

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНЕШНЕМ ДАВЛЕНИИ И ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ

Т.В. Карпета

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: etv1980@mail.ru

Рассматриваются условия потери устойчивости при пластическом деформировании тонкостенной цилиндрической оболочки, в том числе трубы большого диаметра, при растягивающих (положительных) осевых напряжениях и сжимающих (отрицательных) кольцевых напряжениях. Цель статьи – вычислить критические деформации, напряжения, давления и осевые нагрузки на оболочку в зависимости от ее параметров и условий нагружения. Метод исследования основан на применении критерия Свифта–Марциньяка потери устойчивости процесса пластического деформирования. Материал оболочки предполагается изотропным с показательной диаграммой деформирования. Получены явные аналитические выражения для искомых величин. Результаты позволяют при данных параметрах оболочки и условиях нагружения определять критические давления и критические осевые нагрузки, а также толщины стенок при заданном рабочем давлении.

Ключевые слова: тонкостенная цилиндрическая оболочка; труба большого диаметра, пластическая устойчивость; критерий Свифта, критические деформации, критические напряжения; критические давления; локализация пластической деформации.

Введение. Значительное влияние на критическое давление в трубопроводах оказывает осевая нагрузка, приводящая к двухосному нагружению труб [1, 2]. Осевая сила, возникающая вследствие особых, иногда нештатных условий функционирования трубопроводов (при резких колебаниях температуры, под водой, в местности с подвижными грунтами, в горных условиях, в районах с высокой сейсмической активностью [3, 4]), приводит к осевым напряжениям σ_2 , противоположным по знаку кольцевым напряжениям σ_1 , порожденным внутренним или внешним давлением. Коэффициент двухосности нагружения трубы $m = \sigma_1 / \sigma_2$ существенно влияет на несущую способность магистральных трубопроводов [5–13]. В работах [8–13] критическое состояние тонкостенной цилиндрической оболочки (ТЦО) из однородного изотропного упрочняемого материала определялось на основе критерия Свифта–Марциньяка (СМ) потери стабильности пластического деформирования ТЦО [14–16]. В указанных работах кольцевые напряжения вызывались внутренним давлением. Внешнее давление не рассматривалось; в частности, не рассматривались случаи, когда осевые и кольцевые напряжения имеют разные знаки, т. е. когда $m < 0$.

Критическим состоянием (состоянием предразрушения) назовем состояние ТЦО, при котором деформирование всей оболочки или ее локального участка происходит без возрастания внешней нагрузки с неконтролируемой скоростью [16]. Как известно [16], существует два вида критического состояния тонкостенной цилиндрической оболочки из упрочняемого материала: *общая (тотальная) потеря стабильности процесса пластического деформирования* (ОПС) и *локализация пластической деформации* (ЛПД) в форме кольцевой шейки или продольной выпучины или вмятины. Какое из этих состояний реализуется, зависит от условий нагружения [10; 11, с. 25–27; 12, с. 28–30; 16]. Для нахождения критических интенсивностей деформаций и напряжений, соответствующих как ОПС, так и ЛПД, в работе применяется критерий Свифта [14] (использованный также Марциньяком [15]).

Обозначения и допущения. В работе $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) – осевые, кольцевые и радиальные нормальные напряжения (логарифмические деформации) стенки ТЦО соответственно, p – внутреннее или внешнее давление на ТЦО, N – осевая растягивающая ($N > 0$) или сжимающая сила,

$m = \sigma_1 / \sigma_2$ – коэффициент двухосности нагружения стенки ТЦО, $s = \sqrt{m^2 - m + 1}$. Нижний индекс cr указывает на критическое значение данной величины.

Материал оболочки полагается однородным, изотропным, упругопластическим, в пластической зоне упрочняемым. Предполагается, что диаграмма деформирования упрочняемого материала ТЦО имеет вид:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i), \quad (1)$$

где σ_i и ε_i – интенсивности напряжений и деформаций в стенке оболочки («гипотеза единой кривой»). При условии $\sigma_3 = 0$ (см. ниже (3)) σ_i и ε_i вычисляются по формулам соответственно:

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

В работе рассматриваются следующие основные параметры ТЦО (в том числе бесшовной трубы большого диаметра).

Геометрическими параметрами ТЦО являются ее внутренний радиус R и толщина стенки t . В начальный момент нагружения $R = R_0$, $t = t_0$.

