

РАСЧЕТ РИСКА АВАРИИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ДЕФЕКТОМ ТИПА ОВАЛИЗАЦИИ

М.А. Пономарева

Балашовский институт (филиал) Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского
412300, Саратовская область, г. Балашов, ул. К. Маркса, 29

Одним из дефектов трубы, влияющих на напряженно-деформированное состояние, является овализация. Для расчета риска аварии с учетом овализации рассматривается нечетко-множественный подход, представлены основные функции принадлежности. В качестве нечеткого параметра выбрано внутритрубное давление. Рассчитано нечеткое значение напряженного состояния трубопровода, варианты подсчета риска. Риск аварии рассматривается как соотношение предельных показателей системы и реальных, в данном случае в качестве реального значения рассматривается нечеткое число $\sigma_{кц}$, а в качестве предельного – $[\sigma_{кц}]$. Таким образом, в статье предложен и обоснован альтернативный подход к оценке риска аварии линейной части магистрального трубопровода с учетом овализации, в котором параметр внутритрубного давления представлен в виде нечеткого числа.

Ключевые слова: *трубопровод, дефекты, овализация, напряженно-деформированное состояние, нечеткое множество, детерминированный подход, вероятностный подход, риск аварии, долговечность.*

Введение. В настоящее время большинство газопроводов в России эксплуатируется свыше 20-30 лет и приближается к исчерпанию своего ресурса. Переход отрасли от традиционного регламентного ремонтно-технического обслуживания газопроводов к эксплуатации по техническому состоянию предусматривает развитие системы диагностического обслуживания и разработку подходов, в том числе расчетных, к оценке работоспособности имеющих повреждения участков газопроводов для принятия решения о проведении выборочного ремонта [1].

При проведении внутритрубных обследований и визуального осмотра обнаруживаются дефекты геометрии поперечного сечения труб – вызванные механическими воздействиями нарушения формы поперечного сечения (наиболее распространенной из которых является овальность).

На сегодняшний момент существуют документы, регламентирующие овальность труб как на стадии проектирования, так и при эксплуатации. Наиболее распространенным и изученным является дефект геометрии трубы, при котором поперечное сечение имеет форму овала. При этом нарушение геометрии поперечного сечения вызывает изменение напряженного состояния трубы. Под действием рабочего давления в стенке трубы к номинальным напряжениям добавляются изгибные кольцевые напряжения, величина которых зависит от диаметра и толщины стенки трубы, физико-механических характеристик стали, рабочего давления, геометрии сечения.

Для оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода традиционно используются два подхода: детерминированный и вероятностный. Первый, наиболее распространенный, предполагает решение задачи в детерминированной постановке, когда значение долговечности трубопровода является заданной точеч-

ной величиной. Второй подход допускает, что долговечность является вероятностной величиной, распределенной по известному закону.

Указанные подходы предполагают наличие или полной информации о состоянии трубопровода, или информации о законе и параметрах распределения. В реальных ситуациях информация о процессах, происходящих в трубопроводах, является неполной, что ставит под сомнение целесообразность решения задачи в перечисленных постановках. В данной работе предлагается подход к решению задачи о расчете долговечности овализированного трубопровода на основе нечетких входных данных.

Постановка задачи. Оценка работоспособности участков газопроводов с овализацией по допускаемым напряжениям может проводиться вместо оценки по параметру овальности или служить ее дополнением с целью проверки полученных результатов.

Традиционно для предотвращения недопустимых пластических деформаций в этих опасных точках проводят проверку:

$$\sqrt{\sigma_{\kappa\zeta}^2 - \sigma_{\kappa\zeta} \sigma_{np} + \sigma_{np}^2} \leq R_2^H, \quad (1)$$

где R_2^H – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла трубы (предел текучести); $\sigma_{\kappa\zeta}$ и σ_n вычисляются соответственно.

$$\sigma_{np} = \mu \sigma_{\kappa\zeta} - E \alpha \Delta T; \quad (2)$$

$$\max \sigma_{\kappa\zeta} = \frac{p D_H}{2 \delta} \left[1 + \frac{6 \Delta}{\delta (1 + p)} \right]. \quad (3)$$

