

Tính toán tuổi thọ còn lại của bể chứa trụ thép có khuyết tật dạng nứt tại bản dưới cùng thành bể

Calculation of residual life of vertical steel tanks with crack-like defect in the first plate

Vũ Lệ Quyên

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu cách dự đoán tuổi thọ còn lại của bể chứa trụ thép có khuyết tật dạng vết nứt ở tấm đầu tiên thông qua tính toán số chu kỳ vận hành còn lại của bể cho tới khi bị phá hoại theo các quy định hiện hành của Nga. Điểm khác biệt của cách tính này là tính đến trạng thái ứng suất phức tạp thành bể, sử dụng các tham số về độ bền nứt theo chu kỳ được xác định theo ứng suất hai phương và phương trình hiệu chỉnh cho kích thước và vết nứt cụ thể của bể.

Từ khóa: Kết cấu thép, bể thép trụ đứng, khuyết tật, tuổi thọ, kết cấu bản

Abstract

This paper introduces a method for predicting the residual life of vertical steel tanks with a crack-like defect in the first plate by calculating the remaining operating cycle of the tank until the destruction in accordance with the current Russia regulations. The difference of this calculation is residual life considering the complex state of the tank wall's stress, using the parameters of cyclic crack strength defined under biaxial loading and the calibration function for a particular size and crack of the tank.

Key words: Steel constructions, vertical steel tank, defect, residual life, plate structure

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, cùng với sự phát triển không ngừng của nền kinh tế xã hội, nhu cầu sử dụng khai thác dầu khí và các chế phẩm cũng tăng lên nhanh chóng. Cùng với đó, việc thiết kế, lắp đặt và đưa vào vận hành các hệ thống bể chứa với dung tích lớn để đáp ứng việc tồn trữ, vận chuyển, đảm bảo không bị thất thoát cháy nổ... là rất cần thiết. Bể chứa ngoài chịu tác động của tải trọng, nhiệt độ, môi trường còn có thể bị ảnh hưởng bởi khuyết tật do công nghệ, thi công và trong quá trình vận chuyển, điều này làm giảm đáng kể tuổi thọ của công trình cũng như hiệu quả kinh tế.

Thành bể là bộ phận chịu lực chính, có cấu tạo gồm nhiều bản thép hàn lại với nhau [1]. Bản thép đầu tiên tiếp giáp với đáy bể chịu ứng suất phức tạp do là nơi chịu tải lớn nhất, bên cạnh đó cũng là nơi thường đặt các van, đường ống, vòi xả, khi có khuyết tật tại đây sẽ ảnh hưởng vô cùng bất lợi cho kết cấu (hình 1). Vì vậy việc tính toán dự đoán tuổi thọ của bể chứa khi có khuyết tật dạng nứt tại bản đầu tiên là rất cần thiết, điều này giúp xác định giai đoạn bảo trì, sửa chữa hợp lý, tăng hiệu quả kinh tế, giảm mức độ nguy hiểm trong trường hợp xảy ra các tình huống khẩn cấp [3-5].

2. Phương pháp tính toán

Tính toán đánh giá tuổi thọ của bể có khuyết tật dạng vết nứt trong nhiều năm gần đây sử dụng phổ biến phương pháp phá hủy cơ học được viết bởi phương trình Peris [2, 4-10]:

$$da/dN = C(\Delta K_I)^n \quad (1)$$

Trong đó: da/dN - Tốc độ phát triển vết nứt; a - thông số kích thước vết nứt; N - số chu kỳ lặp của tải trọng; C, n - các hệ số xác định thông qua thí nghiệm vật liệu làm bể với tải trọng cụ thể; ΔK_I - hệ số chênh lệch ứng suất tại đỉnh của vết nứt trong một chu kỳ chịu tải, $\Delta K_I = K_{\max} - K_{\min}$, trong đó $K_{\max}$, $K_{\min}$ là hệ số ứng suất lớn nhất và nhỏ nhất trong một chu kỳ phụ thuộc vào tải trọng tác dụng, kích thước và hình dạng vết nứt, đặc trưng hình học của kết cấu bể.

