

М.Х. Султанов, д.т.н., профессор; А.В. Гаврилин; Е.Р. Утяшева, аспирант ГУП «Институт проблем транспорта энергоресурсов»; e-mail: ipter@anrb.ru

Новый подход и метод расчета трубопроводов на прочность и надежность

Статья посвящена вопросу расчета трубопроводов на прочность и надежность (безопасность, долговечность). Доказано, что переход от запаса прочности к запасу работоспособности позволяет выполнять расчеты проектируемых и эксплуатируемых трубопроводов как на прочность, так и на надежность. Статья направлена на совершенствование строительных норм и правил, а также нормативных документов по технической эксплуатации и ремонту действующих трубопроводов.

Ключевые слова: трубопровод, прочность, надежность, запас прочности, запас работоспособности, элемент поворота.

В настоящее время расчет проектируемых магистральных трубопроводов на прочность осуществляется по первому состоянию путем введения коэффициента запаса прочности, который формируется из частных коэффициентов [1]. Для промышленных трубопроводов используется подход в расчетах, где частные коэффициенты запаса прочности представляются в других обозначениях, но по сути это то же самое, что и в магистральных трубопроводах.

На стадии эксплуатации расчеты трубопроводов на прочность выполняются путем корректировки запаса прочности, введением поправочных частных коэффициентов или регулированием (снижением) рабочего внутреннего давления под заданный (установленный) запас прочности. Однако при этом не прослеживаются закономерности введения поправочных коэффициентов. При таком подходе не производится количественная оценка вероятности безотказности трубопровода. При этом остаточный ресурс участка трубопровода определяется по различным моделям коррозионных процессов, усталости и трещинообразования, что приводит к достаточно большому рассеянию долговечности.

Для исключения этих недостатков предлагается новый подход и метод

расчета трубопроводов на прочность и надежность, основанный на переходе от запаса прочности на запас работоспособности. Изначально подчеркнем, что такой переход не исключает выполнения расчетов по запасу прочности, так как между запасом работоспособности и запасом прочности устанавливается закономерная взаимосвязь.

Запас работоспособности оценивается коэффициентом запаса работоспособности, равному отношению средних значений разрушающего и рабочего напряжений в элементе (участке) трубопровода.

Переход от запаса прочности на запас работоспособности позволяет получить универсальные формулы расчета на прочность и надежность проектируемых и эксплуатируемых трубопроводов. Расчет на прочность по первому предельному состоянию (несущей способности) осуществляется на основе детерминированного подхода с введением частных коэффициентов запаса и выполнения следующего условия:

$$n \cdot P \leq f(m; K_1; K_2; K_H; K_\sigma; m_k; m_y; \psi_1; R_1^H; R_2^H; S) \quad (1)$$

где P – внутреннее давление, МПа;
 R_1^H, R_2^H – нормативное временное сопротивление и предел текучести металла, МПа;

n – коэффициент надежности по нагрузке;

m – коэффициент условий работы трубопровода;

K_1, K_2 – коэффициенты надежности (однородности) по материалу;

K_H – коэффициент надежности по назначению трубопровода;

S – геометрические характеристики сечения трубы;

ψ_1 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние трубопровода, определяется по СНиП 2.05.06-85* и устанавливается в пределах $0,75 < \psi_1 \leq 1$; для прямолинейных участков трубопровода следует принимать $\psi_1 = 1$;

m_k – поправочный коэффициент несущей способности элемента поворота (кривой трубы) трубопровода;

m_y – поправочный коэффициент на усталость, деформационное старение и концентрацию напряжений в металле труб при циклическом (одночастотном или двухчастотном) нагружении трубопровода внутренним давлением;

K_σ – поправочный коэффициент на коррозионный износ металла трубопровода.

На стадии проектирования трубопроводов коэффициенты m_y, K_σ не учитываются.

Условие (1) содержит требование, чтобы максимально возможное с учетом

перегрузки внутреннее давление в элементе трубопровода было не больше его минимальной несущей способности, определяемой с учетом показателей прочности металла и фактических условий работы трубопровода.

