

МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2011 И.А. Хохлова¹, Л.М. Султанова²

¹ ОАО «Гипростокнефть», г. Самара

² ФГУ «Институт проблем транспорта энергоресурсов», г. Уфа

Поступила в редакцию 07.04.2011

Предлагается методика вероятностного анализа несущей способности проектируемых трубопроводов по первому предельному состоянию. Методика позволяет выполнить количественную оценку показателя безотказности трубопроводов при расчете на прочность.

Ключевые слова: *трубопровод, прочность, надежность конструкции*

Магистральные трубопроводы рассчитывают по методу предельных состояний. Проектируемые трубопроводы рассчитывают по первому предельному состоянию и согласно расчетам принимают, что наибольшее усилие, испытываемое трубопроводом, не должно превышать его несущей способности. Первым предельным состоянием называется такое, при достижении которого трубопровод теряет несущую способность или, что тождественно, способность сопротивляться приложенным к нему усилиям и разрушается. При расчете по первому предельному состоянию характеристикой несущей способности является временное сопротивление (предел прочности) металла труб. Расчетное сопротивление металла труб определяется с использованием ряда коэффициентов, которые должны обеспечить заданную надежность трубопровода, учитывая вероятностный характер нормативных характеристик.

К основным технологическим параметрам магистрального трубопровода относятся, в частности, наружный диаметр, D_n , мм и рабочее давление на выходе перекачивающей станции, $P_{\text{раб}}$, МПа. Оптимальный диаметр трубопровода определяется технико-экономическим расчетом. Толщина стенки трубопровода определяется расчетом с последующей проверкой его прочности, подверженности деформациям и общей устойчивости.

Магистральные нефтегазопроводы и нефтепродуктопроводы являются опасными производственными объектами. При их проектировании должен быть выполнен анализ

опасностей и оценка риска аварий, согласно ГОСТ Р 51901-2002 [5]. При этом, в частности, следует обеспечить: выявление опасностей и априорную количественную оценку риска с учетом воздействия поражающих факторов аварии на персонал, имущество и окружающую природную среду; выбор оптимальных проектных вариантов размещения и классификации трубопровода по категорированным участкам с учетом имеющихся факторов риска. Поэтому при расчете трубопроводов по первому предельному состоянию должна быть выполнена количественная оценка показателя безопасности. Для категорированных участков трубопровода следует дать качественную и количественную характеристику частоты нежелательных событий (отказов). Случайные события с частотой событий в год $10^{-1} - 10^{-2}$ в трубопроводах не допускаются. Маловероятные события с частотой события в год менее 10^{-3} включительно возможны на III, IV категорированных участках трубопровода. Неправдоподобные события с частотой события в год менее 10^{-5} включительно возможны на I, II категорированных участках трубопровода. Невероятные события с частотой события в год менее 10^{-8} возможны на V категорированных участках трубопровода.

Металлоемкость трубопровода должна быть обоснована технико-экономическим расчетом. Трубопроводы с более высокими прочностными характеристиками металла являются менее металлоемкими, но с высокой стоимостью. При выборе оптимальных проектных решений по определению толщины стенки трубопровода следует учитывать возможности максимального использования прочности металла. При этом создаваемое в трубопроводе максимальное кольцевое напряжение от рабочего

Хохлова Ирина Александровна, инженер. E-mail: hohl07@mail.ru

Султанова Лилия Маратовна, аспирантка. E-mail: IPTER@soros.bashedu.ru

(нормативного) давления должно быть не более $0,75 \sigma_T^H$, где σ_T^H – нормативное значение предела текучести металла, МПа. Нормативные сопротивления растяжению (сжатию) металла трубопровода и сварных соединений принимаются равными, соответственно минимальным значениям временного сопротивления – σ_B^H и предела текучести σ_T .

Расчетное сопротивление растяжению (сжатию) σ_1 определяется по формуле

$$\sigma_1 = \frac{m}{K_1 \cdot K_H} \cdot \sigma_{ep}, \quad (1)$$

где m – коэффициент условий работы трубопровода; K_1 – коэффициент надежности по материалу; K_H – коэффициент надежности по назначению трубопровода. Численные значения этих коэффициентов приведены в табличной форме в СНиП* 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы».

Расчетная толщина стенки трубопровода δ определяется по формуле

$$\delta = \frac{n P_{раб.} \cdot D_n}{2(\sigma_{ep} \cdot \psi_1 + n P_{раб.})} = \frac{n P_{раб.} \cdot D_{вн.}}{2 \sigma_{ep} \psi_1}, \quad (2)$$

где n – коэффициент надежности по нагрузке, численное значение которого приведено в СНиП* 2.05.06-85; $D_{вн.}$ – внутренний диаметр трубы, мм; ψ_1 – коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние труб, определяется расчетами по СНиП* 2.05.06-85 [2]. Увеличение толщины стенки труб при наличии продольных осевых сжимающих напряжений ($\psi_1 < 1$) должно быть обосновано технико-экономическим расчетом, учитывающим конструктивные решения и температуру транспортируемого продукта.

Вероятностный анализ несущей способности трубопровода базируется на методе интервального оценивания и нормирования частных коэффициентов запаса несущей способности и нагрузки трубопровода. Вероятностный анализ несущей способности проектируемого трубопровода основывается на сравнительной оценке конечного числа вариантов, т.е. прямого перебора и сравнения различных значений вероятности безотказности. При вероятностном анализе несущей способности участка трубопровода рекомендуется следующий порядок и последовательность операций:

Задаются показатели D_n ; $P_{раб.}$; выбирают из возможных вариантов $\sigma_{вр.}$, σ_T ; K_1 ; K_H ; m ; n ; рассчитываются ψ_1 , V_n , где V_n – нижняя граница коэффициента перегрузки, определяется как относительная величина (по отношению

к σ_T) кольцевых напряжений от испытательного давления. При этом $V_n = (K_1 n_T)^{-1}$. Определяется расчетное значение $\sigma_{вр.}$. По нормам проектирования рассчитывается нормативная толщина стенки труб.