ΔK_I có thể được viết bởi phương trình sau:

$$\Delta K_I = Y_1 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Trong đó: $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ - sự chênh lệch ứng suất lớn nhất và nhỏ nhất trong chu kỳ; Y_1 - hàm số hiệu chỉnh K, không thứ nguyên, phụ thuộc vào đặc điểm hình học của bể, thông số vết nứt và điều kiện chất tải.

Với giả thiết rằng chiều dài vết nứt thay đổi từ chiều dài ban đầu a tới chiều dài tới hạn a_{cr} , số chu kỳ diễn ra cho tới khi kết cấu bị phá hoại được tính bởi công thức:

$$N_p = \frac{a^{(1-0.5n)} - a_{cr}^{(1-0.5n)}}{(0.5n-1) \cdot C \cdot (0.5\pi)^{0.5n} \cdot \Delta \sigma^n} \quad (3)$$

Tuy nhiên mô hình tính toán theo công thức (3) có các nhược điểm sau:

- Bể chứa trong trường hợp này được coi như mô hình lý tưởng, không tính đến các vị trí giảm yếu của bản như van, đường ống hay vòi xả;

- Trên thành bể có trạng thái ứng suất phức tạp theo hai phương gồm ứng suất kéo vòng và ứng suất kinh tuyến [1], do đó các tham số đặc trưng cho độ bền nứt cần được xác định theo điều kiện chịu ứng suất 2 phương [13]. Bên cạnh đó, hằng số C không là đại lượng độc lập khi phụ thuộc vào bậc n do vậy không thể là đặc trưng của vật liệu. Để mô tả sự phát triển ổn định của

ThS. Vũ Lệ Quyên

Bộ môn Kết cấu thép - gỗ, Khoa Xây dựng

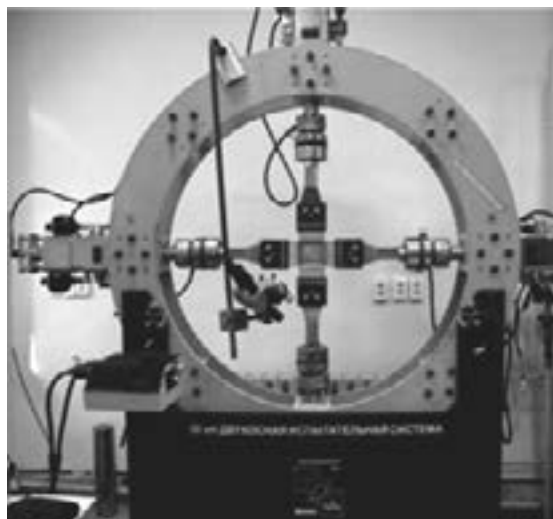
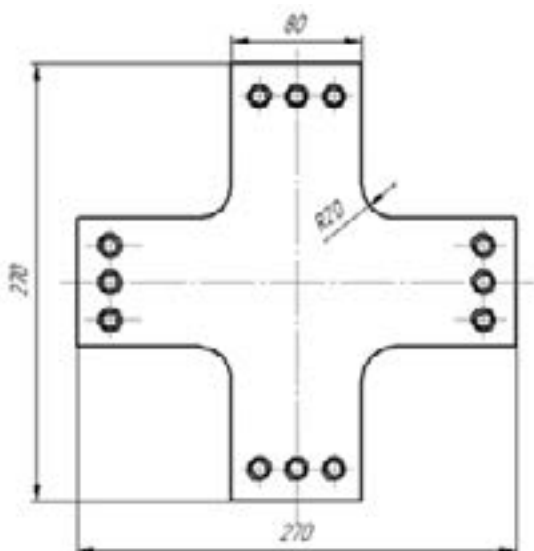
ĐT: 097.2486.583