Численные значения коэффициентов n , m , K_1 , K_2 , K_H и m_k представлены в табличных формах в строительных нормах и правилах и сводах правил для проектируемых магистральных и промышленных трубопроводов. Здесь необходимо отметить, что в различных нормативных документах символические обозначения коэффициентов могут быть различными, но по содержанию идентичны. Так, например, для промышленных трубопроводов:

$$m = m_2; K_1 = \frac{1}{m_1 \cdot K_1} m_k = \frac{1}{a}$$

где m_1 – коэффициент условий работы материала труб при разрыве, равный 0,8;

K_1 – коэффициент однородности материала труб: для бесшовных труб из углеродистой стали и для сварных труб из низколегированной нормализованной стали $k_1 = 0,8$; для сварных труб из углеродистой стали и для сварных труб из низколегированной нормализованной стали $k_1 = 0,85$;

a – коэффициент несущей способности элемента поворота; $a = 1$ для прямых труб; $a = 1,3$ для отводов гладких и сварных при отношении радиуса изгиба трубы R к наружному диаметру D_H равному 1;

$$a = 1,15 \text{ при } \frac{R}{D_H} = 1,15; a = 1 \text{ при } \frac{R}{D_H} \geq 2,20.$$

Для эксплуатируемых трубопроводов численные значения поправочных коэффициентов m_y , K_3 и m_k определяются экспериментально-расчетным методом по результатам диагностики и аналитическим зависимостям.

Так, в работе [2] получена формула расчета поправочного коэффициента m_y отражающего накопленную поврежденность в элементе трубопровода, которая имеет следующий вид:

$$m_y = (1 - \Pi \cdot \varepsilon)^{0,5mc(1+c)} \quad (2)$$

$$\text{где } \Pi = 1 - \frac{N}{N_0}$$

относительный показатель поврежденности металла труб;

N – фактическое число эквивалентных полных циклов нагружения трубопровода внутренним давлением;

N_0 – полное число циклов нагружения трубопровода внутренним давлением, соответствующее нормативному (примемому) значению;

c – коэффициент деформационного упрочнения металла;

m_c – коэффициент, учитывающий влияние коррозионной среды;

$$\varepsilon = n_f^{0+nc}, \text{ или } \varepsilon = \frac{N_1}{N_2}$$

коэффициент снижения циклической долговечности при двухчастотном нагружении;

N_1 – циклическая долговечность при одночастотном нагружении, цикл;

N_2 – циклическая долговечность при двухчастотном нагружении, цикл;

$$\theta = \frac{\sigma_\Sigma}{\sigma_H} - 1;$$

σ_H – напряжение от низкочастотной составляющей нагрузки, МПа;

σ_Σ – суммарное напряжение (низкочастотная и высокочастотная составляющие) при двухчастотном нагружении, МПа;

$$n_f = \frac{f_2}{f_1}$$

коэффициент, отражающий отношение частот нагружения;

f_1 – частота нагружения высокочастотной составляющей;

f_2 – частота нагружения низкочастотной составляющей;

n_ε – коэффициент, отражающий деформационные свойства металла, по сути, это коэффициент запаса по деформации, который для углеродистых и низколегированных сталей находится в пределах 1,25÷1,34.

Известно, что в кривых трубах окружное напряжение от внутреннего давления не распределяется равномерно по сечению трубы. Поэтому окружное напряжение в кривых трубах определяется по «котельной» формуле с поправочным коэффициентом m_k . Авторами [3] получена формула коэффициента m_k , которая имеет следующий вид:

$$m_k = 1 - \frac{1}{2 \left(\frac{2R}{D_{BH}} \cdot \sin \alpha + 1 \right)} \quad (3)$$

где R – радиус изгиба трубы, мм;

α – центральный угол, определяющий положение точки на поперечном сечении кривой трубы, в которой выполняется расчет напряжений.

На вогнутой стороне кривой трубы кольцевые напряжения являются максимальными, а на выпуклой стороне имеют минимальное значение.

Для полного использования несущей способности трубопровода кривые трубы должны иметь сравнительно большую толщину стенки в m_k раз.

Если это условие невозможно выполнить, то требуется снижение допустимого внутреннего давления в m_k раз.

