

Оригинальная статья

УДК 502/504:626.86:621.6432

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-73-77

## ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТРУБОПРОВОДА С КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ДЕМПФЕРАМИ

**ЛОЛОВ ДИМИТР**<sup>✉1</sup>, д-р, доцент

lolov\_fhe@uacg.bg

**ЛИЛКОВА-МАРКОВА СВЕТЛАНА**<sup>1</sup>, д-р, профессор

lilkova\_fhe@uacg.bg

**БАЛАБАНОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор

vbalabanov@rgau-msha.ru

<sup>1</sup> Университет архитектуры, строительства и геодезии; 1046, г. София, ул. Христо Смирненски, 1. Болгария

<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская, 49. Россия

*В статье указывается, что трубы с протекающей по ним жидкостью являются одними из часто встречающихся элементов в различных областях промышленности. Трубопроводы в нефтегазовой и ряде других отраслей промышленности имеют клапаны и соединения, которые могут быть смоделированы в виде концентрированных масс. Весьма важно учитывать их воздействие в исследовании динамического поведения трубопроводов. Развивающиеся колебания – предмет исследования многих ученых. В статье представлены исследования трубы со статической схемой свободно лежащей на опорах балки с прикрепленными сосредоточенными демпферами. Исследована устойчивость системы, состоящей из трубы с концентрированными демпферами и протекающей по ней жидкостью. Для определения критической скорости жидкости применяется спектральный метод Галеркина. На основании теоретических исследований установлено, что трубопроводная система с демпферами теряет устойчивость при 1,26 раза меньшей скорости течения жидкости ( $V_{cp} = 122, 67$  м/с), чем в случае без демпферов ( $V_{cp} = 155$  м/с).*

**Ключевые слова:** труба, трубопровод, динамическая устойчивость, критическая скорость, концентрированный демпфер, протекающая жидкость

**Формат цитирования:** Лолов Д., Лилкова-Маркова С., Балабанов В.И. Динамическая устойчивость трубопровода с концентрированными демпферами // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 73-77. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-73-77.

© Лолов Д., Лилкова-Маркова С., Балабанов В.И., 2021

Scientific article

## DYNAMIC STABILITY OF PIPELINE WITH CONCENTRATED DAMPERS

**LOLOV DIMITAR**<sup>✉1</sup>, doctor, associate professor

lolov\_fhe@uacg.bg

**LILKOVA-MARKOVA SVETLANA**<sup>1</sup>, doctor, professor

lilkova\_fhe@uacg.bg

**BALABANOV VIKTOR IVANOVICH**<sup>2</sup>, doctor of technical sciences, professor

vbalabanov@rgau-msha.ru

<sup>1</sup> University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1046, Sofia, Hristosmirnenski Str. 1. Bulgaria

<sup>2</sup> Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Timiryazevskaya Str, 49; Moscow, Russia

*The article indicates that pipes with a liquid flowing through them are one of the most common elements in various fields of industry. Pipelines in oil and gas and a number of other industries have valves and connections that can be modeled as concentrated masses. It is very important to consider their impact when investigating the dynamic behavior of pipelines. Developing fluctuations are the subject of research by many scientists. The article investigates a pipe with a static scheme*

of a beam freely lying on the supports with concentrated dampers. The stability of the system consisting of a pipe with concentrated dampers and a liquid flowing through it is investigated. The spectral Galerkin method is used to determine the critical fluid velocity. On the basis of theoretical studies, it has been established that a pipeline system with dampers loses its stability at 1.26 times lower fluid flow rate ( $V_{av} = 122.67$ , m/s) than in the case without dampers ( $V_{av} = 155$  m/s).

**Keywords:** pipe, pipeline, dynamic stability, critical velocity, concentrated damper, flowing liquid

**Format of citation:** Lolov D., Lilkova-Markova S., Balabanov V.I. Dynamic stability of pipeline with concentrated damper // Prirodooobustrojstvo. – 2021. – № 2. – S. 73-77. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-73-77.