Рассмотрим частный случай. Когда величина температурного перепада, действующего на участок трубопровода, не превышает проектную величину, критерий может быть упрощен:

$$\sigma_{\kappa\zeta} \leq [\sigma_{\kappa\zeta}], \quad (4)$$

где допускаемые кольцевые напряжения определяются формулой

$$[\sigma_{\kappa\zeta}] = \frac{m}{0.9 k_H} R_2^H, \quad (5)$$

коэффициент m – коэффициент условий работы газопровода, а k_H – значение коэффициента надежности по назначению газопровода. Значения предела текучести металла R_2^H определяются по техническим условиям на поставку труб. Относительной величиной, характеризующей овальность трубы, является параметр овальности, равный отношению разности между наибольшим и наименьшим диаметром в одном сечении к номинальному диаметру:

$$\beta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_H} (\bar{p}_H + 1) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $\bar{p}_H$ – параметр давления, при котором проводились измерения, определяемый по формуле

$$\bar{p}_H = \frac{(1 - \mu^2)}{2E} \left(\frac{D_H}{\delta} \right)^3 p. \quad (7)$$

Однако давление в газопроводе не всегда является равным номинальному значению, и поэтому невозможно оценить точное значение кольцевого напряжения. Представим давление в трубопроводе в виде нечеткого числа. В качестве функции принадлежности выберем треугольный вид. Такие функции принадлежности применяются на практике довольно часто, что обусловлено их простотой. Существенным преимуществом многоугольных функций принадлежности является то, что для их определения требуется наименьший по сравнению с остальными функциями объем информации, который в данном случае ограничивается данными об угловых точках, что является весьма важным обстоятельством при моделировании систем в условиях ограниченности объема исходных данных. Чтобы определить многоугольную функцию принадлежности, на практике обычно требуется задать лишь модальное значение соответствующего нечеткого множества [2].

Для удобства расчета кольцевого напряжения представим нечеткое число (давление) в виде нечеткого числа (L - R) типа:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L((m-x)/a), \forall x \leq m, a > 0; \\ R((x-m)/b), \forall x \geq m, b > 0, \end{cases} \quad (8)$$

где m – среднее значение (мода) нечеткого числа; a, b – левый и правый коэффициенты нечеткости соответственно. Учитывая введенные обозначения, нечеткое число принято представлять в виде тройки параметров (m, a, b) .

Для расчета параметра давления

$$\bar{p} = 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D_H}{\delta} \right)^3 \cdot (m, a, b). \quad (9)$$

Заменим $2,21 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D_H}{\delta} \right)^3$ через переменную c , тогда $A=(c, 0, 0)$, так как

$$(A \cdot P) = (c, 0, 0) \cdot (m, a, b) = (cm, ca + m \cdot 0 - 0 \cdot a, cb + m \cdot 0 + 0 \cdot b); \quad (10)$$

$$(A \cdot P) = (c \cdot m, c \cdot a, c \cdot b), \quad (11)$$

рассчитаем кольцевое напряжение

$$\max \sigma_{\kappa\mu} = \frac{pD_H}{2\delta} \left[1 + \frac{6\Delta}{\delta(1 + \bar{p})} \right]. \quad (12)$$

Для удобства вычисления рассчитаем сначала

$$(1 + \bar{p}) = (cm + 1, ca + 1, cb + 1); \quad (13)$$

$$\delta(1 + \bar{p}) = (\delta(cm + 1), \delta(ca + 1), \delta(cb + 1)); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{6\Delta}{\delta(1 + \bar{p})} &= \left(\frac{6\Delta}{\delta(cm + 1)}, \frac{6\Delta \cdot \delta(cb + 1) + \delta(cm + 1) \cdot 0}{\delta(cm + 1) \cdot (\delta(cm + 1) + \delta(cb + 1))}, \right. \\ &\quad \left. \frac{6\Delta \cdot \delta(ca + 1) + \delta(cm + 1) \cdot 0}{\delta(am + 1) * (\delta(am + 1) - \delta(ca + 1))} \right) = \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &= \left(\frac{6\Delta}{\delta(cm + 1)}, \frac{6\Delta \cdot (cb + 1)}{\delta(cm + 1)(cm + cb + 2)}, \frac{6\Delta(ca + 1)}{\delta(cm + 1)(cm - ca)} \right); \\ \frac{pD_H}{2\delta} &= \left(\frac{mD_H}{2\delta}, \frac{aD_H}{2\delta}, \frac{bD_H}{2\delta} \right); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\sigma_{\kappa i} = \left(\frac{mD_n}{2\delta} \left(\frac{6\Delta}{(cm+1)\delta} + 1 \right), \frac{mD_n}{2\delta} \left(\frac{6\Delta(cb+1)}{\delta(cm+1)(cm+cb+2)} + 1 \right) + \frac{D_n a}{2\delta} \left(\frac{6\Delta}{\delta(cm+cb+2)} + 1 \right); \right. \\ \left. \frac{mD_n}{2\delta} \left(\frac{6\Delta(ca+1)}{(cm+1)(cm-ca)\delta} + 1 \right) + \frac{D_n b}{2\delta} \left(\frac{6\Delta}{\delta(cm-ca)} + 2 \right) \right). \quad (17)$$

Для оценки долговечности трубопровода введем понятие «риск аварии газопровода». Точного определения риска аварии с точки зрения нечетких множеств не существует, однако можно представить риск аварии как соотношение предельных показателей системы и реальных [3].

