

Ю. К. Шлык, Д. А. Васильев, А. П. Пожитков

Электродинамическое моделирование волнового процесса в магистральном трубопроводе

Рассмотрен вопрос изучения волнового процесса движения среды в магистральном трубопроводе. Для исследований распространения звука в трубе применен метод электродинамических аналогий. С помощью предложенных в статье формул можно решить целый комплекс задач по проблеме рационального использования волновых процессов в магистральных трубопроводах.

Движение среды (газ, жидкость) в магистральном трубопроводе неизменно сопровождается развитием в нем волнового процесса, параметры которого (амплитудно-частотный состав) обладают высокой степенью информативности.

Проблема волноводного распространения звука в трубе с жесткими стенками является классической задачей акустики [1, 2]. Ее комплексное решение позволит выявить ряд закономерностей, связанных с особенностями и спецификой гидродинамического режима движения среды в трубопроводе, установить основные факторы, определяющие этот режим. Итогом исследований может стать создание системы контроля за техническим состоянием и технологическим режимом работы магистрального трубопровода, способной оперативно реагировать на возможные отклонения его основных параметров (давление, расход, температура и т. д.) от номинальных, включая и аварийные ситуации. Это решение следует искать в рациональном использовании информации, содержащейся в параметрах волнового процесса, сопровождающего движение среды в трубопроводе.

Из всего многообразия задач по данной проблеме выделим две группы, на наш взгляд, наиболее важные с практической точки зрения: «технологические» и «технические» задачи.

К «технологическим» отнесем исследования, целью которых следует считать не столько контроль за поддержанием требуемого гидродинамического режима в трубопроводе, сколько научно обоснованное предложение по реализации такого режима движения среды, при котором связанные с ним энергозатраты были бы минимальными. Применительно к таким крупномасштабным трубопроводным системам, какими являются современные магистральные газо- и нефтепроводы Западно-Сибирского региона, данные исследования приобретают особую актуальность, поскольку реализуют общегосударственную концепцию внедрения энергосберегающих технологий.

Не менее значимыми являются исследования «технического» направления, целью которых должно стать оперативное обнаружение негерметичности стенки самого трубопровода. Локальная неоднородность в теле трубопровода — достаточно частое явление. Она может быть вызвана коррозией металла, некачественной сваркой швов, микротрещинами и рядом других факторов. Однако вне зависимости от причин появления «свища» картина волнового процесса в трубе будет меняться, а значит, факт появления утечки может быть установлен вполне определенно. Использование соответствующей контрольно-измерительной аппаратуры даст возможность оперативно зафиксировать возникшую негерметичность, что, в свою очередь, позволит принять меры для предотвращения аварийной ситуации и избежать серьезных экологических последствий.

Резюмируя сказанное, отметим, что решение поставленных задач следует искать в рациональном использовании информации, содержащейся в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) волноводной системы магистрального трубопровода как многофакторной модели.

Учитывая специфику конструкции современных газо- и нефтепроводов (малый диаметр труб по сравнению с их протяженностью) и дозвуковой скорости движения среды в трубопроводе, можно сделать однозначный вывод: наиболее обоснованным методом исследования волновых процессов, которые в нем протекают, является метод электродинамических аналогий [1–5].

Фундаментальность данного подхода состоит в том, что одни и те же дифференциальные уравнения движения среды в трубе и электрического тока в линии электропередач различаются лишь значениями постоянных коэффициентов, входящих в их состав.

При описании волновых процессов в длинных трубах (волноводах) система нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики [2] в ряде случаев может быть упрощена и сведена к системе линеаризованных уравнений для капельной жидкости в виде [5]:

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

где $p = p(x, t)$ — среднее давление в сечении x трубы; ρ — плотность среды, заполняющей трубу; $w = w(x, t)$ — средняя скорость в сечении x трубы; t — время; $2a$ — диссипативный фактор потерь энергии на трение; C — скорость звука в среде, заполняющей трубу; K — приведенный модуль упругости стенки трубы.

Указанная линейризация может считаться обоснованной, если соблюдается ряд условий, сопровождающих развитие волнового процесса в рассматриваемой трубе.

Прежде всего, необходимо, чтобы длина волны колебаний была значительно больше внутреннего диаметра волновода, т. е. в нем будут распространяться лишь плоские акустические волны. Теплопроводностью стенок следует пренебречь. Скорость колебаний среды (жидкости) принимают равномерно распределенной по сечению, а амплитуду этой скорости считают малой по сравнению с длиной волны колебаний. Последнее условие отражает тот факт, что плотность жидкости в волноводе мало меняется при прохождении через нее акустической волны давления и может быть принята неизменной ($\rho = \text{const}$). Кроме того, жидкость следует закону Гука и в ней отсутствует гистерезис.

