Механика
Транспорт
Комуникации

Научно списание http://www.mtc-aj.com

ISSN 1312-3823 (print)
ISSN 2367-6620 (online)
том 13, брой 3/2, 2015 г.
статия № 1214

ДИНАМИЧНА УСТОЙЧИВОСТ НА ПОТОПЕН ТРЪБОПРОВОД, ПРОВЕЖДАЩ ФЛУИД

Димитър Лолов
dlolov@yahoo.com

УАСГ, гр.София, бул.”Христо Смирненски”1
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *устойчивост, критична скорост, потопена тръба*

Резюме: *В статията се изследва устойчивостта на тръбопровод, потопен в движещ се с определна скорост флуид. Извършени са числени изследвания за конкретен тръбопровод и са направени изводи относно влиянието скоростта на транспортирания върху критичната скорост на външния флуид при която системата губи устойчивост.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Научните изследванията върху устойчивостта на тръбопроводи са продиктувани от започналото преди повече от 60 десетилетия строителство на тръбопроводи пренасящи нефт и газ. За този тип системи е реален рискът от повреди водещи до прекъсване на транспорта на флуида и не на последно място имащи катастрофални последици върху околната среда. Изследванията установяват, че ако праволинеен тръбопровод провежда невискозен флуид с относително ниска скорост, тогава всяко малко смущение, приложено към този тръбопровод, затихва с времето. В този случай началното равновесно положение на тръбопровода се нарича устойчиво. Ако обаче, скоростта на провеждания флуид е по-голяма от критичната, дори малки смущения могат да доведат до не затихващи трептения. Тогава равновесното положение на тръбопровода се нарича неустойчиво. Известно е, че когато е достигната критичната скорост на флуида, първата кръгова честота на тръбопровода се нулира. Този факт се използва като условие за определяне на момента на настъпване на неустойчиво равновесно положение на системата.

Тръбопроводите, освен от сухоземни, могат да имат и участъци, които са потопени под вода, например участъци положени по морското дъно. В случая на потопен тръбопровод се налага при динамичните му изследвания да се отчита и съответната присъединена маса към него на околната течност, и съвсем естествено възниква въпроса: как влияе върху устойчивостта на системата скоростта на външния флуид?

В настоящата работа се изследва устойчивостта на конкретен тръбопровод, с цел установяване при каква скорост на външния флуид системата загубва устойчивост.

ОПИСАНИЕ НА МЕТОДИКАТА

Диференциалното уравнение, описващо напречните трептения на тръбопровод с дължина l, коравина EI, провеждащ флуид с постоянна скорост V и потопен в несвиваем флуид, движещ се с постоянна скорост V_e, пренебрегвайки гравитационните сили и вискозитета на двата флуида има следния вид [1]:

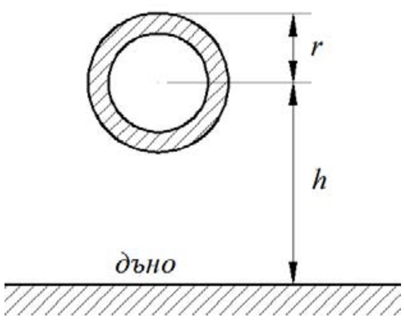
(1) $$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+\left(m_f V^2+m_e V_e^2\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2\left(m_f V+m_e V_e\right)\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t}+\left(m_f+m_p+m_e\right)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0,$$

където m_f, m_p и m_e са съответно масата на транспортирания флуид, масата на тръбопровода и присъединената маса на външния флуид за единица дължина на тръбопровода.

За определянето на m_e за случая на тръбопровод разположен в близост хоризонтална равнина (фигура 1) се използва методиката описана в [2]:

(2) $$m_e=\pi \rho_e r^2\left(1+\frac{r^2}{2h^2}\right),$$

където ρ_e е плътността на външния флуид.



