

УДК 539.4

© 2000 г. В.Л. ДИЛЬМАН, А.А. ОТСЕМИН

О ВЛИЯНИИ ДВУХОСНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ

Несущая способность трубы магистрального газонефтепровода определяется максимальным давлением P^* , которое выдерживает труба до разрушения. При этом труба нагружена внутренним давлением P и подвержена действию силы N , направленной вдоль оси трубы. Допускаемое напряжение в стенке трубы определяется стадией ее напряженно-деформированного состояния, например, началом пластического течения, моментом потери устойчивости пластического течения, локализацией пластической деформации, разрушением. В [1, 2] предложен ряд формул для вычисления P^* и ϵ_i^* – предельной интенсивности деформации, учитывающий пластические свойства материала, двухосность нагружения стенки трубы, и хорошо соответствующий экспериментальным данным, для стадии потери пластической устойчивости и локализации пластической деформации. В [1, 2] предполагалось, что коэффициент двухосного напряженного состояния $m = \sigma_1/\sigma_2$, где σ_1 и σ_2 – главные напряжения в стенке трубы, осевое и кольцевое соответственно, – не изменяется в процессе нагружения вплоть до потери несущей способности трубы. В действительности при постоянных P и N , которые определяются для действующих трубопроводов нормативными документами¹ вместе с изменением геометрии трубы под действием внутреннего давления и осевой нагрузки изменяется и параметр m . В работе анализируется влияние этого обстоятельства на величину предельных деформации и давления и, на основе развития методики и уточнения результатов [1–3], выводятся новые формулы для вычисления P и ϵ_i .

Труба предполагается тонкостенной, материал трубы изотропным и несжимаемым. В качестве критерия разрушения принят критерий потери общей пластической устойчивости Свифта – Марциньяка. Суть этого критерия заключается в следующем [2]. Изменение геометрических размеров (во всех направлениях) рассматриваемого участка стенки трубы (оболочечной конструкции) под действием внутреннего давления P и внешней нагрузки N приводит к приращению напряжений на данном участке, которые компенсируются за счет упрочнения материала стенки, и в этом случае пластическое деформирование протекает устойчиво. Однако упрочнение происходит по закону, который можно аппроксимировать степенной функцией

$$\sigma_i = A\epsilon_i^n \quad (1)$$

а рост напряжений за счет изменения геометрии происходит по экспоненте, скорость роста которой выше скорости роста степенной функции, в какой-то момент времени упрочнения материала оказывается недостаточно для нейтрализации роста напряжений, связанного с изменением формы. В этот момент, определяемый равенством диф-

¹ См. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы.

ференциалов двух указанных зависимостей, происходит потеря общей пластической устойчивости, т.е. начинается деформирование материала с неконтролируемой скоростью при постоянных или уменьшающихся нагрузках [2]. Данный критерий определяет условия исчерпания несущей способности оболочки до локализации пластической деформации (образования шейки).

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние стенки газонефтепровода под действием внутреннего давления P и растягивающей силы N . Текущие значения внутреннего радиуса трубы R , толщины стенки – t . Величины главных напряжений рассчитываются по формулам

$$\sigma_1 = \frac{PR}{2t} + \frac{N}{2\pi Rt}, \quad \sigma_2 = \frac{PR}{t}, \quad \sigma_3 = 0 \quad (2)$$

В момент начала действия давления P и силы N имеем $R = R_0$, $t = t_0$, $\sigma_1 = \sigma_{10}$, $\sigma_2 = \sigma_{20}$, $m = m_0$; в дальнейшем эти величины изменяются. В частности

$$R = R_0 e^{\varepsilon_2}, \quad t = t_0 e^{\varepsilon_3} \quad (3)$$

где ε_1 , ε_2 и ε_3 – осевая, кольцевая и радиальная логарифмические деформации. Из условия несжимаемости

