

Д. А. Васильев, Ю. К. Шлык

Диагностика герметичности магистрального газопровода

Для диагностики герметичности стенки линейной части магистрального трубопровода предложен метод электродинамических аналогий. Проведено сравнение характеристик акустических и электрических моделей трубопровода. По передаточным функциям можно будет определить параметры газодинамического режима движения среды, условный диаметр и линейную координату образовавшейся негерметичности.

Диагностика герметичности стенки линейной части магистрального трубопровода является важной практической задачей. Ее решение позволит на ранней стадии определить появление свища и соответственно предотвратить развития аварийной ситуации со всеми вытекающими из этого последствиями.

Существуют различные методы решения поставленной задачи [1]. Каждый из них имеет свои достоинства, однако акустический метод определения негерметичности стенки трубы, по нашему мнению, обладает рядом преимуществ перед остальными. Его отличает относительная простота в технической реализации, высокое быстродействие и возможность использования современных электронных средств приема и обработки поступающей информации.

С позиций современной акустики газопровод представляет собой классический пример волноводной системы, а значит, процессы, происходящие в ней, могут быть описаны известными дифференциальными уравнениями. В линеаризованном виде они имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \ln p}{\partial x} &= \frac{1}{RT} \frac{\partial w}{\partial t} + 2a \frac{1}{RT} w, \\ -\frac{\partial w}{\partial x} &= \frac{RT}{c^2} \frac{\partial \ln p}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $p = p(x, t)$ — среднее давление в сечении x трубы; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; $w = w(x, t)$ — средняя скорость в сечении x трубы; t — время; $2a$ — диссипативный фактор потерь энергии на трение; c — скорость звука в газе.

Решение системы (1) позволит установить все особенности движения газа в трубопроводе, в том числе при возникшей негерметичности его стенки. Последнее обстоятельство позволяет представить линейную часть магистрального газопровода в виде эквивалентной акустической модели [3], которая изображена на рис. 1. Здесь Z_{a1} , Z_{a2} , Z_{a3} — комплексные акустические импедансы входа, дополнительной акустической массы и выхода рассматриваемого участка трубопровода соответственно. Параметр $Z_{a2} = j\omega m_a$ является акустическим импедансом массы отверстия m_a , которая определяется его условным диаметром, толщиной стенки трубопровода и плотностью среды (газа), заполняющей это отверстие. Параметр ω — угловая частота звуковой волны в трубопроводе, а $j = \sqrt{-1}$.

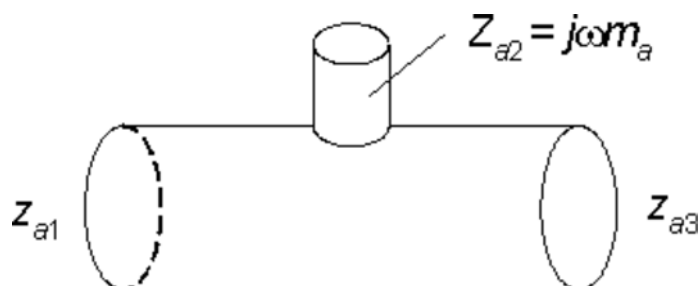


Рис. 1. Акустическая модель трубопровода с локальной негерметичностью стенки

Используя известный метод электродинамических аналогий [2–4], акустической модели (см. рис. 1) можно поставить в соответствие эквивалентную электрическую схему линии с распределенными параметрами, представленную на рис. 2. Здесь Z_1 и Z_3 — комплексные импедансы входного и выходного сопротивлений длинной электрической линии соответственно; $Z_2 = j\omega L$ — импеданс корректирующего элемента (сосредоточенной индуктивности L); $\dot{U}_{вх}$ и $\dot{U}_{вых}$ — комплексы напряжений на входе и выходе

длинной электрической линии.