Фиг.1 Схема за определяне на присъединената маса за потопен тръбопровод

Определянето на критичната скорост на провеждания флуид се извършва чрез спектралния метод на Гальоркин. При него приближение до точното решение на граничната задача (1), се търси в следната форма:

(3) $$w(x,t)=\sum_{i=1}^{n} y_i(x)\, z_i(t),$$

където:

$z_i(t)$ - са неизвестни функции;

$y_i(x)$ - базисни функции, които удовлетворяват граничните условия на тръбата.

В настоящата работа за базови функции са използвани функциите, описващи собствените форми на трептение на системата, получени от решението на подобен проблем, а именно на потопена тръба със стационарен флуид. За получаването на функциите на формата в настоящата работа е използван програмния продукт SAP2000.

На базата на диференциалното уравнение описващо напречните трептения на тръба, съдържаща стационарен флуид, в [3] е изведена следната зависимост:

(4) $$y_i^{IV}(x)=\gamma_i^4\, y_i(x),$$

където

(5) $$\gamma_i=\sqrt[4]{\frac{\left(m_f+m_p+m_e\right)\omega_i^2}{EI}}.$$

Във формула (5) с ω_i са означени съответните кръгови честоти на тръбата съдържаща стационарен флуид.

Замества се израз (3) в (1) и се получава функцията на грешката $R(x,t)$, понеже (3) не е точно решение на диференциалното уравнение (1):

$$(6) \qquad R(x,t) = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left(m_f + m_p + m_e\right) y_i \ddot{z}_i + 2\left(m_f V + m_e V_e\right) y_i^I \dot{z}_i + \left[EI\gamma^4 y_i + \left(m_f V^2 + m_e V_e^2\right) y_i^{II} \right] z_i \right\}$$

Целта на метода на Гальоркин е да се нулира функцията на грешката $R(x,t)$ в областта $x \in [0;l]$. За да се реализира това, е необходимо:

$$(7) \qquad \int_0^l R(x,t) y_k(x)\, dx = 0 \text{, за } k = 1,\ldots,n$$

Условие (7) представлява изискване функцията на грешката $R(x,t)$ да бъде ортогонална на всички базисни функции $y_k(x)$. Резултатът от приложението на (7) е система от n на брой диференциални уравнения спрямо неизвестните функции $z_i(t)$. Тази система, записана за уравнение (1) има следния вид:

$$(8) \qquad \sum_{i=1}^{n} \int_0^l \left\{ \left(m_f + m_p + m_e\right) y_i \ddot{z}_i + 2\left(m_f V + m_e V_e\right) y_i^I \dot{z}_i + \left[EI\gamma^4 y_i + \left(m_f V^2 + m_e V_e^2\right) y_i^{II} \right] z_i \right\} y_k\, dx = 0$$

за $k = 1,\ldots,n$

За решението на системата (8) се прилага описания в [3] метод, съгласно който тръбата се разделя на участъци по оста си с дължина Δx. Отчитат се следните зависимости:

$$(9) \qquad \int_0^l y_i y_k\, dx = \{y_i\}^T \{y_k\} \Delta x$$

$$(10) \qquad \int_0^l y_i^I y_k\, dx = \{y_i^I\}^T \{y_k\} \Delta x$$

$$(11) \qquad \int_0^l y_i^{II} y_k\, dx = \frac{1}{EI} \{M_i\}^T \{y_k\} \Delta x.$$

В уравнения (9), (10) и (11):

$\{y_i\}$ - е вектор, съдържащ напречните премествания на точките от оста на тръбата, съответстващи на i-тата собствена форма в случая на стационарен флуид;

$\{y_i^I\}$ - е вектор, съдържащ завъртанията на напречните сечения на тръбата, съответстващи на i-тата собствена форма в случая на стационарен флуид;

$\{M_i\}$ - е вектор на огъващите моменти в точките от оста на тръбата, съответстващи на i-тата собствена форма в случая на стационарен флуид.