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (4)$$

и подобия девиаторов напряжений и деформаций следует

$$(2 - m) \varepsilon_1 = (2m - 1) \varepsilon_2 \quad (5)$$

В процессе деформации внутреннее давление в трубопроводе P и осевая нагрузка N остаются неизменными. Из (2) при $P \neq 0$ следует

$$N = \pi R^2 P(2m - 1), \quad N = \pi R_0^2 P(2m_0 - 1) \quad (6)$$

Сравнивая формулы (6), получаем из (3):

$$2m - 1 = (2m_0 - 1) e^{-2\varepsilon_2} \quad (7)$$

Формула (7) определяет изменение коэффициента двухосности нагружения стенки трубы m в зависимости от кольцевой деформации. Из (7) видно, что m меняется в процессе пластического деформирования трубы, за исключением случая $m_0 = 0,5$, когда осевое усилие $N = 0$. Из (2) и (6) следует, что

$$\sigma_1 = \frac{mN}{(2m - 1)\pi Rt} \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\xi = \xi(m) = \sqrt{m^2 - m + 1}, \quad \xi_0 = \xi(m_0) \quad (9)$$

Так как интенсивность напряжений и деформаций определяются выражениями

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}, \quad \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2}$$

получаем из (9):

$$\sigma_i = \xi \sigma_2, \quad \sigma_i = \frac{\xi}{m} \sigma_1 \quad (10)$$

а также, с учетом (5):

$$\varepsilon_2 = \frac{2 - m}{2\xi} \varepsilon_i \quad (11)$$

Из (2), (8) и (10) находятся два различных выражения для вычисления интенсивности напряжений σ_i ; через осевые напряжения σ_1 получаем

$$\sigma_i = \frac{\xi N}{(2m-1)\pi R t} \quad (12)$$

а через кольцевые напряжения

$$\sigma_i = \xi P R / t \quad (13)$$

Предположение о постоянстве отношения между напряжениями σ_1 и σ_2 [1, 2] приводит, на основе формул (12) и (13), к различным выражениям для ε_i^* – значения интенсивности деформаций, соответствующих общей потере пластической устойчивости деформирования [2]. Из этого можно заключить, что общая потеря устойчивости деформирования связана с каким-то определенным направлением – кольцевым или осевым, когда или напряжение σ_1 , или напряжение σ_2 достигает предельных значений и ответственно за исчерпание несущей способности оболочки. Однако, до тех пор, пока не началась локализация деформации в форме образования шейки, геометрически преимущественная роль какого-либо направления в потере пластической устойчивости не проявляется. Объяснить это явление можно, если учесть непостоянство параметра m в процессе деформации. Действительно, используя зависимость m от кольцевой деформации ε_2 по формуле (7), и подставляя выражения (3) для R и t через их начальные значения, из (12) получим (с использованием условия (4)):

$$\sigma_i = \xi \frac{N e^{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}}{(2m_0 - 1)R_0 t_0} \quad (14)$$

а из (13):

$$\sigma_i = \xi \frac{P R_0}{t_0} e^{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} \quad (15)$$

Значения σ_i , вычисленные по формулам (14) и (15), как видно из (6), тождественно совпадают.

Для вычисления интенсивности напряжения σ_i как функции от интенсивности деформаций ε_i понадобятся приведенные ниже формулы. Они выводятся из формул (5), (7), (9) и (11):

$$\xi = \xi_0 e^{-\frac{(2m_0-1)^2}{2\xi_0^2} \varepsilon_2} \quad (16)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{2m_0-1}{2-m_0} e^{-\frac{3}{2-m_0} \varepsilon_2} \varepsilon_2 \quad (m_0 \neq 2) \quad (17)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{2-m_0}{2\xi_0} e^{\frac{3m_0(2m_0-1)}{4\xi_0^3} \varepsilon_1} \varepsilon_1 \quad (18)$$

Все эти формулы приближенные; они верны с точностью до величин порядка ε_2^3 или ε_1^3 . Так как кольцевые деформации ε_2 имеют порядок показателя упрочнения $n = 0,1-0,3$ [1], то ошибка в формулах (16)–(18) незначительна. Вывод этих формул в связи с громоздкими выкладками не приводим.