Параметры, определяющие механические свойства материала ТЦО: 1) предел прочности (временное сопротивление) материала оболочки σ_B ; 2) параметры, определяющие зависимость (1): n и a (см. ниже (6)).

Главные напряжения в стенке ТЦО рассчитываются по формулам [17, с. 220]:

$$\sigma_1 = \frac{Rp}{2t} + \frac{N}{2\pi Rt}; \quad \sigma_2 = \frac{Rp}{t}; \quad \sigma_3 = 0, \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – осевые, кольцевые и радиальные нормальные напряжения в стенке трубы соответственно, p – внутреннее или внешнее давление, N – осевая растягивающая или сжимающая сила, t и R – толщина стенки и радиус оболочки. Из условий несжимаемости и пропорциональности девиаторов напряжений и деформаций, а также условия $\sigma_3 = 0$ следует [8–12]:

$$(2 - m)\varepsilon_1 = (2m - 1)\varepsilon_2. \quad (4)$$

Отсюда видно, что при $m < 0,5$ деформации ε_1 и ε_2 имеют разные знаки. Предполагаем, что внешняя нагрузка происходит по зависимости, при которой коэффициент двухосности нагружения стенки ТЦО $m = \sigma_1 / \sigma_2$ не изменяется в процессе нагружения. Всюду в работе будем считать, что

$$m = \sigma_1 / \sigma_2 = \text{const} < 0.$$

Ситуация, когда $m > 0$, подробно исследовалась в работах [8–13, 16]. В случае, когда $m \leq 0$, некоторые результаты сформулированы в [18, 19].

Цель работы – нахождение аналитических выражений для критических напряжений и деформаций стенок ТЦО (труб большого диаметра), критических давлений и осевых нагрузок на ТЦО, в зависимости от механических и геометрических параметров оболочек, в условиях внешнего давления и осевой растягивающей силы (кольцевые напряжения в стенках ТЦО отрицательны, осевые напряжения положительны). Результаты работы являются основой для аналогичных исследований ТЦО, содержащих геометрические и механические неоднородности, в том числе труб большого диаметра, содержащих сварные швы и дефекты различной природы [20–29]. В работе предполагается, что диаграмма деформирования аппроксимируется показательной-степенной зависимостью (6) (см. ниже).

Аппроксимация диаграммы деформирования. Во многих работах диаграмма деформирования (1) в пластической зоне аппроксимируется степенной функцией

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n, \quad A = e^n n^{-n} \sigma_B. \quad (5)$$

Тогда материал оболочки характеризуется параметром n – показателем упрочнения материала. Известны и применяются другие аппроксимации [17, 18]. В работе будет рассматриваться более общая, чем (5), аппроксимация функции (1) [8–10, 12, с. 27–30]:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n \exp(a\varepsilon_i), \quad A = (1 - a)^n e^n n^{-n} \sigma_B \quad (6)$$

с двумя параметрами, определяющими процесс деформирования упрочняемого материала. Коэффициент A в формуле (6) вычислен с применением критерия СМ [12, с. 27–30]. Аппроксимация (6) имеет два важных преимущества по сравнению с другими [12, с. 23–24] – она, во-первых, является обобщением и, следовательно, уточнением аппроксимации (5) и, во-вторых, она мультипликативна («удобно логарифмируется»), что желательно при использовании критерия СМ для получения обозримых аналитических зависимостей (в противном случае получаются не явные зависимости, связывающие критические значения деформаций, напряжений, давлений и т. д. с механическими и геометрическими параметрами конструкции, а трансцендентные уравнения для нахождения искомых величин).

Чтобы аппроксимировать реальные соотношения между ε_i и σ_i , функция (1) вида (6) должна быть выпуклой вверх по крайней мере на участке, соответствующем условию $\sigma_i \in [0; (\sigma_i)_{cr}]$. Используя полученные ниже формулы (8) и (9), средствами элементарного анализа можно доказать:

Предложение 1. Если $a < 0$, то функция вида (6) выпукла вверх на участке, соответствующем условию $\sigma_i \in [0; (\sigma_i)_{cr}]$. Если $a > 0$, то для выпуклости вверх функции вида (6) на этом участке необходимо и достаточно, чтобы, при осевом растяжении и внешнем давлении, выполнялось условие $0 < a < (1/2 - m)(1 - \sqrt{n})/s$.

Аппроксимация методом наименьших квадратов по формуле (6) известных, полученных в натуральных экспериментах (см. ссылки в работах [11, с. 22–24; 30, 31]), зависимостей для низкоуглеродистых сталей показала [32] выполнение условий Предложения 1 для параметра a .

