УДК 51-74.

М.А. Пономарева

Балашовский институт (филиал) Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, Балашов, Россия

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Анализ происшедших за последнее время аварий показал, что основными причинами, по которым произошли внезапные разрушения участков магистральных трубопроводов, это недоработки проектной и исполнительной документации, а также пластические деформации. В статье рассматривается возможность использования нечеткой логики для оценки пластической деформации линейной части магистрального трубопровода. В результате проведенных исследований было получено соотношение предельно допустимых значений напряжений линейной части магистрального трубопровода при пластической деформации при нечетких входных параметрах (в рассматриваемом случае – внутреннее давление).

Ключевые слова: магистральный трубопровод, нечеткое множество, риск аварии, пластическая деформация.

M.A. Ponomareva

Balashov Institute (Branch), Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Balashov, Russian Federation

THE EXTENT OF PLASTIC DEFORMATION OF THE LINEAR PART OF THE PIPELINE

An analysis of developments in recent years accidents showed that the main reasons why there have been sudden destruction of sites of pipelines are shortcomings of the design and as-built documentation, as well as plastic deformation. This article discusses the use of fuzzy logic to evaluate the plastic deformation of the linear part of the pipeline this research was obtained by the ratio of the maximum allowable stress values of the linear part of the pipeline during plastic deformation at the fuzzy input parameters (the present case - the internal pressure).

Keywords: main pipeline, a fuzzy set, the risk of an accident, plastic deformation.

В настоящее время благодаря развитию и использованию современных технических средств неразрушающего контроля удалось в значительной мере сократить количество аварий в системе трубопроводного транспорта [2]. Однако полностью предотвратить аварии на объектах системы магистральных трубопроводов не удаётся. Анализ происшедших за последнее время аварий показал, что основными причинами, по которым произошли внезапные разрушения участков магистральных трубопроводов, были сварные швы, различные строительные или ремонтные концентраторы напряжений (вмятины, накладки, приварные элементы и др.), недоработки проектной и исполнительной документации, а также пластические деформации [5]. Пластическая деформация – это вид деформации, при которой снятие нагрузки с деформируемого образца не вызывает полного восстановления его свойств и геометрических характеристик [4]. Для предотвращения недопустимых пластических деформаций подземных и наземных (в насыпи) трубопроводов проверку необходимо производить по условиям

$$\left|\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}}\right| \le \psi_3 \frac{m}{0,9k_{н}} R_2^{н}, \tag{1}$$

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}} \le \frac{m}{0,9k_{\text{н}}} R_2^{\text{н}},$$

где $\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}}$ – максимальные (фибровые) суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий; ψ_3 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние металла труб, при растягивающих продольных напряжениях ($\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}} > 0$) принимаемый равным единице, при сжимающих ($\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}} < 0$) – определяемый по формуле

$$\psi_3 = \sqrt{1 - 0,75\left(\frac{\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}}}{\frac{m}{0,9k_{\text{н}}} R_2^{\text{н}}}\right)^2} - 0,5\left(\frac{\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}}}{\frac{m}{0,9k_{\text{н}}} R_2^{\text{н}}}\right), \tag{2}$$

где m – коэффициент условий работы трубопровода; $R_2^{\text{н}}$ – нормативные сопротивления растяжению (сжатию) металла труб; $k_{\text{н}}$ – коэффициент надежности по назначению трубопровода; $\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}}$ – кольцевые напряжения от нормативного (рабочего) давления, МПа, определяемые по формуле

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}} = \frac{pD_{\text{вн}}}{2\delta}, \tag{3}$$

где p – рабочее давление; $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы.

Максимальные суммарные продольные напряжения $\sigma^{\text{н}}_{\text{кц}}$, МПа, определяются от всех (с учетом их сочетания) нормативных нагрузок и воздействий с учетом поперечных и продольных перемещений трубопровода в соответствии с правилами строительной механики [5]. При определении жесткости и напряженного состояния отвода следует учитывать условия его сопряжения с трубой и влияние внутреннего давления. В частности, для прямолинейных и упруго-изогнутых участков трубопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений трубопровода, просадок и пучения грунта максимальные суммарные продольные напряжения от нормативных нагрузок и воздействий – внутреннего давления, температурного перепада и упругого изгиба $\sigma^{\text{н}}_{\text{пр}}$, МПа, определяются по формуле

$$\sigma^{\text{н}}_{\text{пр}} = \mu\sigma^{\text{н}}_{\text{кц}} - \alpha_t E\Delta t \pm \frac{ED_{\text{н}}}{2\rho}, \tag{4}$$

где α_t – коэффициент линейного расширения металла трубы, град$^{-1}$; E – переменный параметр упругости (модуль Юнга), МПа; Δt – расчетный температурный перепад, принимаемый положительным при нагревании, °С; μ – переменный коэффициент поперечной деформации стали (коэффициент Пуассона); $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр; ρ – минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, см.