При наличии дополнительной информации о значениях параметра внутри интервала, когда, например, известно, что значение a более возможно, чем b , математическая формализация неопределенностей может быть адекватно реализована с помощью нечетко-интервального подхода. При использовании математического аппарата ТНМ экспертам необходимо формализовать свои представления о возможных значениях оцениваемого параметра в терминах задания характеристической функции (функции принадлежности) множества значений, которые он может принимать. После того как формализация входных параметров сложной системы (в рассматриваемом случае – ЛЧМГ) произведена, можно рассчитать распределение возможности $\mu_y(y)$ выходного параметра (показателя эффективности ИП) y по « α -уровневому принципу обобщения», или «принципу обобщения Заде».

Даже в простейшем случае состояние газопровода зависит от множества факторов – давления, радиуса трубы, толщины трубы, на которую влияет коррозия, и других. При этом целесообразно описать нормативное состояние газопровода с помощью аппарата нечеткой логики уже на стадии проектирования, так как в процессе эксплуатации эта величина σ_n будет изменяться. В то же время реальное напряженно-деформированное состояние σ_p будет также нечетким числом, так как влияние всех факторов на газопровод невозможно определить точным числом. В итоге будет получено два нечетких множества: σ_n и σ_p .

Перейдем к оценке собственно риска аварии линейной части магистрального газопровода. На рис. 1 представлены функции принадлежности σ_p и критериального σ_n значения.

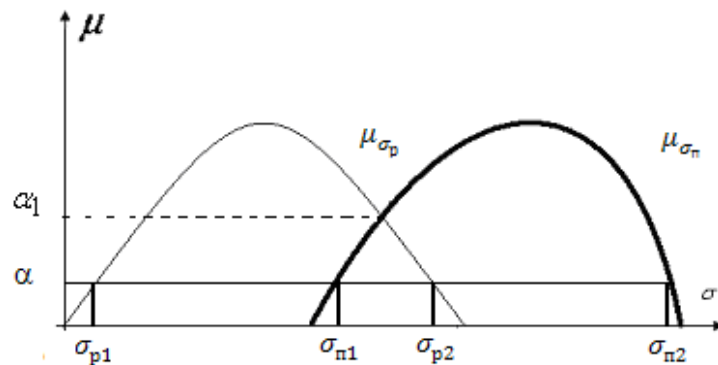


Рис. 1. Соотношение σ_p и σ_n

Точкой пересечения этих двух функций принадлежности является точка с ординатой α_1 . Выберем произвольный уровень принадлежности α и определим соответ-

ствующие интервалы $[\sigma_{p1}, \sigma_{p2}]$ и $[\sigma_{n1}, \sigma_{n2}]$. Уровень α_1 уместно назвать верхней границей зоны риска. При $0 \leq \alpha \leq \alpha_1$ интервалы пересекаются.

Рассмотрим возможные соотношения функций принадлежности σ_n и σ_p .

1. $\sigma_{p1} \geq \sigma_{n2}$, соотношение функций при этом показано на рис. 2.

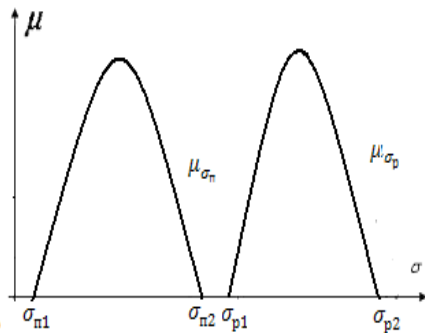


Рис. 2. Соотношение σ_p и σ_n

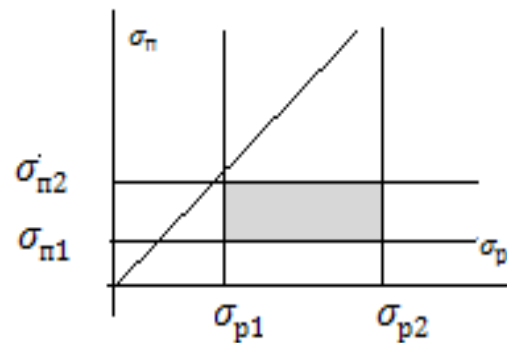


Рис. 3. Зона риска

На рис. 3 выделена зона риска, ограниченная прямыми $\sigma_n = \sigma_{n1}$, $\sigma_n = \sigma_{n2}$, $\sigma_p = \sigma_{p1}$ и $\sigma_p = \sigma_{p2}$ и биссектрисой координатного угла $\sigma_n = \sigma_p$. Взаимные соотношения параметров $\sigma_{n1,2}$ и $\sigma_{p1,2}$ дают следующий расчет для площади выделенной плоской фигуры:

$$S_\alpha = (\sigma_{p2} - \sigma_{p1})(\sigma_{n2} - \sigma_{n1}). \quad (18)$$

2. $\sigma_{n2} > \sigma_{p1} \geq \sigma_{n1}$, аналогично

$$S_\alpha = (\sigma_{p2} - \sigma_{p1})(\sigma_{n2} - \sigma_{n1}) - \frac{(\sigma_{n2} - \sigma_{p1})^2}{2}. \quad (19)$$

3. $\sigma_{p1} < \sigma_{n1}$, $\sigma_{p2} \geq \sigma_{n2}$, при этом

$$S_\alpha = (\sigma_{n2} - \sigma_{n1})(2\sigma_{p2} - 2\sigma_{p1} - \sigma_{n1} + \sigma_{n2}). \quad (20)$$

4. $\sigma_{p1} < \sigma_{n1} \leq \sigma_{p2}$, $\sigma_{p2} < \sigma_{n2}$, тогда

$$S_\alpha = \frac{(\sigma_{p2} - \sigma_{n1})^2}{2}. \quad (21)$$

5. $\sigma_{p2} \leq \sigma_{n1}$. При данном соотношении величин зона риска равна нулю, то есть $S_\alpha = 0$.

Поскольку все реализации (σ_p, σ_n) при заданном уровне принадлежности α равновозможны, то степень риска возникновения аварии на газопроводе $\varphi(\alpha)$ есть геометрическая вероятность события попадания точки (σ_p, σ_n) в зону риска:

$$\varphi(\alpha) = \frac{S_\alpha}{(\sigma_{n2} - \sigma_{n1})(\sigma_{p2} - \sigma_{p1})}. \quad (22)$$

Таким образом,

$$\varphi(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_{p1} \geq \sigma_{n2}; \\ \frac{2(\sigma_{n2} - \sigma_{n1})(\sigma_{p2} - \sigma_{p1}) - (\sigma_{n2} - \sigma_{p1})^2}{(\sigma_{n2} - \sigma_{n1})(\sigma_{p2} - \sigma_{p1})}, & \text{если } \sigma_{n2} > \sigma_{p1} \geq \sigma_{n1}, \sigma_{p2} \geq \sigma_{n2}; \\ \frac{2\sigma_{p2} - 2\sigma_{p1} - \sigma_{n1} + \sigma_{n2}}{(\sigma_{p2} - \sigma_{p1})}, & \text{если } \sigma_{p1} < \sigma_{n1}, \sigma_{p2} \geq \sigma_{n2}; \\ \frac{(\sigma_{p2} - \sigma_{n1})^2}{2(\sigma_{n2} - \sigma_{n1})(\sigma_{p2} - \sigma_{p1})}, & \text{если } \sigma_{p1} < \sigma_{n1} \leq \sigma_{p2}, \sigma_{p2} < \sigma_{n2}; \\ 0, & \text{если } \sigma_{p2} \leq \sigma_{n1}. \end{cases} \quad (23)$$

Тогда итоговое значение степени риска возникновения аварии

$$\text{Risk} = \int_0^{\alpha} \varphi(\alpha) d\alpha. \quad (24)$$

В данном случае в качестве σ_p рассматривается нечеткое число $\sigma_{кц}$, а в качестве σ_n – $[\sigma_{кц}]$. В важном частном случае, когда ограничение σ_n определено четко уровнем σ_n , предельный переход при $\sigma_{n1} \rightarrow \sigma_{n2} = \sigma_n$ дает

$$\varphi(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_{p1} < \sigma_n; \\ \frac{\sigma_{p2} - \sigma_n}{\sigma_{p2} - \sigma_{p1}}, & \text{если } \sigma_{p1} \leq \sigma_n \leq \sigma_{p2}; \\ 0, & \text{если } \sigma_{p2} < \sigma_n. \end{cases} \quad (25)$$

Анализ численных результатов. Для иллюстрации предложенной постановки рассмотрим конкретный пример.