Метод исследования. Как было отмечено, критическое состояние ТЦО может проявиться как в форме общей потери стабильности процесса пластического деформирования (ОПС), так и в форме локализации пластической деформации (ЛПД) в виде кольцевой шейки или продольной шейки либо выпучины.

На основе сравнения скорости роста интенсивности напряжений, связанных со свойствами материала, определяемыми его диаграммой деформирования, со скоростью роста интенсивности напряжений, определяемой изменением геометрии оболочки, критерий СМ позволяет вычислять критические деформации ТЦО, соответствующие той или иной форме потери оболочкой пластической стабильности. Как следствие, это дает возможность вычисления критических напряжений, давлений, осевых нагрузок при данных геометрических и механических параметрах ТЦО и условиях нагружения.

Основные результаты. Пусть ТЦО находится под действием осевой растягивающей силы и внешнего давления. В работе [16] доказано, при сделанных предположениях, что тогда

$$\sigma_i = \frac{sR_0(-p)}{t_0} \exp\left(\frac{1-2m}{2s} \varepsilon_i\right). \quad (7)$$

Приравняв дифференциалы выражений для σ_i из формул (6) и (7) (критерий СМ), получим критические выражения деформаций ε_i cr.

Предложение 2. Пусть ТЦО подвержена внешнему давлению и осевой растягивающей силе. Тогда: 1) критическое состояние ТЦО возникает в виде ЛПД – кольцевой шейки; 2) критическая интенсивность деформации вычисляется по формуле:

$$(\varepsilon_i)_{cr} = \frac{2sn}{1-2m-2as}. \quad (8)$$

Подставляя выражения для вычисления $(\varepsilon_i)_{cr}$ из (8) в (6), получим

Предложение 3. Пусть ТЦО подвержена внешнему давлению и осевой растягивающей силе. Тогда

$$(\sigma_i)_{cr} = \left(\frac{2(1-a)s \exp\left(\frac{1-2m}{1-2m-2as}\right)}{1-2m-2as} \right)^n \sigma_B. \quad (9)$$

Подставив вместо σ_i его выражение (9) в левую часть формулы (7), а вместо ε_i его выражение (8), найдем критическое давление на ТЦО в рассматриваемом случае.

Предложение 4. В условиях осевой растягивающей нагрузки и внешнего давления критическое давление вычисляется по формуле:

$$p_{cr} = - \left(\frac{1-a}{0,5-m-as} \right)^n \frac{t_0}{s^{1-n} R_0} \sigma_B. \quad (10)$$

В условиях осевой растягивающей нагрузки и внешнего давления критическое состояние возникает в виде кольцевой шейки, поэтому естественно найти величину критической осевой растягивающей силы. Подставляя (10) в (3), получим

Предложение 5. В условиях осевой растягивающей нагрузки и внешнего давления критическое растягивающее усилие вычисляется по формуле:

$$N_{cr} = \left(\frac{1-a}{0,5-m-as} \right)^n \frac{(1-2m)\pi R_0 t_0}{s^{1-n}} \sigma_B. \quad (11)$$

В частном случае, когда $a=0$, формулы (8)–(11) обращаются в полученные ранее соотношения [9, 18].

При $m=-\infty$ из формулы (11) следует, что $N_{cr} = 2\pi R_0 t_0 \sigma_B = S_0 \sigma_B$, где S_0 – площадь поперечного сечения ТЦО в начальный момент нагружения. Последнее означает, что при растяжении полого стержня характеристика состояния предразрушения – предел прочности – совпадает с пределом прочности, полученным при растяжении сплошного стержня.

Пусть p_w – рабочее давление в трубопроводе. Обращая формулу (10), получим критическую толщину стенки t_{cr} трубы, работающей в составе трубопровода, в зависимости от условий нагружения, которые характеризуются параметром m .

$$t_{cr} = s^{1-n} \left(\frac{1-0,5m-as}{1-a} \right)^n \frac{R_0 |p_w|}{\sigma_B} \quad (12)$$

Вычислительные эксперименты. Графики зависимостей от условий нагружения (параметра m) критического давления p_{cr} , осевой критической силы N_{cr} , критической толщины стенки трубы при данном рабочем давлении p_w , приведены на рис. 1–3. На всех рисунках кривые расположены в таком порядке снизу вверх: первые три линии – $n=0,2$, $a=0,2$; 0; $-0,2$ соответственно; следующие три линии – $n=0,1$, $a=0,2$; 0; $-0,2$ соответственно. Всюду предполагается $\sigma_B = 600$ МПа, $R_0 = 300$ мм. Всюду (кроме рис. 3) $t = 10$ мм. На рис. 3 рабочее давление принято $p_w = 8$ МПа.