След полагането на формули (9), (10) и (11) в (8) се получава следната система от n на брой диференциални уравнения спрямо неизвестните функции $z_i(t)$:

$$(12) \qquad \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left(m_f + m_p + m_e\right) \{y_i\}^T \{y_k\} \ddot{z}_i + 2\left(m_f V + m_e V_e\right) \{y_i^I\}^T \{y_k\} \dot{z}_i + \right.$$
$$\left. + \left[EI\gamma^4 \{y_i\}^T \{y_k\} + \left(m_f V^2 + m_e V_e^2\right) \frac{1}{EI} \{M_i\}^T \{y_k\} \right] z_i \right\} \Delta x = 0.$$

Системата (12), записана в матрична форма има вида:

$$(13) \qquad M\, \ddot{z} + C\, \dot{z} + K\, z = 0$$

За получаване на характеристичното уравнение на системата (13) може да се постъпи по следния начин:

(14) $\det X = 0$

Където членовете на детерминантата се получават по следната формула:

(15) $X_{ik} = \lambda^2 M_{ik} + \lambda C_{ik} + K_{ik}$

На базата на определените корени λ на характеристичното уравнение (15), може да се определи дали системата е в устойчиво равновесие или не. Системата е стабилна ако реалната част на корените на характеристичното и уравнение е отрицателна. Тъй като корените на характеристичното уравнение зависят от характеристиките на системата, то на тази база може да се определи скоростта на транспортирания флуид V или скоростта на външния флуид V_e при която системата губи устойчивост. Решението на уравнение (15) всъщност представлява доста сложна задача за определяне на собствените числа на системата, дори с помощта на съвременната изчислителна техника и наличните програмни продукти. Поради тази причина се препоръчва следният подход за получаване на собствените стойности. За целта системата (13) се трансформира в система диференциални уравнения от първи ред, като се въвеждат нови функции q:

(16) $\{q\}^T = \{q_1 = z_1;...;q_n = z_n; q_{n+1} = \dot{z}_1;...;q_{2n} = \dot{z}_n\}$

Трансформираната система диференциални уравнения има вида:

(17) $\begin{vmatrix} C & M \\ M & 0 \end{vmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{vmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{vmatrix} \{q\} = 0$

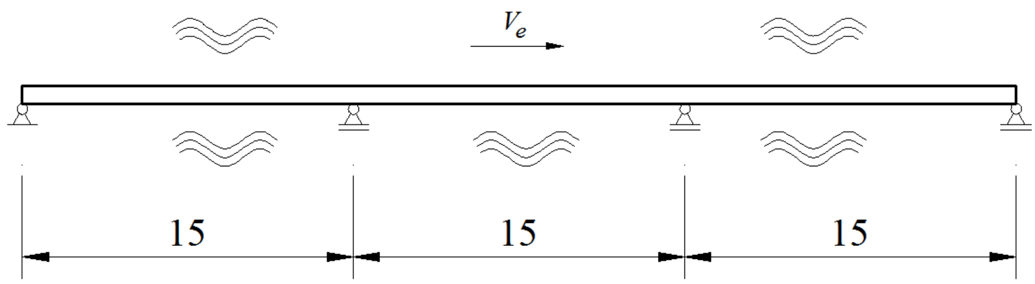
Корените на характеристичното уравнение (15) представляват решение на следния проблем за собствени числа и собствени вектори:

(18) $\left(\lambda \begin{vmatrix} C & M \\ M & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{vmatrix} \right) u = 0$

На базата на получените корени на характеристичното уравнение се правят изводи относно устойчивостта на системата.

ЧИСЛЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Статическата схема на тръбопровода, предмет на настоящото изследване е представена на фигура 2.