**Введение.** Трубы с протекающей по ним жидкостью являются одними из часто встречающихся элементов в различных областях промышленности. Развивающиеся колебания – предмет исследования многих ученых. Трубопроводы в нефтегазовой и ряде других отраслей промышленности имеют клапаны и соединения, которые могут быть смоделированы в виде концентрированных масс. Весьма важным является учет их воздействия в исследовании динамического поведения трубопроводов [1-10].

Исследования таких труб, представленные в работе [5], впервые выполнены Хилом и Свенсоном. Для решения дифференциального уравнения функции поперечного перемещения применяется метод Галёркина. Было обнаружено, что когда труба является консольной, концентрированные массы снижают критическую скорость жидкости – скорость жидкости, при которой труба теряет устойчивость.

Чен и Йендрейчик [5] проводят эксперименты и исследования для труб с текущей жидкостью в двух случаях опор: Q – устройство и опора, позволяющая перемещение вдоль оси; консольные трубы. На свободном конце двух труб прикреплен концентрированная масса. В экспериментах использовали трубы из двух материалов: полиэтилен и акрил. Исследована потеря устойчивости, определены круговые частоты свободных колебаний, функции формы и критическая скорость жидкости.

Ву и Ражи в работе [10] представляют метод исследования колебаний трубы с концентрированной массой. Скорость жидкости меньше, чем критическая. Для труб с различными опорами получены функции формы. Исследовано влияние концентрированной массы в середине трубы типа простой балки на круговую частоту свободных колебаний.

**Материал и методы исследования.** Исследован трубопровод с длиной  $l$ ,

имеющий жесткость на изгибе  $EI$ . Поток жидкости имеет постоянную скорость  $V$ . Вязкость жидкости и гравитационные силы при этом не учитываются. На трубопроводе расположены концентрированные демпферы. Исследуется устойчивость полученной системы.

Расчётная модель системы «Труба-жидкость» представлена на рисунке.

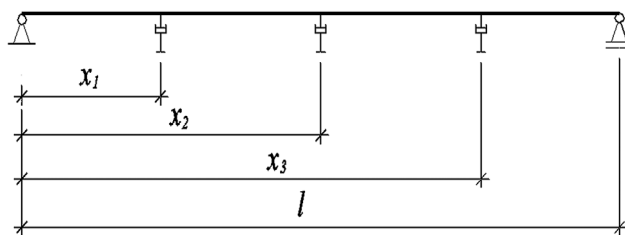


Рис. Труба с концентрированными демпферами

Fig. Pipe with concentrated dampers

Дифференциальное уравнение, описывающее поперечные колебания трубопровода (в горизонтальной плоскости), имеет следующий вид [3]:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (m_f + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2m_f V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + m_f V^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sum_{j=1}^m d_j \delta(x - x_j) \frac{\partial w}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $w(x, t)$  – функция поперечных перемещений;  $m_f$  и  $m_p$  – соответственно масса транспортируемой жидкости и масса трубы на единицу длины трубопровода;  $d_j, j = 1, \dots, m$  – коэффициент демпфирования  $j$ -того демпфера на оси трубы;  $x_j$  – расстояние  $j$ -того концентрированного демпфера от левого конца трубы (рис.);  $\delta$  – функция Дирака, для которой в соответствии с работой [4] существуют зависимости

$$\begin{aligned} \delta(x - x_j) &= 0 \text{ при } x \neq x_j \\ \delta(x - x_j) &= \infty \text{ при } x = x_j \\ \int_a^b f(x) \delta(x - x_j) dx &= f(x_j) \text{ за } 0 < x_j < b \end{aligned} \quad (2)$$

В большинстве работ по трубам с протекающей жидкостью вводят следующие безразмерные параметры:

$$\eta = \frac{w}{l}; \quad \zeta = \frac{x}{l}; \quad \zeta_j = \frac{x_j}{l};$$

$$\beta = \frac{m_f}{(m_f + m_p)}; \quad \tau = \sqrt{\frac{EI}{m_f + m_p}} \frac{t}{l^2};$$

$$v = Vl \sqrt{\frac{m_f}{EI}}; \quad \bar{d}_j = \frac{d_j l}{\sqrt{EI(m_f + m_p)}}. \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^4 \eta}{\partial \zeta^4} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} + 2\sqrt{\beta}v \frac{\partial^2 \eta}{\partial \zeta \partial \tau} + v^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial \zeta^2} + \sum_{j=1}^m \bar{d}_j \delta(\zeta - \zeta_j) \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = 0. \quad (4)$$