Email: lequyen.vu.hau@gmail.com

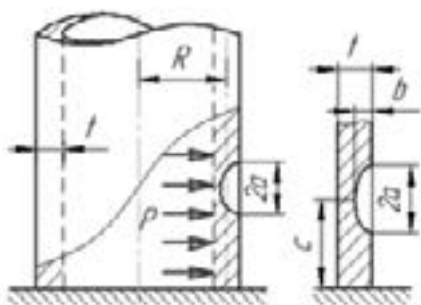
Ngày nhận bài: 07/5/2020

Ngày sửa bài: 28/5/2020

Ngày duyệt đăng: 15/7/2021



Hình 1. Thử nghiệm vật liệu bể để xác định các hệ số cường độ ứng suất



Hình 2. Mô hình bể chứa có khuyết tật nứt phía mặt ngoài dạng elip

vết nứt có thể sử dụng phương trình sau [14]:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right) \left(\frac{K_{max}}{K^*} \right)^n \quad (4)$$

Trong đó K^* là hệ số độ lớn ứng suất ứng lớn nhất với tốc độ phát triển vết nứt $da/dN = 10^{-4}$ mm/chu kỳ;

Như phân tích được nêu trong quy chuẩn và các tài liệu tham khảo [4-10] khi tính toán coi bể chứa như tấm bán vô hạn gắn với ứng suất kéo một phương. Bên cạnh đó, trong công thức (3) hệ số cường độ ứng suất K xác định với hàm số hiệu chỉnh không đổi. Tuy nhiên với sự phát triển của vết nứt và thay đổi điều kiện chất tải, hàm số này sẽ thay đổi do sự giảm chu kỳ trước khi bị phá hoại [13,14].

Do đó phương pháp với cách tính hiện có không thể đánh giá được đủ chính xác độ bền của bể chứa với khuyết tật nứt cụ thể đặc biệt là ở bản đầu tiên nơi chịu tải trọng lớn nhất. Trên cơ sở đã nêu, giới thiệu cách tính dự đoán thời gian sử dụng còn lại của bể chứa trụ thép với vết nứt dạng bán elip ở bản thứ nhất.

Các thông số sử dụng để tính toán:

- Thông số bể: bán kính trung bình mặt bể r , độ dày thành bể t , chiều cao bể H , chiều cao chất lỏng trong bể h , chiều cao bản đầu tiên l , trọng lượng bể, mái...;
- Thông số vết nứt: chiều dài vết nứt $2a$, độ sâu vết nứt

b , khoảng cách từ đáy bể tới vị trí khuyết tật c ;

- Chu kỳ lặp chịu tải trong một năm lấy bằng số chu kỳ của năm cuối đang vận hành bể chứa.

Khi tính toán ta sẽ chấp nhận các giả thiết sau:

- Trong quá trình phát triển vết nứt mối quan hệ giữa chiều sâu và độ dài vết nứt là không đổi;
- Tính toán cho vết nứt nằm vuông góc với ứng suất kéo;
- Vật liệu làm việc ở giai đoạn đàn hồi;
- Tính toán cho vết nứt cụ thể trên thành bể.

Trình tự tính toán được thực hiện như sau:

1. Xác định ứng suất vòng σ_2 và ứng suất kinh tuyến σ_1 tại vùng có chứa khuyết tật, hệ số 2 phương $\eta = \sigma_2 / \sigma_1$ [13];
2. Xác định hiệu số ứng suất vòng lớn nhất:

$$\Delta \sigma_2 = \sigma_2^{max} - \sigma_2^{min} \quad (5)$$

Trong đó: σ_2^{max} , σ_2^{min} : ứng suất vòng lớn nhất và nhỏ nhất trên thành bể phụ thuộc vào tải trọng trong thời gian một chu kỳ;

3. Bằng phương pháp thực nghiệm [13] trên mẫu vật liệu bể như hình 1 xác định các tham số chu kỳ bền nứt: các hệ số cường độ ứng suất tới hạn K_{cr} ; hệ số cường độ bền mỏi K_f ; hệ số bền nứt chu kỳ n ; hệ số cường độ ứng suất K^* ứng