Для оценки прочности участка трубопровода используется расчетное сопротивление растяжения (сжатия) металла, которое определяется по формуле:

$$R_1 = \frac{m \cdot m_k \cdot R_1^H}{K_1 \cdot K_H} = \frac{R_1^H}{n_\Sigma} \quad (4)$$

$$\text{где } n_\Sigma = \frac{K_1 \cdot K_H}{m \cdot m_k \cdot m_y}$$

коэффициент запаса прочности.

С учетом [4] коэффициент запаса прочности рассчитывается по формуле:

$$n_\Sigma = \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot K_3 \cdot K_H}{\left(1 + \frac{1}{K_1}\right) \cdot m \cdot m_y} \quad (5)$$

где K_3 – коэффициент запаса работоспособности, равный отношению средних значений разрушающего и рабочего напряжений в элементе трубопровода. С учетом (4) и (5) получается, что K_3 имеет следующую зависимость:

$$K_3 = \frac{K_1 + 1}{m \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \quad (6)$$

Расчеты R_1 по показателю K_3 позволяют проводить оценку надежности (безотказности) участка трубопровода.

Для определения вероятности безотказности устанавливаются расчетным путем численные значения K_3 и $U_p(Q)$, где $U_p = (K_3 - 1)(K_3^2 \cdot \varepsilon_k^2 + \varepsilon_k^2)^{-0,5}$ – квантиль нормального распределения прочности и нагрузки, который задается по табличным данным [5];

$$\alpha_k = 0,61 \left(1 - \frac{2}{K_1 + 1} \right) -$$

коэффициент изменчивости прочности;

$$\alpha_n = 0,61 \left(1 - \frac{2}{n+1} \right) -$$

коэффициент изменчивости нагрузки.

Для категорированных участков трубопровода с условиями работы $m = 0,6; 0,75; 0,9$ устанавливаются приемлемые нежелательные события, как невероятные, неправдоподобные и маловероятные с частотой отказов $Q = 10^{-8}, 10^{-5}, 10^{-3}$ соответственно.

При выполнении расчетов прочности и надежности эксплуатируемого участка трубопровода следует учитывать факт расширения интервала разрушающего напряжения под влиянием эксплуатационных факторов. Поэтому в расчетах

надежности следует вносить поправку K_1 с учетом m_y^{-1} . В противном случае для обеспечения безопасности трубопровода требуется снижение рабочего давления, которое учитывается корректировкой коэффициента надежности по нагрузке.

Таким образом, переход от коэффициента запаса прочности к коэффициенту запаса работоспособности позволяет проводить расчеты трубопроводов на прочность и надежность. Разработанный метод позволяет проектировать и эксплуатировать трубопроводы по критерию риска.

ВЫВОДЫ:

1. Доказано, что переход от коэффициента запаса прочности к коэффициенту запаса работоспособности

трубопровода позволяет выполнять одновременно расчеты на прочность и надежность (безотказность, долговечность).

2. Разработан метод расчета трубопроводов на прочность и надежность, основанный на модели перехода от запаса прочности к запасу работоспособности.

3. Установлена аналитическая зависимость, позволяющая учитывать накопленную поврежденность металла эксплуатируемого трубопровода.

4. Получена формула расчета поправочного коэффициента на несущую способность кривых труб, в том числе элементов поворота, необходимая для оценки прочности и надежности криволинейных участков трубопроводов.

Литература:

1. СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы». – М.: Минстрой России ГУП ЦПП, 1997. – 51 с.
2. Султанов М.Х., Гаврилин А.В., Никишин А.М. Алгоритм оценки несущей способности элементов поворота трубопровода на стадии эксплуатации // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. Матер. Междунар. научн.-практ. конф. 22 мая 2013 г. в рамках XXI Междунар. специализир. выставки «Газ. Нефть. Технологии – 2013». – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2013 – С. 199–200.
3. Гаврилин А.В., Султанов М.Х., Никишин А.М. Методическое обеспечение оценки несущей способности элементов поворота трубопровода по критерию риска // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. Матер. Междунар. научн.-практ. конф. 22 мая 2013 г. в рамках XXI Междунар. специализир. выставки «Газ. Нефть. Технологии – 2013». – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2013. – С. 385–389.
4. Султанов М.Х., Хохлова И.А., Черникин В.А. Вероятностно-статистический метод нормирования коэффициента надежности по материалу труб // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2008. – № 4 (74). – С. 71–74.
5. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. – М.: Советское радио, 1968. – 288 с.