Входящий в систему (1) параметр $2a$ принимается константой при условии осреднения w в сечении волновода в соответствии с общепринятой гипотезой квазистационарности [3] и может быть определен в виде:

$$2a = \left(\frac{\lambda w}{8\delta} \right)_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления потерь на трение; δ — гидравлический радиус сечения волновода.

В случае, когда волновод ограничен абсолютно жесткими стенками, коэффициент K в (1) принимает значение:

$$K = \frac{K_*}{1 + e \frac{K_*}{E}} = K_*, \quad (3)$$

где K_* — модуль объемного сжатия жидкости; e — безразмерный коэффициент, зависящий от формы сечения трубы и толщины ее стенок [6]; E — модуль Юнга.

Площадь поперечного сечения S реальных волноводов, как правило, неизменна. Из этого следует, что входящие в состав системы (1) коэффициенты:

ρ , $2a\rho$, $1/\rho c^2$ — по существу первичные параметры волновода, приведенные к единице его длины.

В случае, когда в качестве среды, заполняющей трубопровод, выступает газ, система уравнений (1) принимает вид [5]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \ln p}{\partial x} &= \frac{1}{RT} \frac{\partial w}{\partial t} + 2a \frac{1}{RT} w, \\ -\frac{\partial w}{\partial x} &= \frac{RT}{c^2} \frac{\partial \ln p}{\partial t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Как и в предыдущем случае капельной жидкости, для газа принимается свой ряд ограничений. Так, в магистральных газопроводах режим движения принимается изотермическим, поэтому $T = \text{const}$. Дозвуковой режим движения газа в магистральном трубопроводе позволяет не учитывать как динамическое давление, так и гидростатическое давление газа по причине его малости. Неизменным остается и коэффициент гидравлического сопротивления λ при турбулентном режиме движения газа в трубопроводе.

По своей структуре системы уравнений (1) и (4) эквивалентны системе «телеграфных» уравнений, описывающих закон распределения токов и напряжений в длинной электрической линии [7]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 i, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 u, \end{aligned} \quad (5)$$

где $u = u(x, t)$ и $i = i(x, t)$ — мгновенные напряжение и ток; L_0 — индуктивность; R_0 — продольное сопротивление; C_0 — емкость и G_0 — поперечная проводимость единицы длины линии.

Системы уравнений (1), (4) и (5) будут эквивалентны при условии, что поперечной проводимостью G_0 в (5) следует пренебречь.

Отмеченная выше электродинамическая аналогия процессов в рассматриваемых системах позволяет применить методы теории электрических цепей к расчету акустических характеристик магистрального

трубопровода. В первую очередь это касается комплексной постоянной распространения $g = \alpha + j\beta$, где α — коэффициент затухания; β — коэффициент фазы колебательного процесса; $j = \sqrt{-1}$. Определение данных параметров чрезвычайно важно в контексте решения задачи по использованию среды, заполняющей трубопровод, как средства получения информации о процессах, происходящих в самом трубопроводе. Более того, частотно-зависимые функции α и β полностью определяют структуру базовой математической модели линейной части магистрального трубопровода.

В условиях установившегося режима работы электрической линии система дифференциальных уравнений в частных производных (5) может быть упрощена и сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Это предполагает, что на входе линии работает генератор заданной частоты ω .

Такой переход возможен [7], если от мгновенных функций токов i и напряжений u перейти к их комплексным изображениям:

$$i = i(x, t) \rightarrow \dot{I}(x)e^{j\omega t}, \quad u = u(x, t) \rightarrow \dot{U}(x)e^{j\omega t}. \quad (6)$$

При этом модифицированная система (5) примет более простой вид:

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{U}}{dx} &= \dot{I}R_0 + j\omega L_0 \dot{I}, \\ -\frac{d\dot{I}}{dx} &= \dot{U}j\omega C_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Представленная система уравнений является базовой теоретической моделью, применение которой позволит решить целый комплекс задач по проблеме рационального использования волновых процессов в магистральных трубопроводах.

Литература

1. Рэлей. Теория звука. В 2 т. М.: Гостехиздат, 1955. Т. 1. 504 с.; Т. 2. 476 с.
2. Исакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
3. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960. 336 с.
4. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высш. шк., 1976. 448 с.
5. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
6. Духшерстов Г. И. Гидравлический удар в трубах некруглого сечения и потоке жидкости между упругими стенками // Учен. зап. МГУ. Механика. 1948. Вып. 122, т. 11. С. 15–76.
7. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. и др. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 752 с.

Yu. K. Shlyk, D. A. Vasylyev, A. P. Pozhitkov

ELECTRODYNAMIC SIMULATION OF WAVE PROCESSES IN MAIN PIPELINES

The article considers a question of studying wave processes regarding motion of medium in main pipelines. In order to investigate propagation of sound through a pipe, the authors used a method of electrodynamic analogies. Application of the formulas suggested in the article allows to solve various problems associated with rational use of wave processes in main pipelines.