Определение критической скорости жидкости осуществляется спектральным методом Галёркина. Нужно искать следующее приближение к точному решению краевой задачи (4):

$$\eta(\zeta, \tau) = \sum_{i=1}^n W_i(\zeta) a_i(\tau). \quad (5)$$

В выражении (5)  $W_i(\zeta)$  функции формы трубы – без концентрированных демпферов и без жидкости в ней. Эти функции отвечают граничным условиям трубы.  $a_i(\tau)$  являются неизвестными функциями параметра  $\tau$ .

Выражение (5) не является точным решением дифференциального уравнения (4). Поэтому после подстановки в выражение (4) получается функция ошибок  $R(\zeta, \tau)$ :

$$R(\zeta, \tau) = W_i \ddot{a}_i + \left( 2\sqrt{\beta}v W_i^I + \sum_{j=1}^m \bar{d}_j \delta(\zeta - \zeta_j) W_i \right) \dot{a}_i + (W_i^{IV} + v^2 W_i^{II}) a_i. \quad (6)$$

В метод Галёркина должна быть сброшена функция ошибок  $R(\zeta, \tau)$  в области  $\zeta \in [0; 1]$ . Чтобы осуществить это, должно быть удовлетворено, что

$$\int_0^1 R(\zeta, \tau) W_k(\zeta) d\zeta = 0 \quad \text{за } k = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Условие (7) является требованием функция ошибок  $R(\zeta, \tau)$  быть ортогональной всем основным функциям  $W_k(\zeta)$ . Выражение (6) подставляется в выражение (7), и получается следующая

система дифференциальных уравнений с неизвестными функции  $a_i(\tau)$ :

$$\sum_{i=1}^n \int_0^1 \left[ W_i \ddot{a}_i + \left( 2\sqrt{\beta}v W_i^I + \sum_{j=1}^m \bar{d}_j \delta(\zeta - \zeta_j) W_i \right) \dot{a}_i + (W_i^{IV} + v^2 W_i^{II}) a_i \right] \times W_k(\zeta) d\zeta = 0 \quad (8)$$

за  $k = 1, \dots, n$ , что можно записать в виде матриц:

$$[M] \ddot{a}_i + [C] \dot{a}_i + [K] a_i = 0. \quad (9)$$

Если принимать во внимание ортогональность функций  $W_i$  и  $W_k$  для шарнирно опертой трубы на двух концах, каждый член матриц в выражении (9) получается с использованием следующих формул [3]:

$$M_{ik} = 0,5 \delta_{ik}; \quad (10)$$

$$C_{ik} = 2v\sqrt{\beta} \frac{\lambda_i \lambda_k [1 - (-1)^{i+k}]}{\lambda_k^2 - \lambda_i^2} + \sum_{j=1}^m \bar{d}_j W_i(\zeta_j) W_k(\zeta_j); \quad (11)$$

$$K_{ik} = 0,5 (\lambda_i^4 - v^2 \lambda_i^2) \delta_{ik}. \quad (12)$$

Здесь

$$\lambda_i = i\pi; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad (13)$$

$$W_i(\zeta) = \sin(\lambda_i \zeta); \quad (14)$$

$\delta_{ik}$  – символ Кронекера;

$$k = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Систему уравнений (9) можно записать в следующем виде:

$$[A] \{\dot{q}\} + [B] \{q\} = 0, \quad (15)$$

где  $\{q\} = \{\dot{a}_i(\tau) \quad a_i(\tau)\}^T$ ; (16)

$$A = \begin{bmatrix} [O] & [M] \\ [M] & [C] \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$B = \begin{bmatrix} -[M] & [O] \\ [O] & [K] \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Выражение (15) умножается слева с  $[A]^{-1}$ . Получается, что

$$[I] \{\dot{q}\} + [A]^{-1} [B] \{q\} = 0, \quad (19)$$

где  $[I]$  – единичная матрица.