Bảng 1. Hàm số hiệu chỉnh cho vết nứt tải bản đầu tiên của bể chứa trụ đứng thép

Thể tích bể, m ³	c/l	Hàm số hiệu chỉnh Y_I phụ thuộc vào vị trí vết nứt	
		Giữa các vòi xả	Cách 1,5 lần đường kính ống xả
5000	0,2	$0,4207 + 0,06057(h/H)$ $+2,118(b/t)-0,05378(h/H)^2$ $+0,03873(h/H)(b/t) - 1,727(b/t)^2$	$0,4371 + 0,03776(h/H)$ $+2,094(b/t)-0,02763(h/H)^2$ $+0,02526(h/H)(b/t) - 1,568(b/t)^2$
	0,4	$0,4733 + 0,0155(h/H)$ $+1,962(b/t)-0,0172(h/H)^2$ $+0,01966(h/H)(b/t) - 1,512(b/t)^2$	$0,318 + 0,02907(h/H)$ $+2,701(b/t)-0,02953(h/H)^2$ $+0,02897(h/H)(b/t) - 2,045(b/t)^2$
	0,6	$0,4738 + 0,06118(h/H)$ $+1,914(b/t)-0,045(h/H)^2$ $+0,0116(h/H)(b/t) - 1,401(b/t)^2$	$0,2868 + 0,01917(h/H)$ $+2,883(b/t) - 0,01104(h/H)^2$ $+0,01153(h/H)(b/t) - 2,087(b/t)^2$
	0,8	$0,3888 + 0,1868(h/H)$ $+2,125(b/t)-0,1401(h/H)^2$ $+0,03575(h/H)(b/t) - 1,609(b/t)^2$	$0,2799 + 0,04145(h/H)$ $+2,987(b/t)-0,01869(h/H)^2$ $+0,04545(h/H)(b/t) - 2,174(b/t)^2$

với vận tốc phát triển vết nứt $(da/dN)^*=10^{-4}$ mm/chu kỳ, trong điều kiện ứng suất hai phương với hệ số hai phương η xác định trong mục 1.

$$K = \frac{\Delta\sigma\sqrt{\pi a}}{2} [(1+\eta) - (1-\eta)\cos 2\alpha] Y_I \quad (6)$$

Trong đó α góc tạo bởi vết nứt và phương của ứng suất lớn nhất

4. Xác định hàm số hiệu chỉnh $Y_I(b/t, c/h/H)$ phụ thuộc vào vị trí vết nứt và kích thước của bể chứa. Trong bảng 1 đưa ra các biểu thức của hàm số hiệu chỉnh K cho bể chứa có thể tích 5000m³.

5. Tính toán độ sâu không mở rộng b_f và độ sâu tới hạn b_{cr} của vết nứt

$$b_f = \frac{K_f^2}{(Y_I \cdot \sigma_f)^2 \pi} \quad (7)$$

$$b_{cr} = \frac{K_{cr}^2}{(Y_I \cdot \sigma_2^{max})^2 \pi} ; b_{cr} \leq 0,8 \cdot t \quad (8)$$

Trong đó: σ_f : độ bền môi; σ_2^{max} : ứng suất vòng lớn nhất trong vùng có khuyết tật; t : độ dày thành bể.

6. Khả năng chịu lực của kết cấu chấm dứt khi hệ số cường độ ứng suất tại điểm sâu nhất của trên bề mặt vết nứt đạt tới giá trị tới hạn K_{cr} dẫn đến sự phát triển không ngừng của vết nứt; độ sâu bề mặt vết nứt đạt giá trị tới hạn b_{cr} .