Подставив в (14) или (15) вместо ξ , ε_1 и ε_2 их выражения по формулам (16), (17) и

(18), получим (рутинные вычисления опускаем):

$$\sigma_i = \frac{\xi_0 R_0 P}{t_0} e^{\alpha \varepsilon_i + \beta \varepsilon_i^2} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{3}{2\xi_0} - \frac{(2m_0 - 1)^2 (2 - m_0)}{4\xi_0^3} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{3(2m_0 - 1)(6m_0^3 - 9m_0^2 + 12m_0 - 4)}{16\xi_0^6}$$

Представление о величине коэффициентов α (кривая 1) и β (кривая 2) дают графики их зависимости от m_0 (фиг. 1).

Вычислим предельное значение интенсивности деформации ε_i^* на основе критерия Свифта – Марциньяка. Считаем, что упрочнение описывается инвариантной к виду напряженного состояния степенной зависимостью (1) между интенсивностью истинных напряжений σ_i и интенсивностью логарифмических деформаций ε_i :

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n \quad (21)$$

где A и n – характеристики материала. Тогда из равенства дифференциалов функций (19) и (21) получаем уравнение для нахождения ε_i^* :

$$\alpha + 2\beta \varepsilon_i^* = n / \varepsilon_i^* \quad (22)$$

Откуда

$$\varepsilon_i^* = \frac{\sqrt{\alpha^2 + 8\beta n} - \alpha}{4\beta} = \frac{2n}{\sqrt{\alpha^2 + 8\beta n} + \alpha} = \frac{n}{\alpha} (1 - \mu) \quad (23)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + 8\beta n / \alpha^2} - 1}{\sqrt{1 + 8\beta n / \alpha^2} + 1} \approx \frac{10\beta n}{5\alpha^2 + 18\beta n} \quad (24)$$

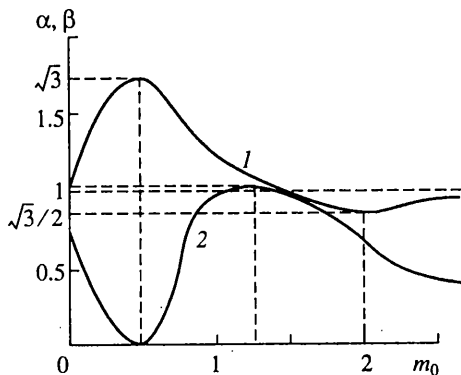
Эта формула существенно отличается от формул (26а) и (26б) работы [2]. Для сравнения с формулой (26б) из [2] запишем выражение (23) в виде

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \xi_0 n k_1 / k_2 \quad (25)$$

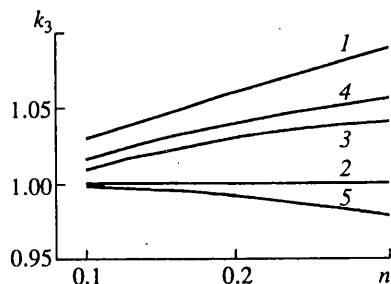
$$k_1 = 1 - \mu, \quad k_2 = 1 - \gamma / 6, \quad \gamma = (2m_0 - 1)^2 (2 - m_0) / \xi_0^2 \quad (26)$$

В соответствующей формуле работы [2] $k_1 = k_2 = 1$. В частности, при $m_0 = 1/2$ (случай отсутствия осевой нагрузки) в формулах (26) $k_1 = k_2 = 1$, т.е. в этом частном случае формула (25) совпадает с формулой (26б) из [2] и формулой (9) из [1], несмотря на то, что в работах [1; 2] не учитывалось явление непостоянства коэффициента двухосности m в процессе пластической деформации при неизменных P и N . Объяснение этого обстоятельства следует из зависимости (7), в силу которой коэффициент двухосности m не изменяется в процессе пластической деформации тогда и только тогда, когда $m_0 = 1/2$, т.е. неучет переменности параметра m при выводе формулы (26б) в работе [2] не привел в данном случае к ошибке. Если $m_0 \neq 1/2$, то ошибка присутствует. Рассмотрим, например, случай $m_0 = 2$, при котором формулы (26а) и (26б) из работы [2] совпадают. При $m_0 = 2$ $k_2 = 0$, и после вычисления k_1 получаем

