

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

Секачева А.А.¹, Пастухова Л.Г.¹, Носков А.С.¹

¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, tonechka_marakulina@mail.ru

Ключевые слова: трубопроводы, гидромеханические системы, собственные частоты колебаний, вибрация.

Исследование вибропараметров трубопроводов актуально при решении задач о повышении эффективности и надежности гидромеханических систем. В классическом подходе к определению динамических характеристик трубопроводов (например, в работах [1, 2]) применяется метод изоляции механической и гидравлической подсистем, в том числе и для расчета пульсаций давления жидкости по длине участка трубопровода, принимая граничные условия (в виде импедансов соединенных участков) только для гидравлической части. При этом, как правило, воздействие трубопровода на течение среды рассматривается опосредованно (например, через изменение скорости распространения волн жидкости в трубе в сравнении со скоростью в открытом пространстве [3]).

При расчете вибрации трубопровода как механической подсистемы используются аналогии со стержнями. Наиболее важными для практических целей считаются перемещения трубопровода в перпендикулярном направлении, которые описываются с использованием уравнений волн изгиба, где ρ – плотность среды; S – площадь сечения; I – момент инерции сечения; $y(x, t)$ – поперечное смещение стержня; E – модуль упругости [4]:

$$\rho I \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial t^2 \partial x^2} = EI \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \rho S \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Для расчета собственных частот гидравлической подсистемы трубопровода существует следующее аналитическое выражение, где n – номер собственной частоты; l_{mp} – суммарная длина трубопровода; c_{np} – скорость звука в рабочей жидкости с учётом податливости стенок трубопровода [5]:

$$f_n = \frac{c_{np} \cdot (2n-1)}{4 \cdot l_{tp}}. \quad (2)$$

Таким образом, имеющиеся методики описывают изолированный подход к исследованию динамического поведения трубопровода при воздействии пульсаций рабочей среды. Поэтому можно считать, что при построении существующих моделей имеются допущения, которые не учитывают взаимное влияние динамических процессов подсистем трубопровода.

Для получения регрессионной модели, описывающей зависимость первой частоты собственных колебаний прямолинейного участка трубопровода от его геометрических характеристик был произведен численный эксперимент с использованием программного комплекса ANSYS. По результатам многофакторного параметрического анализа была получена следующая регрессионная модель зависимости первой частоты собственных колебаний от трех факторов (длины l , наружного диаметра d и толщины стенки участка трубопровода δ) при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.893$ [6]:

$$F_1 = 27.569 \cdot l^{-1.658} \cdot d^{1.093} \cdot \delta^{-1.25}. \quad (3)$$

Для оценки адекватности разработанной модели (3) и ее эффективности по сравнению с известной (2) было выполнено сравнение рассчитанных (с использованием этих моделей) значений частот собственных колебаний (Гц) с эталонными (полученными в ходе физического эксперимента). Результаты проведенного сравнения сведены в табл. 1 и представлены на рис. 1.

Таблица 1 – Сравнение значений частот собственных колебаний (Гц) прямолинейного участка трубопровода, полученным по методикам (2) и (3) и экспериментально

Номер гармоники	Частота собственных колебаний, Гц		
	Эксперимент	Разработанная регрессионная модель $F_n = 27.569 \cdot l^{-1.658} \cdot d^{1.093} \cdot \delta^{-1.25} \cdot (2n - 1)$	Известная аналитическая модель $f_n = \frac{c_{пр} \cdot (2n - 1)}{4 \cdot l_{тр}}$
1	32	36	57
2	120	107	-
3	175	178	172
4	245	249	286
5	320	321	-
6	395	392	400