Выполняются расчеты коэффициентов K_3 , U_p и устанавливается соответствующее значение вероятности безотказности, где K_3 – коэффициент запаса работоспособности, равный отношению средних значений разрушающего и рабочего напряжений в металле трубопровода; U_p – квантиль нормального распределения прочности и нагрузки [4]. Для приемлемого значения вероятности безотказности устанавливаются расчетным путем численные значения коэффициентов K_3 ; m ; K_1 . Проводится сравнительная оценка вариантов K_1 ; m ; $\sigma_{вр.}$; σ_T ; δ , удовлетворяющих приемлемым значениям вероятности безотказности участка трубопровода.

Для участков трубопровода категория В, I, II, III, IV устанавливаются приемлемые нежелательные события, как невероятные, неправдоподобные и маловероятные с частотой отказов $Q = 10^{-8}$, 10^{-5} , 10^{-3} соответственно [5]. Численное значение квантиля нормального распределения U_p следует определять по формуле [1, 4]:

$$U_p = \left[\frac{1,645(K_3 - 1)}{\left(1 - \frac{2}{n+1}\right)(K_3^2 z^2 + 1)^{0,5}} \right], \quad (3)$$

где

$$K_3 = \frac{K_1 + 1}{m \left(1 + \frac{1}{n}\right)}, \quad (4)$$

$$z = \frac{1 - \frac{2}{K_1 + 1}}{1 - \frac{2}{n+1}}. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы соответствующая устанавливается по табличным данным квантиля нормального распределения.

Для определения толщины стенки проектируемого трубопровода используется расчетное сопротивление растяжению и сжатию металла:

$$\sigma_{ep} = M \cdot \sigma_{ep}^H = \frac{m}{K_1 \cdot K_H} \cdot \sigma_{ep}^H, \quad (6)$$

где M – поправочный множитель для учета рассеяния разрушающего и рабочего напряжений

в металле трубопровода. Для расчета поправочного множителя M следует использовать следующую зависимость [1, 3, 4]:

$$M = \frac{1 + 1,64\chi_n}{K_1 K_3 (1 + 1,64\chi_k)} = \frac{m(1 + bn_T)}{(K_1 + 1)K_n} = \frac{1 + bn_T}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)K_n K_3} \quad (7)$$

где χ_k – коэффициент изменчивости прочности

$$\chi_k = 0,61 \left(1 - \frac{2}{K_1 + 1}\right) \quad (8)$$

χ_n – коэффициент изменчивости нагрузки

$$\chi_k = 0,61 \left(1 - \frac{2}{n + 1}\right) \quad (9)$$

n_T – показатель пластичности металла, $n_T = \sigma_T / \sigma_{вр}$.

По результатам расчетов M устанавливаются допустимые значения m_1 , K_1 , n_1 , n_T соответствующие приемлемому значению вероятности безотказности проектируемого участка трубопровода.

Примеры расчетов.

Пример 1. Пусть $K_1 = 1,34$; $n = 1,1$; $m = 0,9$; $K_n = 1,0$. Определить количественное значение вероятности безопасности. По формуле (4) $K_3 = 1,362$. По формуле (5) $Z = 3,05$. По

формуле (3) $U_p = 2,93$, чему соответствует вероятность безопасности $0,9983$ или $Q = 1,7 \cdot 10^{-3}$.

Пример 2. Пусть $U_p = 5,61$; $Q = 1 \cdot 10^{-8}$, $K_1 = 1,34$; $n = 1,1$. Определить количественное значение коэффициента условий работы. По формуле (5) $Z = 3,05$. По формуле (6) $K_3 = 2,00$. По формуле 4 $m = 0,61$.

Выводы: разработанная методика позволяет выполнять расчеты на прочность и при этом определять ожидаемые значения частоты отказов участков трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Султанов, М.Х. Вероятностно-статистический метод нормирования коэффициента надежности по материалу труб / М.Х. Султанов, И.А. Хохлова, В.А. Черников // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. ИПТЭР. 2008. Вып. 4 (74). С. 71-74.
2. СНиП 2.05.06 – 85* Магистральные трубопроводы. – М.: 1985.53 с.
3. Хохлова, И.А. Метод граничных испытаний труб и трубопроводных сооружений / И.А. Хохлова, Л.М. Султанова // Проблемы и методы обеспечения надежности и безотказности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. Матер. науч.- практ. конф. 27 мая 2009 г. Уфа. 2009. С. 77-83.
4. Султанов, М.Х. Долговечность магистральных нефтепродуктопроводов. – М.: Недра, 2005. 341 с.
5. ГОСТ Р 51901-2002 Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М.: 2003. 13 с.

METHOD OF PROBABILITY ANALYSIS OF DESIGNED PIPELINES BEARING CAPACITY

© 2011 I.A. Hohlova¹, L.M. Sultanova²

¹OJSC “Gyrvostokneft”, Samara

²FSE «Institute of Power Resources Transport Problems», Ufa

Method of probability analysis of designed pipelines bearing ability on the first limiting condition is offered. The method allows to execute quantitative estimation of pipeline reliability index under strength analysis.

Key words: pipeline, strength, structure reliability