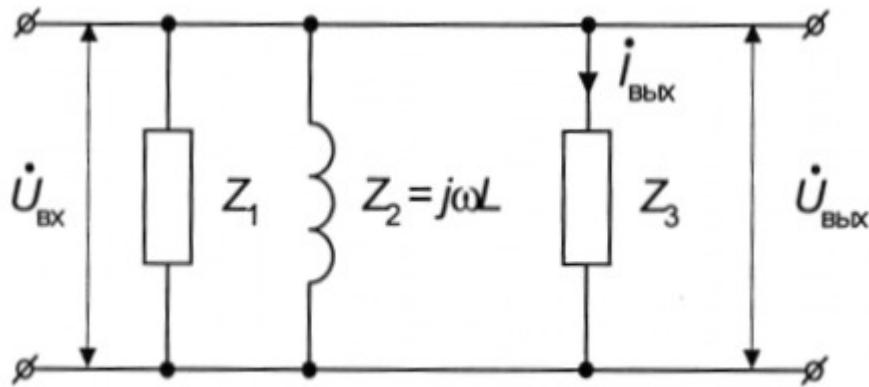


Рис. 2. Электрический аналог трубопровода с негерметичностью

Рис. 2. Электрический аналог трубопровода с негерметичностью

Соответствие акустической модели трубопровода (см. рис. 1) и ее электрического аналога (см. рис. 2) становится понятным при условии, что последний описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно комплексов токов i и напряжений U [5, 6]:

$$\begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= IR_0 + j\omega L_0, \\ -\frac{di}{dx} &= Uj\omega C_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Физическая эквивалентность параметров $Z_1 \rightarrow Z_{a1}$, $Z_2 \rightarrow Z_{a2}$, $Z_3 \rightarrow Z_{a3}$ позволяет считать, что результаты исследований электрической цепи по рис. 2, в части определения ее передаточной функции, могут быть перенесены на физический объект, каковым является магистральный трубопровод.

Частотно-зависимую передаточную функцию в электрических цепях принято называть коэффициентом передачи по напряжению $K_U(\omega)$ либо по току $K_I(\omega)$.

Применительно к рассматриваемой задаче определим функции $K_U(\omega)$ и $K_I(\omega)$ для электрической цепи по рис. 2. Их выражения примут вид:

$$K_U(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (3)$$

Отношение силы тока в нагрузке к напряжению на входе является коэффициентом передачи тока:

$$K_I(\omega) = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (4)$$

Между коэффициентами передачи по току и напряжению существует связь:

$$K_I = \frac{1}{Z_3} K_U. \quad (5)$$

Параллельный корректирующий элемент Z_2 шунтирует импеданс нагрузки. Выходной ток, протекающий через Z_3 , до подключения Z_2 определяется выражением

$$i_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{Z_1 + Z_3}. \quad (6)$$

После подключения корректирующего Z_2 выходной ток определится зависимостью:

$$i_{\text{ВЫХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}} Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}. \quad (7)$$

В итоге коэффициент передачи по току с учетом корректирующего элемента будет иметь вид:

$$K_I(\omega) = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}, \quad (8)$$

а коэффициент передачи по напряжению — представлен выражением

$$K_U(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_3}}. \quad (9)$$

Полученные функции (8) и (9) — предмет самостоятельного исследования. Являясь аналогом передаточных функций реального газопровода по давлению и скорости, они будут отражать не только параметры газодинамического режима движения среды, но и позволят определить условный диаметр и линейную координату образовавшейся негерметичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионин Д. А., Яковлев Е. И. Современные методы диагностики магистральных газопроводов. Л.: Недра, 1987. 232 с.
2. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
3. Лепендин Л. Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1978. 448 с.
4. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960. 336 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1984. 559 с.
6. Шлык Ю. К., Васильев Д. А., Пожитков А. П. Электродинамическое моделирование волнового процесса в длинном трубопроводе // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2004. Вып. 3. С. 118–121. (статья в данном сборнике).

D. A. Vasylyev, Yu. K. Shlyk

DIAGNOSTICS OF MAIN PIPELINES FOR LEAK-PROOFNESS

With a view of diagnostics of pipeline walls for leak-proofness, the article suggests a method of electrodynamic analogies. The authors undertake a comparative analysis regarding characteristics of acoustic and electric pipeline analogs. Basing on transfer functions, one could determine features of gas dynamic mode regarding motion of medium, as well as nominal diameter and linear position of a developed leak.