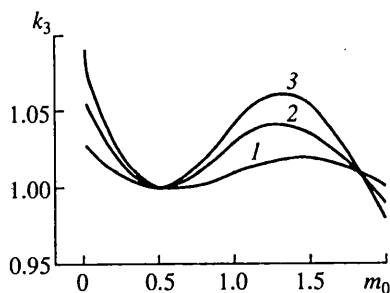
$$\varepsilon_i^* = \frac{1 + 1.43n}{1 + 3.21n} \cdot \frac{2}{3} \xi_0 n$$



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

т.е., приняв во внимание переменность m , получаем несколько меньшее критическое значение, чем по формулам работы [2]. В общем случае можно заметить, что отношение величины ε_i^* , полученной по формуле (25), к ε_i^* статьи [2], равное $k_1 k_2^{-1}$, может быть как больше, так и меньше единицы, в зависимости от показателя упрочнения n . Например, при $m_0 = 1$ $k_1 k_2^{-1} > 1$, если $n > 0.19$, и $k_1 k_2^{-1} < 1$, если $n < 0.19$.

Вычислим предельное давление P^* , при котором происходит исчерпание несущей способности стенки трубопровода вследствие потери общей пластической устойчивости. Воспользуемся формулой (19), в которой придадим интенсивности деформаций ε_i ее критическое значение ε_i^* . Из формул (22) и (23) следует

$$\alpha \varepsilon_i^* + \beta \varepsilon_i^{*2} = n(1 - \mu/2) \quad (27)$$

где μ определено в (24). Интенсивность напряжений σ_i^* , соответствующую потере пластической устойчивости, можно вычислить по формуле (21) с заменой ε_i на ε_i^* , считая, что $A = \sigma_B e^n n^{-n}$. Получится

$$\sigma_i^* = \sigma_B \left(\frac{2e}{3} \right)^n \frac{\xi_0^n}{k_2^n} \quad (28)$$

Здесь e — основание натуральных логарифмов, ξ_0 и k_2 определены формулами (9) и (26). После подстановки критического значения σ_i^* , вычисленного по формуле (28), в уравнение (19), и учитывая (27), получаем

$$P^* = \frac{\sigma_B t_0}{R_0 \xi_0^{1-n}} \left(\frac{2}{3} \right)^n \frac{(1 - \mu/2)^n}{(1 - \gamma/6)^n} \quad (29)$$

N	$2R_0, \text{ мм}$	$t_0, \text{ мм}$	$\sigma_B, \text{ МПа}$	n	$P_1, \cdot 10, \text{ МПа}$	$P_2, \cdot 10, \text{ МПа}$	$\frac{P_2}{P_1}$
1	820	10,0	575	0,144	1,460	1,522	1,043
2	820	10,0	618	0,131	1,620	1,651	1,019
3	820	10,0	593	0,131	1,490	1,586	1,064
4	1220	10,5	750	0,115	1,370	1,427	1,042
5	1220	10,5	715	0,113	1,320	1,364	1,033
6	1220	10,5	715	0,113	1,400	1,364	0,974

Здесь ξ_0 , μ и γ – параметры, определенные в (9), (24) и (26) через показатель упрочнения n и коэффициент двухосности m_0 .

С точки зрения условий эксплуатации трубопроводов наибольший интерес представляет диапазон значений $m_0 \in [0; 2]$.

В этом случае упрощение формул (29) и (24) за счет отбрасывания слагаемых порядка n^3 и выше приводит к формуле

$$P^* = \left(\frac{2}{3}\right)^n \frac{\sigma_B t_0 k_3}{R_0 \xi_0^{1-n}} \quad (30)$$

$$k_3 = 1 + n\gamma / 6 + \xi_0 \beta n^2 / 6 \quad (31)$$

Легко видеть, что если трубопровод не имеет осевых нагрузок, т.е. если $m_0 = 0.5$, то $\beta = 0$ и $\gamma = 0$. Тогда получается известная формула [4]:

$$P^* = \frac{2\sigma_B t_0}{\sqrt{3}^{1+n} R_0}$$

При наличии осевой нагрузки в трубопроводе формула (30) отличается от формулы (10) из [1] на коэффициент k_3 , определенный в (31). Зависимость коэффициента k_3 (кривые 1–5) от показателя степенного упрочнения материала n при $m_0 = 0; 0.5; 1; 1.5; 2.0$ показана на фиг. 2; зависимость k_3 (кривые 1–3) от коэффициента двухосности в начальный момент деформации m_0 при $n = 0.1; 0.2; 0.3$ – на фиг. 3. Видно, что влияние непостоянства m в процессе пластической деформации можно оценить в 2–5% при наличии растягивающей нагрузки и до 3–9% при наличии сжимающей нагрузки в трубопроводе, в зависимости от показателя упрочнения n . При $m_0 = 0.5$ (внешняя осевая нагрузка на трубу отсутствует) коэффициент $m = m_0$ постоянен. В диапазоне значений $m_0 \in [0; 2]$ последним слагаемым в (31) можно пренебречь (изображенные на фиг. 2 параболы мало отличаются от прямых). В этом случае

$$P^* = \left(\frac{2}{3}\right)^n \frac{\sigma_B t_0}{R_0 (m_0^2 - m_0 + 1)^{0.5(1-n)}} \left(1 + \frac{(2m_0 - 1)^2 (2 - m_0)^n}{6(m_0^2 - m_0 + 1)}\right) \quad (32)$$

Формулы (30), (32) могут быть использованы в инженерных расчетах.

В таблице приведены геометрические параметры, механические свойства металлов труб и экспериментальные значения максимальных давлений P_1 для труб, подвергнутых гидроиспытаниям (см. [1]). Там же указаны расчетные давления P_2 , полученные по формуле (30) при $m_0 = 0.5$, и отношение расчетных значений к экспериментальным.

В СН и П расчетное сопротивление растяжению (сжатию) R , вычисляется из равенства

$$R_1 = \frac{K_1}{K_2 K_3} \sigma_{B_{\min}} \quad (33)$$

где $\sigma_{B_{\min}}$ – наименьшее значение временного сопротивления металла трубы, а коэффициенты K_1 , K_2 и K_3 находятся независимо от параметра двухосности m . В качестве условия, определяющего рабочее давление P при данных внутреннем диаметре D_1 и толщине стенки t трубы принят критерий

$$R_1 = \sigma; \quad (34)$$

где интенсивность деформации (для $\sigma_1 < 0$):

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + |\sigma_1| \sigma_2 + \sigma_2^2}$$

σ_1 , σ_2 – продольные и кольцевые деформации в стенке трубы. Условие (34) позволяет вывести формулы (12)–(16) из СНиП, относящиеся к случаю, когда осевые напряжения отрицательны. В отличие от (33) и (34), формула (28) для вычисления критического значения интенсивности деформаций содержит параметр двухосности; это, по-видимому, говорит о том, что формула (33) носит упрощенный характер, а принятая в СНиП вычислительная схема может быть усовершенствована. Можно еще заметить, что в СНиП не используется в явном виде показатель степенной зависимости (в данной работе он обозначен n) напряжения от логарифмической деформации при одноосном растяжении основного металла трубы, влияющий на коэффициент надежности по материалу K_2 и могущий быть различным для труб, относящихся к одной строке таблицы для вычисления коэффициента надежности по материалу в СНиП. Таким образом, назрела необходимость внесения уточнений в СНиП (см. работу цитированную на с. 179).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Остсемин А.А., Заварухин В.Ю.* Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Пробл. прочности. 1993. № 12. С. 51–59.
2. *Ковальчук Б.И.* К вопросу о потере устойчивости пластического деформирования оболочек // Пробл. прочности. 1983. № 5. С. 11–17.
3. *Куркин С.А.* Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.
4. *Шеглов Б.А.* Оценка механических свойств листовых металлов при гидравлических испытаниях // Исследование процессов пластической деформации металлов. М.: Наука, 1965. С. 14–23.

Челябинск

Поступила в редакцию
24.10.1999