Tính toán số chu kỳ chịu tải an toàn còn lại cho tới khi kết cấu bị phá hoại theo phương trình:

$$N = \frac{I}{k_v} \int_{b_o}^{b_{cr}} \frac{db}{10^{-4} \left(\frac{\Delta\sigma_2 \sqrt{\pi b} \cdot Y_I}{K^*} \right)^n} \quad (9)$$

Trong đó $k_v = 3.4$ hệ số an toàn phát triển vết nứt

7. Tính toán thời gian sử dụng còn lại của bể chứa (năm)

$$T = \frac{N}{N_{nam}} \quad (10)$$

Trong đó T – thời gian sử dụng an toàn còn lại của bể có khuyết tật; N – số chu kỳ chịu tải an toàn còn lại; N_{nam} – số chu kỳ chịu tải trong 1 năm gần nhất.

3. Ví dụ tính toán

Tính toán thời hạn sử dụng còn lại của bể chứa 5000m³ có khuyết tật dạng vết nứt tại bản đầu tiên.

Bể có thông số như sau: bán kính $R = 11,4$ m; chiều cao bể $H = 12$ m, chiều cao bản thép đầu tiên $l = 1,5$ m; độ dày bản thép đầu tiên $t = 8,7$ mm, độ dày bản thứ hai $6,7$ mm, độ dày bản thứ ba $5,7$ mm, độ dày các bản từ 4 đến 8 là $4,7$ mm.

Chiều cao mực chất lỏng lớn nhất cho phép $11,36$ m; trong thực tế mực chất lỏng cao nhất trong bồn chiếm 95% mực chất lỏng cho phép, mực chất lỏng thấp nhất chiếm 65% mực chất lỏng cho phép.

Trọng lượng mái và các thiết bị cố định $G_m = 32,6$ kN; trọng lượng thành bể từ khoảng cách $0,7$ m so với đáy $G_{kc} = 875,022$ kN; áp lực dư $p_d = 0,002$ MPa; áp lực chân không tiêu chuẩn $p_o = 0,0015$ MPa; tỷ khối chất lỏng $\rho = 820$ kg/m³; tải trọng tạm thời $0,0018$ MPa; vật liệu làm bể có cường độ kéo đứt tiêu chuẩn $f_u = 483$ MPa, giới hạn chảy $f_y = 294$ MPa.

Vết nứt tại vị trí giữa các ống xả có thông số như sau: khoảng cách từ đáy bể tới vết nứt $c = 0,7$ m; độ sâu ban đầu

$b = 2 \text{ mm}$; độ dài vết nứt $2a = 12 \text{ mm}$.

Với mức chất lỏng cao bằng 65% mức chất lỏng cho phép ta có các ứng suất tại vết nứt là $\sigma_2 = 73,6 \text{ MPa}$; $\sigma_1 = -2,7 \text{ MPa}$; $\eta = -0,037$.

Với mức chất lỏng cao bằng 95% mức chất lỏng cho phép ta có các ứng suất tại vết nứt là $\sigma_2 = 109,52 \text{ MPa}$; $\sigma_1 = -2,7 \text{ MPa}$; $\eta = -0,025$.

Xác định hiệu số ứng suất vòng lớn nhất:

$$\Delta\sigma_2 = \sigma_2^{\max} - \sigma_2^{\min} = 35,92 \text{ MPa};$$

Xác định các tham số bền nứt chu kỳ bằng phương pháp thực nghiệm [13]: các hệ số cường độ ứng suất tới hạn $K_{Gr} = 53,1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$; hệ số cường độ bền mỗi $K_f = 18,62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$; hệ số đặc trưng bền nứt chu kỳ $n = 4,08$; hệ số cường độ ứng suất lớn nhất ứng với vận tốc phát triển vết nứt $10^{-4} \text{ mm/chu kỳ}$ $K^* = 27,6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$; độ bền mỗi $\sigma_f = 191 \text{ MPa}$.

Xác định hàm số hiệu chỉnh Y_1 theo bảng 1 bằng phương pháp nội suy với $c/l = 0,7/1,5 = 0,467$ và mức chất lỏng cao nhất $h/H = 0,95$.

