



## НАДЕЖНОСТ НА ТРЪБИ С ДЕФЕКТ В ОБЕМНИТЕ ХИДРАВЛИЧНИ СИСТЕМИ

## RELIABILITY OF PIPES WITH A DEFECT IN THE VOLUMETRIC HYDRAULIC SYSTEMS

N. Stefanov\*, K. Ormandzhiev, I. Iliev

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 26 September 2017

Accepted 24 January 2018

## Keywords:

reliability; hydraulic systems;  
elliptical defect

## ABSTRACT

*There has been composed a methodology for evaluating the reliability of oval section tubes in the presence of a flat elliptical defect in terms of fluctuations of temperature and pressure.*

*Given methods allow quantitative to value residual longevity of the pipes with developing fatigue crack.*

*The model based on the criterion of the critical crack opening.*

*The calculation results on the model are in accordance with the experimental data obtained by other authors investigating the fracture of pipes and pressure vessels with longitudinal surface cracks.*

© 2018 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Експлоатационният опит при хидравличните системи е показал, че отказите при тръбопроводите и тръбните съединения представляват значителен процент (около 10%), като тези откази се свеждат до нехерметичност на съединенията и разрушаване на тръбопроводите.

Разрушаването на тръбопроводите е най-често срещано в напорните участъци от хидравличната система, поради това, че те са подложени на динамични натоварвания. Натоварванията са обусловени от едновременното действие на механични вибрации, пулсации на налягането, породени от неравномерното подаване на дебит от помпите, хидравлични удари, възникващи в моментите на включване и изключване на запорната апаратура. Освен динамични натоварвания материалът на тръбопроводите изпитва и статични натоварвания, следствие действието на налягането, температурата и допуснатите редица монтажни неточности при изграждането на неразглобяеми съединения между тръбопроводите.

Разрушаването на тръбопроводите е свързано с образуването на пукнатини следствие умора на материала. Те могат да се появят в участъците имащи овално напречно сечение, повишена грапавост по вътрешната повърхност на тръбите и наличието на вдлъбнатини, получени от удар или натиск. Овалността при тръбите не може да бъде избегната. Тя се появява винаги в местата, където се налага те да бъдат огънати. В тези участъци кръглото напречно сечение на тръбите преминава в елипсоидно. Изпитанията са показали, че

дълговечността при тръбите е в пряка зависимост от степента на овалност. С увеличаване на овалността дълговечността рязко намалява. В [5] е посочено, че при овалност по-малка от 5%, при стоманени тръби са реализирани  $10^7$  цикъла на натоварване, без да е налице разрушаване.

Изпитванията са направени при постоянни пулсации на налягането. Така, че стойността от 5% може да се приеме за гранична.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Целта на разработката е да се синтезират и приложат съществуващите методики за оценка на надеждността на тръба, разположена в напорната магистрала на хидравлична система, по която се транспортира флуид от помпата до присъединителната панела (фиг.1). Тръбата е с размери  $\varnothing 12 \times 2$  от материал St 37.4 по EN 10305-4 (DIN 1630), с параметри: якост на опън  $340 < R_m < 480 \text{ MPa}$ , горна граница на провлачване  $R_e = 235 \text{ MPa}$  и разрушаващо налягане при динамично натоварване  $p_b = 117 \text{ MPa}$ , определено съгласно експертиза GS-Hydro. Данните са по материали на HYDRAFLEX.

Вероятността за разрушаване на участъка от тръбата, който е с овално напречно сечение, за време на експлоатация  $t$ , в резултат на настъпване на пределно състояние, може да се определи по зависимостта [9,11]:

$$Q(t) = P \{ b_0(t) < b_{in} \leq b_{cr} \} = F(b_{cr}) - F[b_0(t)] \quad (1)$$

където:

\* Corresponding author. E-mail: stefanov@tugab.bg

$b_0(t)$ -максимално допустим дефект, който няма да прорасне до критичен за време  $t$  ;  
 $b_{cr}$  -критична стойност на дефекта;  
 $F(b)$ -функции на разпределение на дълбочините на дефектите.