Заключение. Получены зависимости критических деформаций, напряжений, давлений и осевых нагрузок от геометрических параметров ТЦО – толщины стенки t и радиуса R , механических характеристик σ_B , n и a и условий нагружения, характеризующихся отношением $m = \sigma_1 / \sigma_2$ осевых и кольцевых напряжений при его постоянном отрицательном значении в условиях осевого сжатия и внутреннего давления. Установлены зависимости критической толщины стенки t_{cr} трубы, работающей в составе трубопровода, от условий нагружения, которые характеризуются параметром m .

Установлено, что в случае осевой растягивающей нагрузки и внешнего давления:

1. При отсутствии осевых напряжений критическое давление примерно в 1,78...1,87 раза выше, чем при условии, когда осевые и кольцевые напряжения (по модулю) совпадают.
2. Осевые напряжения самым существенным образом влияют на критическую толщину стенок (рис. 3).
3. Осевые напряжения самым существенным образом влияют на величину критического давления (рис. 1). Из рис. 1 видно, что, в зависимости от значений параметров n и a , при отсутствии осевых напряжений критическое давление примерно в 1,78...1,87 раза выше, чем при условии, когда осевые и кольцевые напряжения (по модулю) совпадают.

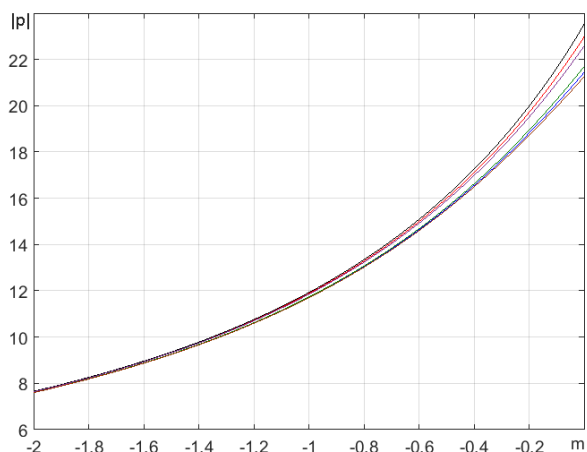


Рис. 1. Зависимость критического давления p_{cr} (в МПа) от параметра нагружения $m = \sigma_1 / \sigma_2$ при различных значениях показателей упрочнения n и a , вычисленная по формуле (10)

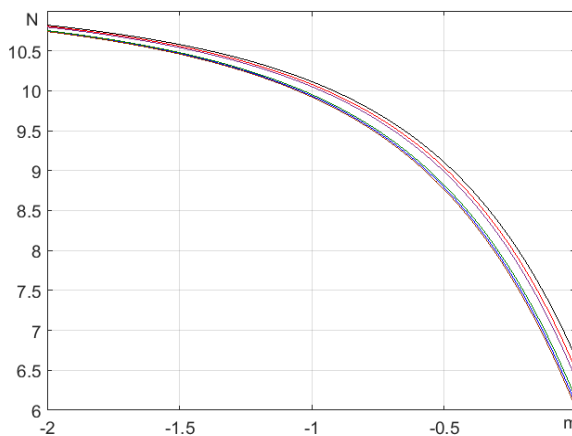


Рис. 2. Зависимость критической осевой растягивающей силы N_{cr} (в МН) от параметра нагружения $m = \sigma_1 / \sigma_2$ при различных значениях показателей упрочнения n и a , вычисленная по формуле (11)

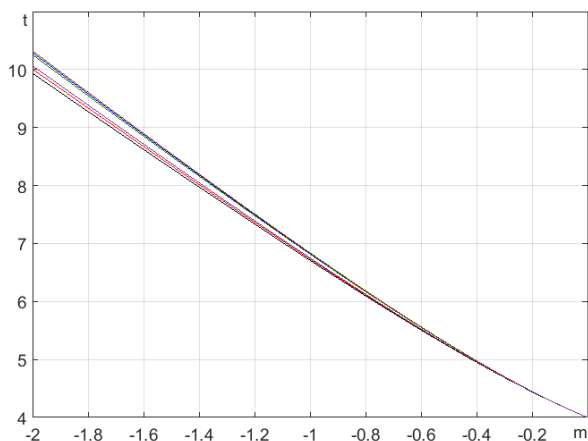


Рис. 3. Зависимость критической толщины стенки t_{cr} (в мм) от параметра нагружения $m = \sigma_1 / \sigma_2$ при различных значениях показателей упрочнения n и a и рабочего давления $p_w = 8$ МПа, вычисленная по формуле (12)

4. Критическое состояние возникает при всех отрицательных значениях m в виде кольцевой шейки.