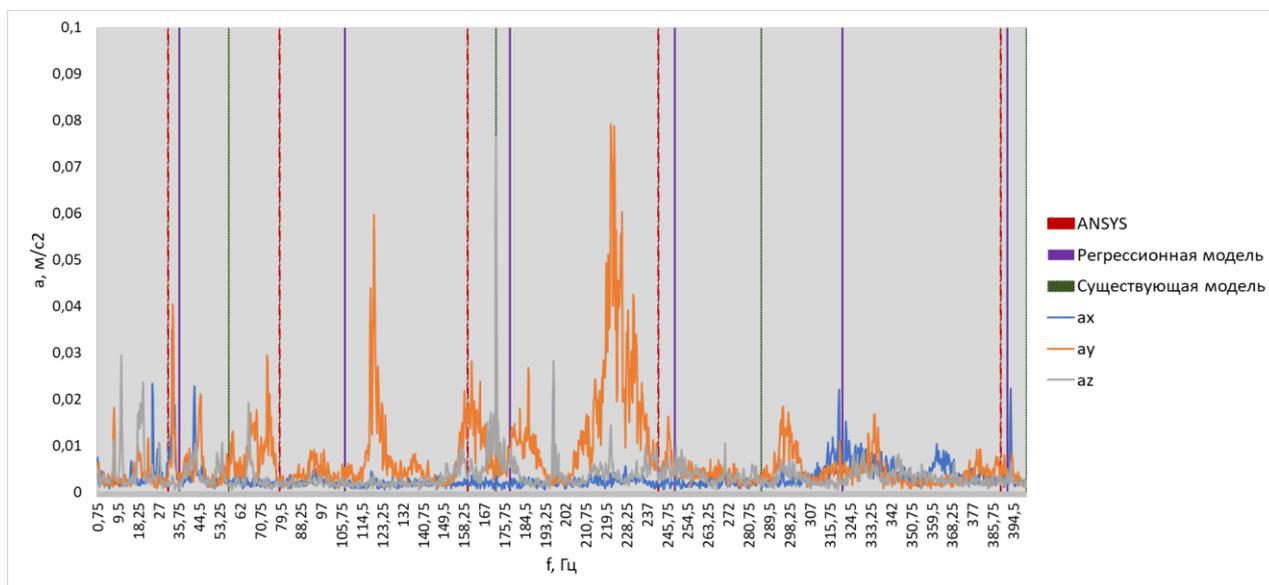


Рисунок 1 – Сопоставление акселерограмм виброускорений трубопроводной системы в середине прямолинейного участка при расходе $Q_1=103,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и спектра собственных частот, вычисленных в ANSYS, по разработанной и существующей методикам

По результатам проведенного сравнения можно сделать вывод о том, что разработанная модель определяет дополнительные собственные частоты колебаний прямолинейного участка, неопределенные при использовании существующей модели. Экспериментальные данные также подтверждают наличие этих дополнительных частот. Также определено, что значения собственных частот, полученные с использованием разработанной модели, лучше согласуются с экспериментальными данными. Установлено, что разработанная модель работает с большей точностью (примерно в 5 раз) в сравнении с известной.

Список литературы

1. Макарьянц Г.М. Моделирование виброакустических характеристик трубопровода с использованием метода конечных элементов / Г.М. Макарьянц, А.Б. Прокофьев, Е.В. Шахматов // Изв. СЦ РАН. 2002. Т.4. №2(8). С. 327-323.
2. Прокофьев А.Б. Виброакустическая модель прямолинейного участка трубопроводной системы с гасителем колебаний в условиях силового возбуждения пульсациями рабочей жидкости/ А.Б. Прокофьев, Е.В. Шахматов // Научно-технический сборник Ракетно-космическая техника. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. Серия XII. Вып. 1. 2000. С. 120-131.

3. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Избранные сочинения. / Н.Е. Жуковский. Т. II. 1948. 422 с.

4. Бреховских А.М. Введение в механику сплошных сред / А.М. Бреховских, В.В. Гончаров. Москва: Наука, 1982. 336 с.

5. Гулиенко А.И. Уравнения движения жидкости в вибрирующих трубопроводах гидросистем. Математические модели рабочих процессов в гидропневмосистемах / А.И. Гулиенко // Сб. науч. тр. Киев: Наук. Думка. 1981. 111-122 с.

6. Секачева А.А. Моделирование динамических характеристик вертикального элемента трубопровода / А.А. Секачева, Л.Г. Пастухова, А.С. Носков // Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "ЗАЩИТА ОТ ПОВЫШЕННОГО ШУМА И ВИБРАЦИИ". СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. 2019. № 1. С. 333-340.

Сведения об авторах

Секачева А.А., канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры Гидравлика. Область научных интересов: газо- и гидродинамика технических и природных систем, гидротехника, виброакустика.

Пастухова Л.Г., канд. техн. наук, доцент кафедры Гидравлика. Область научных интересов: газо- и гидродинамика технических и природных систем, гидротехника, виброакустика.

Носков А.С., доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры Гидравлика. Область научных интересов: динамика вязкой жидкости, теория колебаний и устойчивость движения, газо- и гидродинамика технических и природных систем, гидротехника, виброакустика, гидромеханика многофазных сред, турбулентность и гидродинамическая устойчивость.

DETERMINATION OF NATURAL PARAMETERS OF A STRAIGHT PIPELINE SECTION

Sekacheva A.A.¹, Pastukhova L.G.¹, Noskov A.S.¹

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, tonechka_marakulina@mail.ru

Keywords: pipelines, hydromechanical systems, natural vibration frequencies, vibration

Theses are devoted to the question of approaches to determining the dynamic parameters of pipelines. A regression model for calculating the first frequency of natural oscillations of a straight section of the pipeline is obtained and the adequacy of it was assessed. It is established that the developed model works with greater accuracy in comparison with the known one.