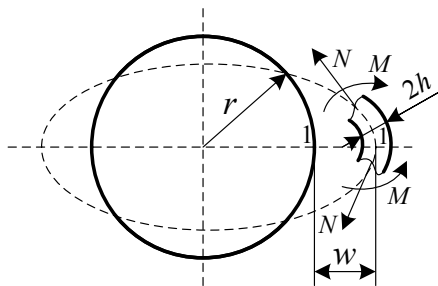


Фиг.1. Хидравлична станция с тръбни връзки-фирма „Caproni”

Като се има предвид, че флуктоацията на температурата в тръбата с овално сечение достига своя максимум в зоните с влошен топлообмен и дефектите, попадащи в тази зона (сечение 1-1, фиг. 2) нарастват до проникващи, по-бързо от другите, то следва да се определи  $P(x_{cr})$ , т.е. вероятността за попадане на дефекта в кризисната зона на топлообмена.

Тогава вероятността за безотказна работа на тръбата с овално сечение при наличие на елиптичен дефект ще приеме вида:

$$P(t) = 1 - P(x_{cr})Q(t). \quad (2)$$



Фиг.2. Натоварване, действащо на стената на тръбата с овално сечение

Ако се приеме, че най-вероятният вид на разпределение на дълбочината на началния дефект има експоненциално разпределение и вероятност за попадане на дефекта в кризисната зона  $P(x_{cr})=1$ , то вероятността за безотказна работа на тръбата ще се определя от израза:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda x_{cr} \left[ 1 - \frac{b_0(t)}{b_{cr}} \right]}, \quad (3)$$

където  $\lambda = 1/b_{in}$ , а  $b_{in}$  е средната дълбочина на началния дефект.

В зависимост (3), критичната стойност на дефекта се определя от израза:

$$b_{cr} = \frac{Q}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{R_b} \right), \quad (4)$$

където:

$Q$  -параметър отчитащ формата на пукнатината;

$K_{Ic}$  -критичен коефициент на интензивност на напрежението;

$R_b$  -разрушаващо напрежение.

Параметърът  $Q$  се определя след разрушаване на тръбата по зависимости от вида  $Q = f\left(\frac{b}{2C}\right)$ , при

$\frac{R_b}{R_{0,2}} = const.$ , където  $2C$  е дължината на дефекта. При

липса на достатъчна информация по отношение на наличието на експериментални данни, то тогава може да се използва зависимостта представена в [2], или:

$$Q = 1 + 1.464 \left( \frac{b}{C} \right)^{1.65}. \quad (5)$$

За определянето на  $K_{Ic}$  се използват разработени експериментални методи. В [13] са представени ориентировъчни данни за критичния коефициент на интензивност на напрежението за различни видове материали. За стомана е посочена стойността  $K_{Ic} = 11.06 MPa \times m^{1/2}$  при  $R_e = 220 MPa$ . В [8] за материал BSt3sp, при  $220 < R_e < 240$ , е дадена стойността  $K_{Ic} = 11.07 MPa \times m^{1/2}$ .

Определянето на  $R_b$ , или разрушаващото налягане  $p_b$ , се извършва по методика ASME B 31G, която се базира на критериите на механиката на разрушаване. Съгласно тази методика номиналното разрушаващо налягане (налягане) на тръба с дефект се намира по зависимости [1]:

$$R_b = 1.1 k_A R_{0,2} \quad (6)$$

$$p_b = R_b \frac{2h}{(r+h)},$$

където:

$r$  -радиус на окръжността с нулев момент (среден радиус на тръбата);

$2h$  -дебелина на стената на тръбата.

$k_A = f(A, M)$  -корекционен коефициент. Коефициентът се явява функция на площта на дефекта  $A$  и корекцията на Фолиас  $M$ , за преизчисляване на якостта на пластина към якостта на цилиндричен образец;

$R_{0,2}$  -условна граница на провлачване на материала.

За определянето на разрушаващото налягане при наличието на овалност на тръбата, в зависимост (6), е необходимо  $p_b$  да се корегира с коефициент отчитащ допустимото отклонение от дебелината на стената.