5. Влияние параметров упрочнения n и a в предложенном диапазоне на критическое состояние ТЦО незначительно (рис. 1–3).

6. При растяжении полого стержня характеристика состояния предразрушения – предел прочности – совпадает с пределом прочности, полученным при растяжении сплошного стержня.

Литература

1. Системная надежность трубопроводного транспорта углеводородов / В.Д. Черняев, К.В. Черняев, В.Л. Березин и др. – М.: Наука, 1997. – 516 с.
2. Бородавкин, П.П. Сооружение магистральных трубопроводов / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
3. Hector, S.S. Deformation of steel pipes with internal pressure under axial compression and bending load under seismic action / S.S. Hector, S.C. Carlos // The 14-th World Conference on Earthquake Engineering. October 12–17, 2008. Beijing, China.
4. Eiber, P.J. Outside Force Causes Most Natural Gas Pipeline Failures / P.J. Eiber // Oil and Gas J. – 1987. – Vol. 85, no. 11. – P. 52–57.
5. Малинин, Н.Н. Устойчивость двухосного пластического растяжения анизотропных листов и цилиндрических оболочек / Н.Н. Малинин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – № 2. – С. 115–118.

6. Моношков, А.Н. Пластическая устойчивость и ее роль в оценке прочности труб / А.Н. Моношков, С.И. Пыхов, И.А. Пустин // Производство труб с покрытиями, отделка и контроль качества труб. – М.: Metallurgy, 1972. – С. 77–81.
7. Куркин, С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / С.А. Куркин. – М.: Машиностроение, 1976. – 183 с.
8. Дильман, В.Л. О влиянии двухосности нагружения на несущую способность труб магистральных газонефтепроводов / В.Л. Дильман, А.А. Остсемин // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2000. – № 5. – С. 179–185.
9. Дильман, В.Л. О потере пластической устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек / В.Л. Дильман, А.А. Остсемин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 5. – С. 50–57.
10. Дильман, В.Л. Пластическая неустойчивость тонкостенных цилиндрических оболочек / В.Л. Дильман // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2005. – № 4. – С. 141–151.
11. Дильман, В.Л. Математические модели напряженного состояния неоднородных тонкостенных цилиндрических оболочек / В.Л. Дильман. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 201 с.
12. Дильман, В.Л. Математическое моделирование критических состояний мягких прослоек в неоднородных соединениях / В.Л. Дильман, Т.В. Ерошкина. – Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2011. – 275 с.
13. Дильман, В.Л. Критическое состояние тонкостенной цилиндрической оболочки, содержащей прослойку из менее прочного материала / В.Л. Дильман, Т.В. Карпета // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 21–24.
14. Swift, H.W. Plastic Instability under Plane Stress / H.W. Swift // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1952. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–18.
15. Marciniak, Z. Utrata stateczności rozciąganych powłok plastycznych / Z. Marciniak // Mech. teoretyczna i stosowana. – 1966. – Vol. 4, no. 3. – P. 209–220.
16. Ковальчук, Г.И. К вопросу о потере устойчивости пластического деформирования оболочек / Г.И. Ковальчук // Проблемы прочности. – 1983. – № 5. – С. 11–16.
17. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 415 с.
18. Дяб А.Н. Критические состояния однородных тонкостенных цилиндрических оболочек при внутреннем давлении и осевом сжатии / А.Н. Дяб // Фундамент. проблемы основных направлений научно-техн. исследований: сб. трудов Междунар. научно-практ. конференции (Волгоград, 17 марта 2018 г.). – Стерлитамак: АМИ, 2018. – С. 35–39.
19. Dilman, V.L. Modelling of Critical Conditions Thin-Walled Cylindrical Shells with a Negative Coefficient Biaxial Loading / V.L. Dilman, T.V. Karpeta, A.N. Dheyab // “Modern problems of innovative technologies in oil and gas production and apply mathematics”. Proceeding of international conference. Baku, December 13–14, 2018. – 2018. – P. 45–47.
20. Dil'man, V.L. Strength of Straight-Seam and Spiral-Seam Pipes in Transmission Gas and Oil Pipelines / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2001. – Vol. 15, Iss. 7. – pp. 557–562.
21. Dil'man, V.L. Static Strength of Welded Joints in Spiral-Seam Pipes / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin, A.A. Voronin // Welding International. – 2001. – Vol. 15, Iss. 10. – P. 812–815.
22. Dil'man, V.L. Evaluation of the Effect of Defects and Service Reliability of Welded Joints in Straight-Seam and Spiral-Seam Pipes / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2002. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 139–144.
23. Dil'man, V.L. Load-Carrying Capacity of Straight-Seam Large Diameter Pipes with Defects at the Fusion Boundary of the Welded Joint / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2003. – Vol. 17, Iss. 5. – P. 376–380.
24. Dil'man, V.L. Static Strength of a Welded Joint with Hard Interlayers and Defect at the Fusion Line of the Weld / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Welding International. – 2004. – Vol. 18, no. 10. – P. 805–808.
25. Dil'man, V.L. Analysis of the Ductile Strength of Welds Weakened by Notches in Longitudinally Welded Pipes of Large Diameter by the Method of Slip Lines / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Strength of Materials. – 2004. – Vol. 36, Iss. 3. – P. 274–281.