M.Kh. Sultanov, D.Eng.Sc., professor; **A.V. Gavrilin**; **Ye.R. Utyasheva**, postgraduate of SUE Institute of Energy Resources Transportation Problems; e-mail: ipter@anrb.ru

New approach and method of pipelines calculation for strength and reliability

The article discusses the issue of pipelines calculation for strength and reliability (safety, service life duration). It was proved that transition from strength margin to serviceability margin enables to calculate the pipelines being designed and operated for both strength and reliability. The article is aimed at improving of construction standards and rules, as well as regulatory documents for technical operation and repair of existing pipelines.

Keywords: pipeline, strength, reliability, strength margin, serviceability margin, turn element.

References:

1. SNiP 2.05.06-85* «Magistral'nye truboprovody» («Main pipelines»). – Moscow: Ministry of Construction of Russia, SUE Centre of Construction Design Products, 1997. – 51 p.
2. Sultanov M.Kh., Gavrilin A.V., Nikishin A.M. Algoritm otsenki nesutshei sposobnosti elementov povorota truboprovoda na stadii ekspluatatsii (Algorithm for assessment of the pipeline turn elements bearing capacity at the operation stage) // Problems and methods to ensure reliability and safety of oil, oil products and gas transportation systems. Materials of the International Research-to-practice Conference, May 22, 2013 within the XXI International Specialized Exhibition «Gas. Oil. Technology – 2013». – Ufa: IPTER Publishing House, 2013. – P. 199–200.
3. Gavrilin A.V., Sultanov M.Kh., Nikishin A.M. Metodicheskoe obespechenie otsenki nesutshei sposobnosti elementov povorota truboprovoda po kriteriyu riska (Methodical support for risk-based assessment of the pipeline turn elements bearing capacity) // Problems and methods to ensure reliability and safety of oil, oil products and gas transportation systems. Materials of the International Research-to-practice Conference, May 22, 2013 within the XXI International Specialized Exhibition «Gas. Oil. Technology – 2013». – Ufa: IPTER Publishing House, 2013. – P. 385–389.
4. Sultanov M.Kh., Khokhlova I.A., Chernikin V.A. Veroyatnostno-statisticheskiy metod normirovaniya koeffitsienta nadezhnosti po materialu trub (Probabilistic and statistical method of the safety factor standardization for pipes material) // Issues of oil and oil products collection, treatment and transportation. – 2008. – No. 4 (74). – P. 71–74.
5. Shore Ya.B., Kuzmin F.I. Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti (Tables for reliability analysis and control). – Moscow: Sovetskoye radio, 1968. – 288 p.



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Уважаемые коллеги! Дорогие друзья!

Искренне рад от лица Министерства энергетики Российской Федерации и от себя лично поздравить коллектив ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» с юбилеем!

50 лет назад руководством страны было принято решение о строительстве магистральных газопроводов для обеспечения «голубым топливом» Урала, где была сосредоточена значительная часть отечественного промышленного потенциала.

Работа по реализации этой задачи вписала славные страницы в историю предприятия. Несмотря на сложные природные условия, задача была выполнена точно в срок. Бесценный практический опыт по реализации этого проекта стал важным вкладом в успешное развитие отрасли.

Сегодня в ведении ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» находится около восьми тысяч магистральных газопроводов и газопроводов-отводов. Ведется вся необходимая работа по повышению эффективности и внедрению новейших средств управления, контроля и защиты газотранспортной системы предприятия. Многолетний опыт и добрые традиции ответственного и добросовестного выполнения поставленных задач, высочайшая квалификация персонала в сочетании с используемыми передовыми технологиями позволяют предприятию во всеоружии подходить к решению самых сложных вопросов.

Хочу пожелать слаженному высокопрофессиональному коллективу ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» новых трудовых побед. С глубочайшим уважением отношусь к тем людям, чьи знания, опыт и самоотверженный труд лежат в основе достижений отечественной газовой отрасли. Поэтому мои самые добрые слова поздравления и пожелания – ветеранам, которые стояли у истоков создания предприятия.

**Заместитель министра
энергетики Российской Федерации**

К.В.Молодцов