Този коефициент се изразява в границите на  $-12.5\%$  и има стойност 0.875.

В случая се използва методика API specification 5CT [14].

Изразът за максимално допустимия дефект  $b_0(t)$ , който няма да прорасне до критичния размер  $b_{cr}$  за време  $t$ , е изведен в [11] и има вида:

$$b_0(\tau) = \left[ \frac{b_{cr}^{(2-q)/2} - \frac{t \bar{C} f_e (\Delta \sigma f_{Ik} \sqrt{\pi})^q (2-q)}{2 A_I (1-R)^p}}{1} \right]^{2/(2-q)}, \quad (7)$$

където:

$\bar{p}$ ,  $q$  -степенни показатели, изменящи се в зависимост от свойствата на материала;

$\bar{C}$  - константа, зависи от свойства-та на материала и режима на натоварване;

$f_{1,k}$  - поправка за геометрията на об-разца;

$R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$  - коефициент на асиметрия;

$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$  - амплитуда на действащото циклично напрежение;

$f_e$  - ефективна честота следваща цик-лите на натоварване.

Връзката между броят цикли на натоварване до разрушаване на материала  $N_b$ , времето  $t$  и ефективната честота  $f_e$ , се дава с израза:

$$N_b = \frac{t \times f_e}{A_l}, \quad (8)$$

където  $A_l = (C/b_m)^{\frac{2-q}{2}}$ , а  $C$  е половината от дължината на дефекта.

Степенният показател  $q$  в зависимости (7) и (8), за стомани, се изменя от  $2 \div 7(10)$ . За по-голямата част от тях, както е известно от [3,4,7],  $q = 4$ . За леки сплави  $q = 3 \div 5$ . В посочения диапазон на  $q$  се изменя и  $\bar{C}$ . Диапазонът на изменение е от  $1.6 \times 10^{-14}$  до  $2.6 \times 10^{-14}, m^{-1} MPa^{-4}$ , като горната стойност отговаря на оценката за средна скорост на нарастване на дефекта за всички стомани. При високи скорости на нарастване на дефекта може да се приеме  $\bar{C} = 3.2 \times 10^{-14}, m^{-1} MPa^{-4}$ . Степенният по-казател  $\bar{p}$  също е в зависимост от  $q$ . В [12] се използва зависимостта  $\bar{p} = q/2$ .

Поправката за геометрията на образеца  $f_{1,k}$ , и нейното влияние върху размаха на коефициента на интензивност на напрежението е анализирана в [2,6]. Тя може да бъде получена по зависимостта:

$$f_{1,k} = \left( 1 + 1.05 \frac{C^2}{2h \times r} \right)^{0.5}. \quad (9)$$

За определянето на  $R$  и  $\Delta\sigma$  е необходимо да се определят напреженията  $\sigma_{min}$  и  $\sigma_{max}$ , като се отчетат разтягащите стената на тръбата вътрешни усилия и се вземат предвид температурните напрежения.

Изразът за напреженията, записан за участък от тръбата с единична дължина в общ вид, се дава с израза:

$$\sigma = \frac{p(r+w-h)}{2h} + \frac{6(prw)}{(2h)^2} + \frac{\alpha_l \Delta T E}{2(1-\mu)}, \quad (10)$$

където:

$E$  - модул на еластичност;

$\alpha_l$  - коефициент на линейно разширение;

$\Delta T$  - изменение на температурата по стената на тръбата;

$\mu$  - коефициент на Поасон;

$p$  - налягане;

$w$  - отклонение на средната линия на стената от окръжността в сечение 1-1 (фиг. 2).

Отклонението  $w$  е свързано с овалността на тръбата  $\alpha$  чрез отношението:

$$w = \alpha D/4, \quad (11)$$

където  $D$  е номиналният външен диаметър на тръбата.

Овалността на тръбата (отклонение от цилиндричност) се определя по зависимост  $\alpha = \frac{2(a_0 - b_0)}{a_0 + b_0}$ , където

$a_0$  и  $b_0$  са голямата и малка полуоси на овалното сечение, измерени по външната повърхнина.