26. Dil'man, V.L., Bearing Capacity of Large-Diameter Helical-Seam Pipes / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2002. – Vol. 38, Iss. 5–6. – P. 326–333.

27. Ostsemin, A.A. Calculating Wall Thickness for Major Oil Product Pipelines: Analysis of Regulation Documents / A.A. Ostsemin, V.L. Dil'man // Chemical and Petroleum Engineering. – 2002. – Vol. 38, Iss. 1–2. – P. 58–63.

28. Dil'man, V.L. Effects of Surface Defects on the Static Strength of Welds in Spiral-Seam Tubes / V.L. Dil'man, A.A. Ostsemin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2004. – Vol. 40, Iss. 1–2. – P. 87–93.

29. Ostsemin, A.A. Calculation of Test Pressure for Arterial Pipelines / A.A. Ostsemin, V.L. Dil'man // Chemical and Petroleum Engineering. – 2003. – Vol. 39, Iss. 1–2. – P. 16–22.

30. Воронцов, А.Л. Об аппроксимации кривых упрочнения / А.Л. Воронцов // Вестник машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 51–54.

31. Кроха, В.А. О зависимости показателя деформационного упрочнения от степени деформации и выполнении степенного закона упрочнения / В.А. Кроха // Проблемы прочности. – 1981. – № 8. – С. 72–77.

32. Дильман, В.Л. О влиянии аппроксимации диаграммы деформирования на точность критериев несущей способности тонкостенных оболочек / В.Л. Дильман, А.А. Эбель // Обзорные прикладной и промышленной математики. – 2006. – Т. 13. – Вып. 4. – С. 638–639.

Поступила в редакцию 30 сентября 2019 г.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2019, vol. 11, no. 4, pp. 47–55*

DOI: 10.14529/mmph190406

MATHEMATICAL MODELING OF FRACTURE CONDITIONS OF THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS UNDER EXTERNAL PRESSURE AND AXIAL TENSION

T.V. Karpeta

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: etv1980@mail.ru

The stability loss conditions under plastic deformation of a thin-walled cylindrical shell, including large-diameter pipes, under tensile (positive) axial stresses and compressive (negative) ring stresses are considered. The purpose of the article is to specify the dependences of critical deformations, stresses, pressures, and axis loads on the shell on the parameters and loading conditions. The research method is based on the application of Swift–Marciniak criterion on the loss in stability of the plastic deformation process. The material of the shell is assumed to be isotropic with exponential-power deformation diagram. Explicit analytical expressions for the target values were obtained. Considering the given parameters of the shell and loading conditions, the results allow to determine critical pressures, critical axial loads and wall thickness at a given working pressure.

Keywords: thin-walled cylindrical shell; large-diameter pipe; plastic stability; Swift criterion; critical deformations; critical stresses; critical pressures; localization of plastic deformation.

References

1. Chernyaev V.D., Chernyaev K.V., Berezin V.L. *et al. Sistemnaya nadezhnost' truboprovodnogo transporta uglevodorodov* (System Reliability of Hydrocarbon Pipeline Transport). Moscow, Nauka Publ., 1997, 516 p. (in Russ.).