Для функции  $a_i$  положено:

$$a_i = A_i e^{i\Omega\tau}, \quad (20)$$

где  $i$  – мнимая единица;  $A_i$  – константы;  $\Omega$  – безразмерный параметр круговой частоты трубы  $\omega$ :

$$\Omega = \sqrt{\frac{(m_f + m_p)}{EI}} l^2 \omega. \quad (21)$$

Тогда из выражений (16) и (20) получаем выражение для  $\{q\}$ :

$$\{q\} = \{\dot{a}_i(\tau) \quad a_i(\tau)\}^T = e^{i\Omega\tau} \{u\}. \quad (22)$$

В элементах вектора  $\{u\}$  участвуют постоянные величины  $A_i$ .

Выражение (22) подставляется в выражение (19), и получается следующее уравнение:

$$i\Omega[I]\{u\} + [A]^{-1}[B]\{u\} = 0. \quad (23)$$

Система (23) является задачей собственных чисел и собственных векторов. Потом для конкретной скорости жидкости могут быть определены значения  $\Omega$ . Если одно или несколько из этих значений имеют отрицательные мнимые части, то при соответствующей скорости система неустойчива. Это условие

### Библиографический список

1. Вельмисов П.А., Корнеев А.В., Киреев С.В. Исследование динамической устойчивости трубопровода // Журнал Средневолжского математического общества. – 2016. – Т. 18. № 2. – С. 106-114.
2. Вельмисов П.А., Покладова Ю.В. Исследование динамики трубопровода с учетом запаздывания внешних воздействий // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2004. – № 4 (28). – С. 26-29.
3. Балабанов В.И., Лилкова-Маркова С.В., Киндова-Петрова Д.Д. Анализ динамической устойчивости трубопроводов сельских коммуникаций // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2008. – № 3 (28). – С. 111-112.
4. Балабанов В.И., Лилова-Маркова С.В., Миташев Д.П. Обеспечение прочности машиностроительных конструкций / Доклады ТСХА. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2017. – С. 201-202.
5. Chen S.S., Jendrejczyk J.A. General Characteristics, Transition and Control

позволяет определить критическую скорость протекающей жидкостью. Если  $\text{Im}\Omega < 0$  и  $\text{Re}\Omega \neq 0$ , то потеря устойчивости является флаттером. Когда  $\text{Im}\Omega < 0$  и  $\text{Re}\Omega = 0$ , то потеря устойчивости – в дивергентной форме.

**Численные исследования.** Предметом исследования в данной работе является трубопровод со статической схемой простая балка (рис.). Поперечное сечение – с внешним радиусом 0,1 м и внутренним радиусом 0,095 м. Модуль упругости трубы –  $E = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ , масса трубы на единицу длины –  $m_p = 0.02404 \text{ t/m}$ , а длина трубы –  $l = 6 \text{ m}$ , демпферы находятся на расстояниях  $x_1 = 1,5 \text{ m}$ ;  $x_2 = 3 \text{ m}$ ;  $x_3 = 4,5 \text{ m}$ ,  $d = 500 \text{ kNs/m}^2$ . Проведены исследования жидкости с плотностью  $\rho_f = 1 \text{ t/m}^3$ . Полученные результаты представлены как  $V_{cr} = 122.67 \text{ m/s}$ . Когда нет демпферов,  $V_{cr} = 155 \text{ m/s}$ .

### Выводы

На основании теоретических исследований установлено, что трубопроводная система с демпферами теряет устойчивость при 1,26 раза меньшей скорости течения жидкости ( $V_{cr} = 122,67 \text{ м/с}$ ), чем в случае без демпферов ( $V_{cr} = 155 \text{ м/с}$ ).