Фиг.2 Статическа схема на изследвания тръбопровод

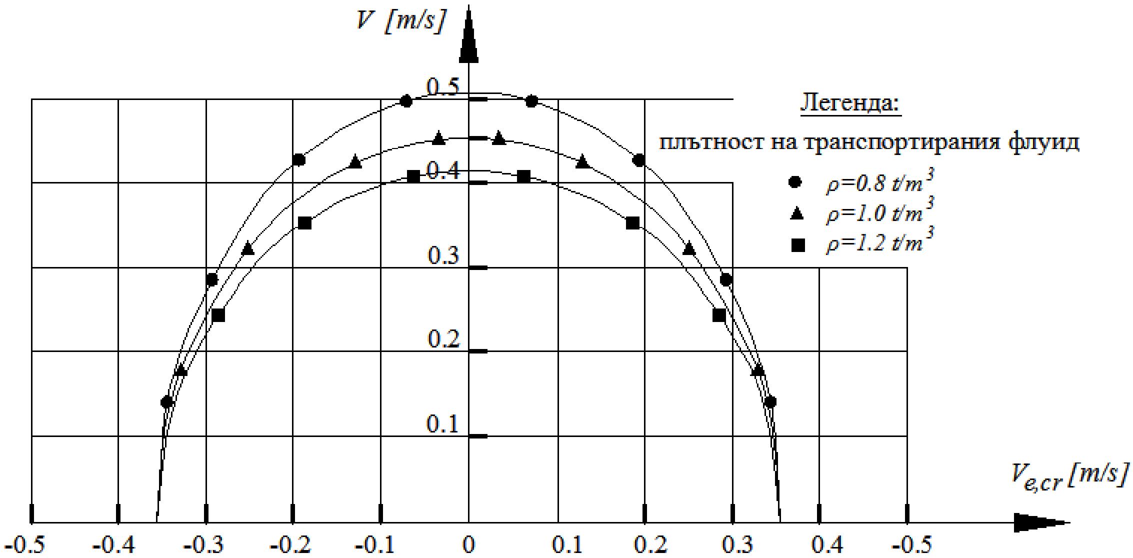
Приети са следните характеристики на изследваната система:

$EI = 771.26\, kN\,m^2;\ m_p = 10.80 kg/m,\ m_e = 18.02 kg/m$

Изчисленията са извършени за три вида транспортирани течности с плътности : $\rho_f = 0.8\,t/m^3;\ 1\,t/m^3;\ 1.2\,t/m^3$, а плътността на външния флуид е: $\rho_e = 1\,t/m^3$.

Стойността на скоростта на външния флуид се варира от нула до критичната си стойност, която съответства на появата на корен на характеристичното уравнение (14) с нулева реална част.

На фигура 3 е представена получената зависимост за критичната скорост на външния флуид $V_{e,cr}$ от скоростта на транспортирания флуид V. Отрицателните стойности на $V_{e,cr}$ на графиката съответстват на посока на движение на външния флуид, обратна на тази на транспортирания флуид:



Фиг.3 Зависимост между критичната скорост на външния флуид $V_{e,cr}$ и скоростта на транспортирания флуид.

ИЗВОДИ

От фигура 3 е видно, че за конкретната система, предмет на настоящите изследвания, могат да се направят следните изводи:

1. В случая на стационарен вътрешен флуид $(V = 0)$, независимо от плътността му, критичната скорост на външния флуид не се променя.

2. На конкретна стойност на критичната скорост на външния флуид, съответствува скорост на транспортирания флуид, която е най-висока за флуида с най-ниска плътност и най-ниска за флуида с най-висока плътност.

3. За конкретна скорост на транспортирания флуид, критичните скорости на външния флуид за двете му възможни посоки на движение се различават незначително.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Hellum A., Mukherjee R., Hull A. Flutter instability of a fluid-conveying fluid-immersed pipe affixed to a rigid body, Journal of Fluids and Structures, 27 (2011), pp. 1086-1096

[2] Brennan C. A Review of added mass and fluid inertial forces, Technical Report, Naval Civil Engineering Laboratory, 1982

[3] Wu J., Shih P. The dynamic analysis of a multispan fluid-conveying pipe subjected to external load, "Journal of Sound and Vibration", vol.239, 2001, pp. 201-215

DYNAMIC STABILITY OF A FLUID-IMMERSED PIPE CONVEYING FLUID

Dimitar Lolov
dlolov@yahoo.com

University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy
1056 Sofia, 1 "Hristo Smirnenski" blvd.
BULGARIA

Key words: *stability, critical velocity, immersed pipe*

Abstract: *In this paper is investigated the stability of a pipeline, immersed in fluid that is moving with a particular velocity. Numerical investigations for a particular pipeline are carried out. Conclusions are drawn on the influence of the velocity of transported fluid on the critical fluid velocity of the external flow at which the immersed pipe loses stability.*