За отчитане намаляването на овалността на тръбата в резултат на еластичната деформация е за предпочитане да се умножи нейната начална стойност с коефициента  $\gamma = \left( 1 + \frac{\eta p}{E} \right)^{-1}$ , където  $\eta = 0.455 \left( \frac{r}{h} \right)^3$ .

За определяне на  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  в израза (10) се използват екстремните стойности на налягането  $p_{max}$  и  $p_{min}$ .

Изменението на температурата по стената на тръбата се определя от зависимостта:

$$\Delta T = T_{w_2} + \frac{b}{2h} (T_{w_1} - T_{w_2}), \quad (12)$$

където  $T_{w_1}$  и  $T_{w_2}$  са температури на стената на тръбата, от страна на работната течност и от страна на обкръжаващата среда. Стойностите на тези температури се определят чрез подходите на топлопренасянето, като за целта е необходимо да се познават стойностите на коефициентите на топлопредаване.

Следователно за оценка на надеждността на тръбата с овално сечение са необходими изходни данни за материала ( $E, \mu, \alpha_l, R_{0,2}, K_{1c}$ ), геометричните размери на тръбата ( $r, h, w, a_0, b_0$ ) и началният дефект ( $b_{in}, 2C$ ), както и експлоатационните условия ( $p, \Delta T, R, \Delta\sigma, f_e$ ).

В разглеждания пример за изходни данни на материала на тръбата са приети:

$$E = 2.06 \times 10^{11} Pa, \quad \alpha_l = 11.1 \times 10^{-6} 1/^\circ C,$$

$\mu = 0.3, \quad \Delta T = 38^\circ C, \quad \alpha = 0.1, \quad \gamma = 0.993$  и коефициент на топлопроводност  $\lambda = 57 W/m K$ .

Параметрите на помпата в хидравличната система са:

$$- \text{дебит } q_v = 15 dm^3/min;$$

$$- \text{номинално налягане } p_n = 25 MPa;$$

$$- \text{степен на неравномерност на дебита } \delta_v = 0.24;$$

$$- \text{честота на пулсациите на дебита } f_p = 218 Hz;$$

$$- \text{амплитуда на колебание на дебита } a_v = 0.3 \times 10^{-4} m^3/s.$$

Изходна точка за аналитичното изследване на тръбата с дефект, се явява определянето на минималната и максималната стойност на налягането. За целта се определя амплитудата на колебание на налягането, като се използва зависимостта:

$$a_p = \frac{\rho a \delta_v q_v}{2F} = \frac{\delta_p}{2} p_n, \quad (13)$$

където:

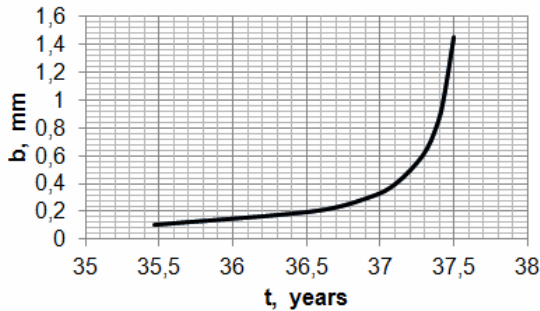
$$\delta_p = \frac{2(p_{max} - p_{min})}{p_{max} + p_{min}} - \text{степен на неравномерност на налягането};$$

$\rho$  - плътност на флуида;

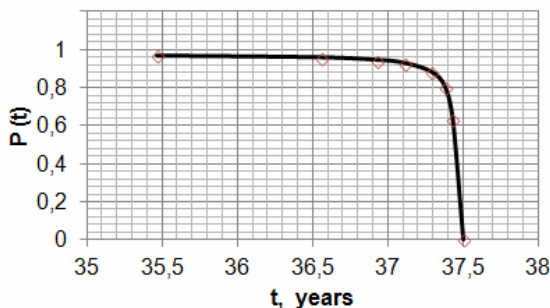
$a$  - скорост на звука в средата,  $a \approx 1200 m/s$ ;

$F$  - площ на напречното сечение на тръбата.