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 треугольного числа. Такие функции принадлежности применяются на практике довольно часто, что обусловлено их простотой [1]. 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 [3].

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

$$\mu_A(x)=\begin{cases}L((m-x)/a), \forall x\le m, a>0,\\ R((x-m)/b), \forall x\ge m, b>0,\end{cases} \tag{5}$$

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).

Тогда из (4) и (5) получим

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}}=\left(\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}}{2\delta};\frac{\alpha_{\text{р}}D_{\text{вн}}}{2\delta};\frac{\beta_{\text{р}}D_{\text{вн}}}{2\delta}\right), \tag{6}$$

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}}=\left(\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}}{2\delta}:\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}};\frac{\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}}{2\delta}\cdot 0+\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}}\cdot\frac{\alpha D_{\text{вн}}}{2\delta}}{\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}}\left(\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}}+0\right)};\frac{\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}}{2\delta}\cdot 0+\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}}\cdot\frac{\beta D_{\text{вн}}}{2\delta}}{\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}}\left(\frac{mR_2^{\text{н}}}{0,9k_{\text{н}}}-0\right)}\right)=$$

$$=\left(\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}};\frac{0,9k_{\text{н}}\alpha D_{\text{вн}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}};\frac{0,9k_{\text{н}}\beta D_{\text{вн}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right). \tag{7}$$

Возведем (7) в степень:

$$\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}^2}=\left(\left(\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)^2;\left(2\left(\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)\left(\frac{\alpha D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)-\left(\frac{\alpha D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)^2\right),\right.$$
$$\left.\left(2\left(\frac{m_{\text{р}}D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)\left(\frac{\alpha D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)+\left(\frac{\alpha D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}\right)^2\right)\right). \tag{8}$$

Заменим $\frac{D_{\text{вн}}0,9k_{\text{н}}}{2\delta mR_2^{\text{н}}}$ $=a$ и умножим на 0,75.

$$0,75\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}^2}=((0,75m_pa)^2;(1,5(m_pa)(\alpha a)-0,75(\alpha a)^2),$$
$$(1,5(m_pa)(\beta a)+0,75(\beta a)^2)). \tag{9}$$

Исходя из (2) и (9)

$$1-0,75\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}^2}=((1-0,75m_pa)^2;1,5am_pa\beta+0,75(a\beta)^2,$$
$$1,5am_p\alpha a-0,75(a\alpha)^2. \tag{10}$$

Для того чтобы найти квадратный корень из (10), найдем в соответствии с (2) значения x_1 и x_2 нечеткого множества, при котором функция принадлежности будет равна нулю:

$$x_1 = m - \alpha = 1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5 m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2,$$
$$x_2 = m + \beta = 1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5 m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2.$$

Найдем квадратный корень из получившегося выражения:

$$\begin{aligned} x_1 &= \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5 m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2}, \\ x_2 &= \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5 m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2}, \end{aligned} \qquad (11)$$

$$m = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}. \qquad (12)$$

После вычисления квадратного корня подставим (11), (12) в (5), для того чтобы привести нечеткое число в *L*-*R*-вид:

$$\alpha = m - x_1 = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5 m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2},$$

$$\beta = x_2 - m = \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5 m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}.$$

Умножим (7) на 0,5.

$$0,5\left(\frac{\sigma_{\text{кц}}^{\text{н}}}{\frac{m}{0,9k_{\text{н}}} R_2^{\text{н}}}\right) = (0,5 m_p a; 0,5\alpha a; 0,5\beta a).$$

Тогда (2) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \psi_3 = (&\sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - 0,5 m_p a; \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2} - \\ &-\sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 - 1,5 m_p a^2 \beta - 0,75(a\beta)^2} + 0,5\beta a; 0,5\alpha a + \\ &+\sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2 + 1,5 m_p a^2 \alpha - 0,75(a\alpha)^2} - \sqrt{1 - 0,75(m_p a)^2}). \end{aligned} \qquad (13)$$