### References

1. Velmiso P.A., Korneev A.V., Kireev S.V. Issledovanie dinamicheskoy ustojchivosti truboprovoda // Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva. – 2016. – T. 18, № 2. – S. 106-114.
2. Velmiso P.A., Pokladova Yu.V. Isledovanie dinamiki truboprovoda s uchetom zapazdyvaniya vneshnih vozdejstvij // Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tehnikaskogo universiteta. – 2004. – № 4 (28). – S. 26-29.
3. Balabanov V.I., Lilkova-Markova S.B., Kindova-Petrova D.D. Analiz dinamicheskoy ustojchivosti truboprovodov selskih komunikatsij // Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina». – 2008. – № 3 (28). – S. 111-112.
4. Balabanov V.I., Lilkova-Markova S.B., Mitashov D.P. Obespechenie prochnosti mashinostroitel'nykh konstruktsij / V sb.: Doklady TSHA. Mat-ly Mezhdun. nauch. konf. – M.: RGAU-MSHA, 2017. – S. 201-202.
5. Chen S.S., Jendrejczyk J.A. General Characteristics, Transition and Control

of Instability of Tubes Conveying Fluids, Journal of Acoustical Society of America, 77, 887, 1985.

6. **Hill J.L., Swanson C.P.** Effects of Lumped Masses on the Stability of Fluid Conveying Tubes, Transactions ASME, Journal of Applied Mechanics, 37, 494, 1970.

7. **Kang, M.G.** Effect of rotary inertia of concentrated masses on the natural vibration of fluid conveying pipes, Journal of the Korean Nuclear Society. – 1999. – Vol. 31. – Number 2. – Pp. 202-213.

8. **Chakraborty S.** Some Applications of Dirac's Delta Function in Statistics for more Than One Random Variable, Applications and Applied Mathematics. – 2008. – Vol. 3. – Issue 1. – Pp. 42-54.

9. **Païdoussis M.P.** Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow, Volume 1, Second edition 2014, London: Elsevier

10. **Wu T.T., Raju P.P.** Vibration of a Fluid Conveying Pipe Carrying a Discrete Mass, Transactions ASME, Journal of Pressure Vessel Technology. – 1974. – November, 154.

#### Критерии авторства

Лолов Д., Лилкова-Маркова С., Балабанов В.И. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Лолов Д., Лилкова-Маркова С., Балабанов В.И. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Статья поступила в редакцию 24.02.2021 г.

Одобрена после рецензирования 22.03.2021 г.

Принята к публикации 05.04.2021 г.

of Instability of Tubes Conveying Fluids, Journal of Acoustical Society of America, 77, 887, 1985.

6. **Hill J.L., Swanson C.P.** Effects of Lumped Masses on the Stability of Fluid Conveying Tubes, Transactions ASME, Journal of Applied Mechanics, 37, 494, 1970.

7. **Kang M.G.** Effect of rotary inertia of concentrated masses on the natural vibration of fluid conveying pipes, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 31, Number 2, pp. 202-213, 1999.

8. **Chakraborty S.** Some Applications of Dirac's Delta Function in Statistics for more Than One Random Variable, Applications and Applied Mathematics, Vol. 3, Issue 1, pp. 42-54, 2008.

9. **Païdoussis M.P.** Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow, Volume 1, Second edition 2014, London: Elsevier.

10. **Wu T.T., Raju P.P.** Vibration of a Fluid Conveying Pipe Carrying a Discrete Mass, Transactions ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, November, 154, 1974.

#### Criteria of authorship

Lolov D., Lilkova-Markova S., Balabanov V.I. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Lolov D., Lilkova-Markova S., Balabanov V.I. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 24.02.2021

Approved after reviewing 22.03.2021

Accepted for publication 05.04.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.8

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-77-84

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЛЕТАРСКОГО МАГИСТРАЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

**КОСИЧЕНКО ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор

Kosichenko-11@mail.ru

**БАЕВ ОЛЕГ АНДРЕЕВИЧ** ✉, канд. техн. наук, начальник Гидротехнического отдела

oleg-baev1@yandex.ru

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации «РосНИИПИМ»; 346400, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190. Россия

Приведены расчеты основных параметров Пролетарского магистрального канала для полигонального сечения при его реконструкции для различных вариантов. Разработана методика гидравлического расчета, которая основывается на определении