На фиг. 3 и фиг. 4 са представени резултатите от аналитичното изследване при  $a_p = 0.62 \text{ MPa}$ ,  $f_e = f_p$  и  $R_b/R_e = 0.8$  и параметри на началния дефект  $b_{in} = 0.4 \text{ mm}$  и  $2C = 2 \text{ mm}$ . Критичният размер на дефекта е  $b_{cr} = 1.45 \text{ mm}$ . Времето за разпространение на дефекта от начален до критичен е  $3370 \text{ h}$ , след което следва внезапно разрушаване.



Фиг.3. Зависимост  $b = f(t)$



Фиг.4. Вероятност за безотказна работа

От направеният анализ се стига до заключението, че най-съществено влияние върху крайните резултати оказват параметрите  $a_p$  ( $\Delta\sigma$  &  $R$ ) и  $f_e$ .

Така например ако в напорната магистрала на хидравличната система се включи динамичен филтър на пулсациите на налягането (акумулатор или филтър за високо налягане), тогава ще се осъществи намаляване на стойността на  $a_p$ . При  $a_p = 0.3 \text{ MPa}$ , времето за разпространение на дефекта от начален до критичен е  $6220 \text{ h}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представена е теоретична методика за оценка на надеждността на тръби с овално сечение при наличие на плосък елиптичен дефект при обемните хидравлични системи.

2. Методиката е базирана на база съществуващите методики за изследване на нефтени и газови тръбопроводи, като се доказва съвместимостта им.

3. Методиката дава възможност да се строят графични зависимости за вероятността за безотказна работа на тръбата, както от времето на експлоатация, така и от отношението на критичната дълбочина на дефекта към дебелината на тръбата за предварително зададено време на експлоатация.

4. При установяване на появили се дефекти, да се прогнозира развитието на съответния дефект и да се извърши оценка на степента на опасност от разрушаване.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Avdzhieva T. Influence on mechanic properties on the a pipelin under pressure with critical size for a defect in the wall. Magazine "Mechanics. Transport. Communications", Vol. 2, 2008.
- [2] Glushkov S.V, Yu. Skvortsov. Comparison of the results of solving the problem of fracture mechanics of a tube with a crack. Herald of PIDPU. Mechanics Vol. 3, 2014. Samara, 2014.
- [3] Zavoychinskaya E. B., I. Kiyko. Introduction to the theory of processes of destruction of solid bodies. Moscow State University. Moscow, 2004.
- [4] Koltoun Yu. I., T. Khibnik. Methods calculation of fatigue crack growth period and her it's graphic generalization. Samara State Aerospace University № 3 (19). Samara, 2009.
- [5] Komarov. Reliability of the hydraulic system. Mechanical engineering. Moscow, 1969.
- [6] Mironov A.A., B. Volkov. Pattern of sheath breaking with superficial cracks. Problems of strength and elasticity №68, 2006. Nizhny Novgorod, 2006.
- [7] Nikolaeva E.A. Fundamentals of fracture mechanics. Publishing house Perm State University. Perm, 2010.
- [8] Sabitov M.H., C. Ponikarov. Tensility of court underpressure with defect in welding seams. Kazan National Research Technological University Kazan, 2013.
- [9] Saruev A. L., L. Saruev. Strength of oas-oil warehouse and storage facilities. Publishing house Tomsk Politehnic University. Tomsk, 2013.
- [10] Reference on coefficiend of voltage intensity. Under the editions of Murakami. Vol. 2. Moscow, Peace, 1990.
- [11] Stefanov N.S., I. Angelov. Methodology evaluating the reliability of oval section tubes in the presence of a flat elliptical defect. International Scientific Conference UNITECH'09, Technical University of Gabrovo, Vol. II, Gabrovo, 2009.
- [12] Kresnil M. Fatigue of metallic materials. Amsterdam. Elsevier, 1992.
- [13] uacg.bg/filebank/att\_5724.doc
- [14] webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/aa/Freiberger\_Diss\_online/379.pdf