2. Borodavkin P.P., Berezin V.L. *Sooruzhenie magistral'nykh truboprovodov* (Main pipeline construction). Moscow, Nedra Publ., 1987, 471 p. (in Russ.).

3. Hector S.S., Carlos S.C. Deformation of Steel Pipes with Internal Pressure under Axial Compression and Bending Load Under Seismic Action. *The 14-th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12–17, 2008, Beijing, China.

4. Eiber P.J. Outside Force Causes Most Natural Gas Pipeline Failures. *Oil and Gas J.*, 1987, Vol. 85, no. 11, pp. 52–57.

5. Malinin N.N. Ustoychivost' dvukhosnogo plasticheskogo rastyazheniya anizotropnykh listov i tsilindricheskikh obolochek (Biaxial Plastic Extension Stability of Anisotropic Sheets and Cylindrical Shells). *Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1971, no. 2, pp. 115–118. (in Russ.).

6. Monoshkov A.N., Pykhov S.I., Pustin I.A. Plasticheskaya ustoychivost' i ee rol' v otsenke prochnosti trub (Plastic Stability and its Role in Assessing Pipes Strength). *Proizvodstvo trub s pokrytiyami, otdelka i kontrol' kachestva trub* (Coated Pipe Manufacturing, Pipe Finishing and Quality Control), Moscow, Metallurgiya Publ., 1972, pp. 77–81. (in Russ.).

7. Kurkin S.A. *Prochnost' svarnykh tonkostennykh sosudov, rabotayushchikh pod davleniem* (Strength of Welded Thin-Walled Pressure Vessels). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 183 p. (in Russ.).

8. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. O vliyaniy dvukhosnosti nagruzheniya na nesushchuyu sposobnost' trub magistral'nykh gazonefteprovodov (On the Effect of the Deformation Diagram Approximation on the Accuracy of the Criteria of the Thin-Walled Shells Bearing Capacity). *Izv. RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2000, no. 5, pp. 179–185. (in Russ.).

9. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. O potere plasticheskoy ustoychivosti tonkostennykh tsilindricheskikh obolochek (On the Loss of Plastic Stability of Thin-Walled Cylindrical Shells). *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2002, no. 5, pp. 50–57. (in Russ.).

10. Dil'man V.L. Plastic Instability of Thin-Walled Cylindrical Shells. *Mech. Solids*, 2005, Vol. 40, Iss. 4, pp. 113–121.

11. Dil'man V.L. *Matematicheskie modeli napryazhennogo sostoyaniya neodnorodnykh tonkostennykh tsilindricheskikh obolochek* (Mathematical Models of the Stress State of Inhomogeneous Thin-Walled Cylindrical Shells), Chelyabinsk, Izd-vo YuUrGU Publ., 2007, 201 p. (in Russ.).

12. Dil'man V.L., Eroshkina T.V. *Matematicheskoe modelirovanie kriticheskikh sostoyaniy myagkikh prosloek v neodnorodnykh soedineniyakh* (Mathematical Modeling of Soft Layers Critical State in Inhomogeneous Compounds). Chelyabinsk, Izdatel'skiy Tsentr YuUrGU Publ., 2011, 275 p. (in Russ.).

13. Dilman V.L., Karpeta T.V. Critical State of a Thin-Walled Cylindrical Shell Containing an Interlayer Fabricated from a Material of Lesser Strength. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, Vol. 49, Issue 9–10, pp. 668–674.

14. Swift H.W. Plastic Instability under Plane Stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1952, Vol. 1, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1016/0022-5096(52)90002-1

15. Marciniak Z. Utrata stateczności rozciąganych powłok plastycznych. *Mech. teoretyczna i stosowana*, 1966, Vol. 4, no. 3, pp. 209–220.

16. Koval'chuk G.I. K voprosu o potere ustoychivosti plasticheskogo deformirovaniya obolochek (On the Issue of Plastic Deformation Stability Loss of the Shells). *Problemy prochnosti*, 1983, no. 5, pp. 11–16. (in Russ.).

17. Pisarenko G.S. *Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* (Deformation and Strength of Materials under Complex Stress State). Kiev, Naukova dumka Publ., 1976, 415 p. (in Russ.).