Phương trình hiệu chỉnh cho vết nứt giữa các ống xả:

$$Y_1 = 0,478735 + 1,962125(b/0,0087) - 1,475(b/0,0087)^2$$

Từ (2) ta có hệ số chênh lệch ứng suất tại đỉnh của vết nứt trong một chu kỳ:

$$\Delta K_I = 43,658 \cdot \sqrt{\pi b} \begin{pmatrix} 0,478735 + 1,962125(b/0,0087) \\ -1,475(b/0,0087)^2 \end{pmatrix}$$

Từ công thức (7), (8) ta có độ sâu không mở rộng $b_f = 0,003 \text{ m}$ và độ sâu tới hạn của vết nứt là $b_{Gr} = 0,00696 \text{ m}$.

Số chu kỳ tính toán N còn lại của bể với sự phát triển ổn định của vết nứt khi mức chất lỏng tối đa theo công thức (9) là 21830 chu kỳ.

Sử dụng công thức (10) xác định được thời gian vận hành an toàn còn lại với số chu kỳ chịu tải trọng lặp trong 1 năm gần nhất là 400 lần ta có $T = 54,5$ năm.

4. Kết luận

Việc đánh giá ảnh hưởng của khuyết tật lên trạng thái ứng suất của bể chứa bằng thép để đảm bảo vận hành an toàn trước khi bể chứa được bảo trì sửa chữa theo kế hoạch là rất cần thiết, làm tăng hiệu quả kinh tế sử dụng bể. Hiện nay các phương pháp tính dự đoán tuổi thọ còn lại của bể chứa có khuyết tật nứt cụ thể không tính đến các đặc điểm hình học của bể, phổ ứng suất trong thời gian bể vận hành đặc biệt là tại bản đầu tiên, nơi kết cấu thường có sự giảm yếu. Bài báo trình bày tính toán tuổi thọ còn lại bể chứa trụ đứng bằng thép có khuyết tật dạng nứt tại bản đầu tiên trên tiêu chí đánh giá ảnh hưởng của khuyết tật lên trạng thái ứng suất của bể, là cơ sở để hoàn thiện các văn bản quy phạm tiêu chuẩn kỹ thuật hiện có./.

Tài liệu tham khảo

1. Phạm Văn Hội, Nguyễn Quang Viên, Phạm Văn Tư, Đoàn Ngọc Tranh, Hoàng Văn Quang, Kết cấu thép (Công trình dân dụng và công nghiệp), Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 192-204, 1998.
2. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса сварных вертикальных резервуаров, М.: НК«РОСНЕФТЬ», 2004, р. 51.
3. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981, р. 272.
4. Нагинаев К.Е. Прогнозирование разрушения конструкционных сталей: автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербург, 2012, р. 20.
5. Нагаев Р.З. Комплексная система обеспечения безопасности эксплуатации резервуарных парков: автореф. дисс. канд. техн. наук., Уфа, 2008, р. 24.
6. СА-03-008-08. Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности. М., 2009, р. 288
7. РД-16.01-60.30.00-КТН-063-1-05. Правила технической диагностики резервуаров. М.: Транснефть, 2005, р. 275.
8. СТО-03-001-06 «Экспертиза промышленной безопасности стальных вертикальных сварных резервуаров для нефти и нефтепродуктов», 2006. — М.: Изд-во «Коринаофсет», р. 242, 2007.
9. РД-23.020.00-КТН-296-07. Руководство по оценке технического состояния резервуаров ОАО «АК «Транснефть». М.: Транснефть, р. 135, 2007.
10. РД 153-112-017-97. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров. разработана. — АО «Нефтемониторинг», р. 31, 1997.
11. Самигуллин Г.Х., Герасименко А.А. Определение коэффициента интенсивности напряжений для резервуара РВС 10000 м³ // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. № 1, р. 102-111, 2014.
12. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов, серия 3, вып. 69, М.: НТЦ ПБ, р. 240, 2012.
13. Шляников В.Н., Характеристики циклической трещиностойкости стали Ст-3 при двухосном нагружении. Труды Академэнерго, № 4, р. 91-101, 2013.
14. Романив О.Н., и др. Механика разрушения и прочность материалов. Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов: справ. пособие. Киев: Наукова думка, р. 680, 1990.