Исходные данные: наружный диаметр $D_n=1220$ мм, номинальная толщина стенки $\delta_n=12$ мм, нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла (предел текучести) $R_2^H=362,6$ МПа (сталь 17Г1С), рабочее давление $p = 5,4$ МПа, участок трубопровода III категории.

Рассмотрим сначала детерминированный подход к оценке работоспособности по допустимым напряжениям.

1. В результате проведенных измерений при отсутствии давления в трубе получили:

$$D_{\max} = 1234 \text{ мм};$$

$$D_{\min} = 1208 \text{ мм}.$$

2. Измерения толщины стенки трубы дали результаты:

$$\delta=12 \text{ мм}.$$

3. Вычисляем параметр овальности β :

$$\beta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_n} 100\% = 2,13\%.$$

4. Вычисляем параметр давления:

$$\bar{p} = 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{D_n}{\delta} \right)^3 \cdot (m, a, b) = 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot 5,4 \left(\frac{1220}{12} \right)^3 = 12,54.$$

5. Определим коэффициент условий работы для трубопровода III категории $m=0,9$ и коэффициент надежности $k_n=1,05$. Согласно техническим условиям на трубы принимаем значение предела текучести равным 362,6 МПа.

$$6. [\sigma_{кц}] = \frac{m}{0,9k_n} R_2^n = \frac{0,9 \cdot 362,6}{0,9 \cdot 1,05} = 345,3.$$

7. Вычисляем Δ :

$$\Delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{4} = 6,5.$$

Вычисляем действующие кольцевые напряжения:

$$\sigma_{кц} = \frac{p D_n}{2\delta} \left[1 + \frac{6\Delta}{\delta(1+\bar{p})} \right] = \frac{5,4 \cdot 1220}{2 \cdot 12} \left[1 + \frac{6 \cdot 6,5}{12(1+12,54)} \right] = 340,4.$$

Рассчитаем нечеткое значение $\sigma_{кц}$. При давлении, представлено в L-R виде (5,4; 0,4; 0,6):

$$\sigma_{кц} = (340,2; 288; 354,98).$$

Для расчета риска найдем α_1 . Несложно вычислить α_1 как точку пересечения функции принадлежности $\sigma_{кц}$ и графика $[\sigma_{кц}]$. $\alpha_1=0,985$.

Тогда

$$\varphi(\alpha) = \frac{\sigma_{p2} - \sigma_n}{\sigma_{p2} - \sigma_{p1}} = \frac{695,18 - 345,3}{695,18 - 52,2} = \frac{349,88}{642,98} = 0,54;$$

$$\text{Risk} = \int_0^{\alpha} \varphi(\alpha) d\alpha = 0,54 \cdot 0,985 = 0,52.$$

При этом риск аварии равен 52 %, что можно определить как высокий. Таким образом, можно сделать вывод о том, что даже незначительный скачок давления в трубе может привести к значительному увеличению напряжения.

Заключение. В статье предложен и обоснован альтернативный подход к оценке риска аварии линейной части магистрального трубопровода с учетом овализации, в котором параметр внутритрубного давления представлен в виде нечеткого числа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рекомендации по оценке работоспособности дефектных участков газопроводов Р 51-31323949-42-99. – М., 1998. – 28 с.
2. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
3. Недосекин О.А. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. – СПб, 2002. – 468 с.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2011 г.

CALCULATION OF RISK OF ACCIDENT THE LINEAR PART OF MAIN PIPELINE WITH DEFECTS OF OVALITY

M.A. Ponomareva

Balashov Institute (Branch), Saratov State University named N.G. Chernyshevskogo
29, Marx st., Balashov, Saratov Region, 412300

One tube defects that affect the stress-strain state is ovalisation. To calculate the risk of an accident with a view ovalisation in this paper we consider the set-fuzzy approach, the main function of belonging. As the fuzzy parameter selected in-line pressure. Calculated fuzzy value of the stress state of the pipeline, the risk of counting options. The risk of accident is considered as the ratio of thresholds for the system and the real, in this case, the real value is considered a fuzzy number σ_{ku} , and as a limit $[\sigma_{ku}]$. Thus, the authors propose and justify an alternative approach to assessing the risk of failure of the linear part of the pipeline in view of ovalisation, in which the option is in-line pressure is represented as fuzzy numbers.

Keywords: *pipeline defects ovalisation, the stress-strain state, fuzzy set, a deterministic approach, a probabilistic approach, the risk of accidents, longevity.*