  $T_{ko} = -32$  °С;  $\Delta T_{ko}$  — сдвиг КТХ в результате коррозионных повреждений за некоторое нормированное время  $\tau^*$ ;  $\tau$  — время эксплуатации конструкции;  $m$  — показатель степени в эволюционном соотношении;  $\Delta T_e$  — сдвиг КТХ, отражающий наличие упругой энергии сжатого газа;  $\Delta T_k = 30$  °С — температурный запас на сдвиг КТХ вследствие старения металла, циклических повреждений;  $\Delta T_t = 20$  °С — сдвиг КТХ при переходе от толщины испытанных образцов к толщине стенки трубопровода.

Область безопасных состояний определим введением коэффициента запаса по трещиностойкости (безопасности), уменьшающего критическую характеристику [9].

В качестве примера рассмотрим трубопровод из стали 17Г1С диаметром  $d = 1220$  мм и толщиной стенки  $h = 8$  мм с рабочим давлением  $p = 5.5$  МПа. Максимальная амплитуда давления не превышает 1.0 МПа, а число циклов за условный рабочий период составляет  $2.0 \cdot 10^4$ . В блоке схематизированного процесса нагружения около 80 % занимают амплитуды до 0.5 МПа, доля средних амплитуд от 0.5 до 1.0 МПа составляет 16.9 %, и амплитуды 1.2 МПа составляют 3.0 % [3]. В связи с этим параметры распределения давления приняты равными  $\theta_p = 1.52$ ,  $\beta_p = 0.48$ .

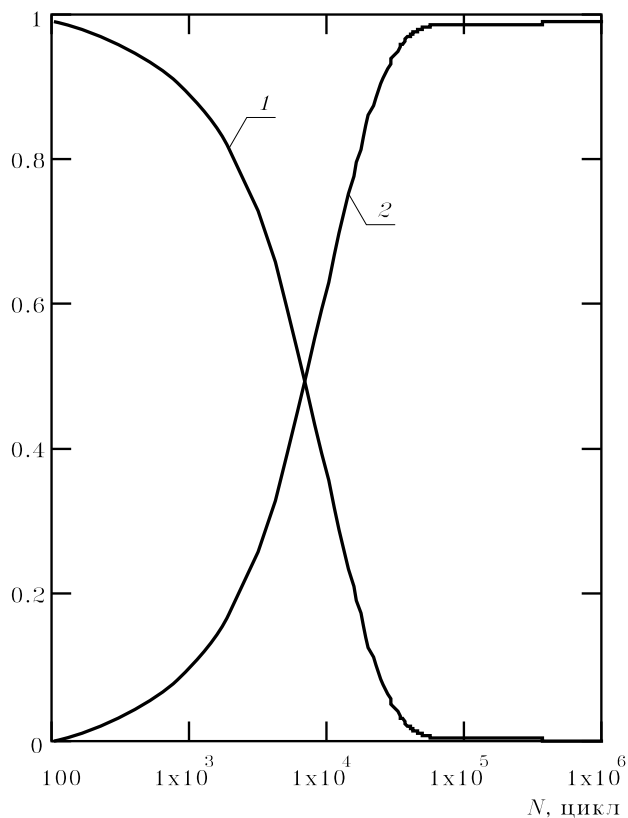


Рис. 2. Функция надежности (1) и функция живучести (2) кольцевого сварного соединения магистрального газопровода

Исследования характеристик дефектности сварных соединений в зависимости от способа сварки, проведенные в [6], позволили выбрать следующие значения параметров распределения для глубины рассматриваемой трещины:  $\theta_l = 2.0$ ,  $\beta_l = 2.0$ .

Расчеты по данному алгоритму позволили получить функцию надежности  $R(N)$  в следующей форме:

$$R(N) = \exp\{-\lambda N\}, \quad (5)$$

где  $\lambda = 1.02 \cdot 10^{-4}$  циклов $^{-1}$  — параметр аппроксимации (рис. 2).

На основании (5) функция распределения живучести  $F(N)$  будет иметь вид

$$F(N) = P\{K_I(N) > K_c\} = 1 - R(N) = 1 - \exp\{-\lambda N\}. \quad (6)$$

Полученные результаты показывают, что вероятность разрушения трубопровода по прошествии 20 лет эксплуатации (от  $1.5 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^4$  циклов) достаточно высока, что подтверждается анализом статистики отказов. Таким образом, предлагаемый подход позволяет проводить оценки надежности сварных соединений трубопроводов на основе статистических расчетов трещиностойкости с учетом случайной природы нагруженности и дефектности.

## Список литературы

- [1] МАЗУР И.И., ИВАНЦОВ О.М., МОЛДАВАНОВ О.И. Конструктивная надежность и экологическая безопасность трубопроводов. М.: Недра, 1990. 264 с.
- [2] БЕЗОПАСНОСТЬ трубопроводов при длительной эксплуатации / К.М. Гумеров, И.Ф. Гладких, Н.М. Черкасов и др. Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003. 327 с.
- [3] ПЕРМЯКОВ В.Н. Предельные состояния, прочность и ресурс сосудов и трубопроводов при штатных и аварийных ситуациях: Дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2001. 303 с.
- [4] СОБОЛЬ И.М., СТАТНИКОВ Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 186 с.
- [5] КАРЗОВ Г.П., ЛЕОНОВ В.П., ТИМОФЕЕВ Б.Т. Сварные сосуды высокого давления: Прочность и долговечность. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 287 с.
- [6] ВЕРОЯТНОСТНЫЙ риск-анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.П. Черняев. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.
- [7] МАХУТОВ Н.А., ПЕРМЯКОВ В.Н. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. Новосибирск: Наука, 2005. 516 с.
- [8] МР 108.7–86. Оборудование энергетическое. Расчеты и испытания на прочность. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений / НПО ЦНИИТМАШ. М.: Группа электрографии НПО ЦНИИТМАШ, 1986. 29 с.
- [9] МАТВИЕНКО Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.

*Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.*