18. Diyab A.N. Kriticheskie sostoyaniya odnorodnykh tonkostennykh tsilindricheskikh obolochek pri vnutrennem davlenii i osevom szhatii (Critical States of Homogeneous Thin-Walled Cylindrical Shells under Internal Pressure and Axial Compression). *Fundament. problemy osnovnykh napravleniy nauchno-tekhn. issledovaniy: sb. trudov Mezhdunar. nauchno-prakt. Konferentsii, Volgograd, 17 marta 2018 g.* (Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Fundamental Problems of the Main Directions of Scientific and Technical Research”, Volgograd, March 17, 2018), Sterlitamak, AMI Publ., 2018, pp. 35–39. (in Russ.).

19. Dilman V.L., Karpeta T.V., Dheyab A.N. Modelling of Critical Conditions Thin-Walled Cylindrical Shells with a Negative Coefficient Biaxial Loading. *Proc. Int. conference «Modern problems of innovative technologies in oil and gas production and apply mathematics»*, Baku, December 13–14, 2018, pp. 45–47.

20. Dil'man V.L., Ostsemin A.A. Strength of Straight-Seam and Spiral-Seam Pipes in Transmission Gas and Oil Pipelines. *Welding International*, 2001, Vol. 15, Iss. 7, pp. 557–562. DOI: 10.1080/09507110109549404

21. Dilman V.L., Ostsemin A.A., Voronin A.A. Static Strength of Welded Joints in Spiral-Seam Pipes. *Welding International*, 2001, Vol. 15, Iss. 10, pp. 812–815. DOI: 10.1080/09507110109549447

22. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Evaluation of the Effect of Defects and Service Reliability of Welded Joints in Straight-Seam and Spiral-Seam Pipes. *Welding International*, 2002, Vol. 16, Iss. 2, pp. 139–144. DOI: 10.1080/09507110209549507

23. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Load-Carrying Capacity of Straight-Seam Large Diameter Pipes with Defects at the Fusion Boundary of the Welded Joint. *Welding International*, 2003, Vol. 17, Iss. 5, pp. 376–380. DOI: 10.1533/wint.2003.3013

24. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Static Strength of a Welded Joint with Hard Interlayers and Defect at the Fusion line of the Weld. *Welding International*, 2004, Vol. 18, Iss. 10, pp. 805–808. DOI: 10.1533/weli.17.5.376.22011

25. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Analysis of the Ductile Strength of Welds Weakened by Notches in Longitudinally Welded Pipes of large Diameter by the Method of Slip Lines. *Strength of Materials*, 2004, Vol. 36, Iss. 3, pp. 274–281. DOI: 10.1023/B:STOM.0000035761.47001.4c

26. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Bearing Capacity of Large-Diameter Helical-Seam Pipes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2002, Vol. 38, Iss. 5–6, P. 326–333. DOI: 10.1023/A:1020146314335

27. Ostsemin A.A., Dil'man V.L. Calculating Wall Thickness for Major Oil Product Pipelines: Analysis of Regulation Documents. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2002, Vol. 38, Iss. 1–2, pp. 58–63. DOI: 10.1023/A:1015278306138

28. Dilman V.L., Ostsemin A.A. Effects of Surface Defects on the Static Strength of Welds in Spiral-Seam Tubes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2004, Vol. 40 (1–2), pp. 87–93. DOI: 10.1023/B:CAPE.0000024143.53688.ca

29. Ostsemin A.A., Dil'man V.L. Calculation of Test Pressure for Arterial Pipelines. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2003, Vol. 39, Iss. 1–2, pp. 16–22. DOI: 10.1023/A:1023730221885

30. Vorontsov A.L. Ob approksimatsii krivykh uprochneniya (On the Approximation of Hardening Curves). *Vestnik mashinostroeniya*, 2002, no. 1, pp. 51–54. (in Russ.).

31. Krokha V.A. O zavisimosti pokazatelya deformatsionnogo uprochneniya ot stepeni deformatsii i vypolnenii stepennogo zakona uprochneniya (On the Approximation of Hardening Curves Dependence of the Strain Hardening Index on the Degree of Deformation and the Fulfillment of the Power Hardening Law). *Problemy prochnosti*, 1981, no. 8, pp. 72–77. (in Russ.).

32. Dil'man V.L., Ebel' A.A. O vliyanii approksimatsii diagrammy deformirovaniya na tochnost' kriteriev nesushchey sposobnosti tonkostennykh obolochek (On the Dependence of the Strain Hardening Index on the Degree of Deformation and the Implementation of the Power Law of Hardening). *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki*, 2006, Vol. 13, Iss. 4, pp. 638–639. (in Russ.).

Received September 30, 2019