Подставим в формулу (4) значения коэффициента ψ_3 (13):

$$\sigma_{\text{пр}}^{\text{н}} = \left(\mu \frac{m_p D_{\text{вн}} 0,9 k_{\text{н}}}{2\delta m R_2^{\text{н}}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho}; \mu \frac{\alpha D_{\text{вн}} 0,9 k_{\text{н}}}{2\delta m R_2^{\text{н}}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho}, \right.$$
$$\left. \mu \frac{\beta D_{\text{вн}} 0,9 k_{\text{н}}}{2\delta m R_2^{\text{н}}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho} \right).$$

Таким образом, с учетом преобразований формулу (1) можно представить следующим образом:

$$\left(\mu \frac{m_p D_{\text{вн}} 0,9 k_{\text{н}}}{2\delta m R_2^{\text{н}}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho}; \mu \frac{\alpha D_{\text{вн}} 0,9 k_{\text{н}}}{2\delta m R_2^{\text{н}}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho}; \right.$$
$$\mu \frac{\beta D_{\text{вн}} 0,9 k_{\text{н}}}{2\delta m R_2^{\text{н}}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\text{н}}}{2\rho}) \le \frac{m}{0,9 k_{\text{н}}} R_2^{\text{н}} (\sqrt{1 - 0,75 (m_p a)^2} - 0,5 m_p a;$$
$$\sqrt{1 - 0,75 (m_p a)^2} - \sqrt{1 - 0,75 (m_p a)^2 - 1,5 m_p a^2 \beta - 0,75 (a\beta)^2} + 0,5 \beta a;$$
$$\left. 0,5 \alpha a + \sqrt{1 - 0,75 (m_p a)^2 + 1,5 m_p a^2 \alpha - 0,75 (a\alpha)^2} - \sqrt{1 - 0,75 (m_p a)^2} \right).$$

В итоге мы получили соотношение предельно допустимых значений напряжений линейной части магистрального трубопровода при пластической деформации при нечетких входных параметрах (рассматриваемый случай – внутреннего давления).

Библиографический список

1. Абдулла-Заде Ф. Нечеткая логика Л-Заде [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ropnet.ru/ogonyok/win/199699/99-64-65.html, 2011.

2. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов: в 3 ч. Ч. 3. Диагностика и прогнозирование ресурса. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. – 291 с.

3. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798с.

4. Рекомендации по оценке работоспособности дефектных участков газопроводов Р 51-31323949-42-99. – М.: Газпром, 1998. – 28 с.

5. СНиП 2.05.06–85 (2000) Магистральные трубопроводы. – М.: 2000, 116 с.

References

1. Abdulla-Zade F. A Fuzzy Logic-Zadeh [*Nechetkaya logika L-Zade*]. available at: http://www.ropnet.ru/ogonyok/win/199699/99-64-65.html, 2011.

2. Lanchakov G.A., Zorin E.E., Stepanenko A.I. The efficiency of pipelines. In 3 part. Part 3. Diagnosis and prediction of resource [*Rabotosposobnost truboprovodov. V 3-kh ch. Ch. 3. Diagnostika i prognozirovanie resursa*]. Moscow, OOO «Nedra-Biznestsentr», 2003, Ch. 3, 291 p.

3. Pegat A. Fuzzy modeling and control [*Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009, 798 p.

4. Recommendations for the assessment of efficiency of defect sites pipeline [*Rekomendatsii po otsenke rabotosposobnosti defektnykh uchastkov gazoprovodov R 51-31323949-42-99*]. Moscow: OAO «Gazprom», 1998, 28 p.

5. Stroitelnye normy i pravila: SNiP 2.05.06–85 (2000) Pipelines [*Magistralnye truboprovody*], Moscow, 2000, 116 p.

Об авторе

Пономарева Марина Андреевна (Балашов, Россия) – аспирант кафедры прикладной информатики Балашовского института (филиала) Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (412300, Саратовская область, г. Балашов, ул. К. Маркса, 29, e-mail: mig0109@mail.ru).

About the author

Marina Ponomareva (Balashov, Russian Federation) – post graduate student of the Chair of Applied Informatics, Department of Mathematics, Economics and Informatics, Balashov Institute of Saratov State University, (412 300, Saratov region, Balashov, K. Marx Str., 29, Russian Federation, e-mail: mig0109@mail.ru).

Получено 10.02.2012