

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА НА КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДОМЕРА

А.О. Крылов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: monach_63@mail.ru

Рассматривается влияние турбулентности потока на коэффициент передачи электроакустического преобразователя расходомера, определяющего расход нефти в магистральных трубопроводах.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, турбулентность потока, коэффициент передачи, расходомер.

В настоящее время широко используются ультразвуковые расходомеры для измерения расхода нефти при транспортировке по магистральным трубопроводам. Создаются различные конструкции ультразвуковых расходомеров, и во всех есть свои конструктивные параметры, которые необходимо учитывать при измерении расхода, так как это может повлиять на погрешность измерения, что приведет к понижению класса точности расходомера и увеличению количества неучитываемой нефти при транспортировке.

На рис. 1, а представлено расположение излучателя сигнала И и двух принимающих приемников П₁, П₂, ось ОУ – центр магистрального трубопровода, l_1 и l_2 – расстояние между излучателем И и приемниками П₁, П₂.

Рассмотрим фазовый сдвиг принимаемого сигнала в двух равноотстоящих точках П₁, П₂ от излучателя И. Расстояние между точками П₁ и П₂ равно $2a$ (см. рис. 1, а). Определим разность фаз волн, приходящих в точки приема П₁ и П₂. Фаза волны, приходящей из И в П₁, будет равна

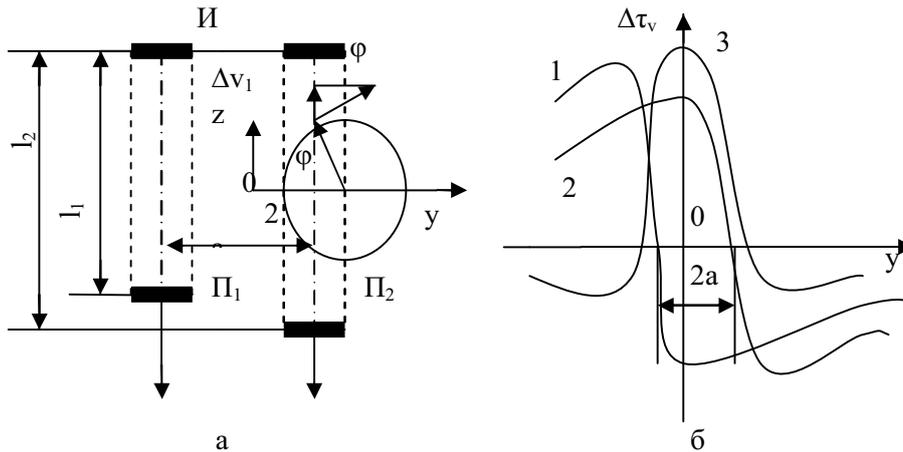


Рис. 1. Определение параметров вихрей в потоке ультразвуковым методом

Александр Олегович Крылов, преподаватель каф. информационно-измерительной техники.

$$\varphi_1 = \omega t_1 = \omega \int_{-l_1/2}^{+l_1/2} \frac{dz}{c_i - v_1},$$

где c_i и v_1 – средние скорости распространения звука и движения среды по длине траектории соответственно;

ω – набор критических частот в волноводе с жесткими стенками; при понижении частоты ниже критического значения распространение данной нормальной волны прекращается и волна превращается в неоднородную, быстро затухающую по экспоненциальному закону [1].

Раскладывая выражение $(c_i - v_1)^{-1}$ в ряд Тейлора по степени v_1 по оси oz и пренебрегая членами начиная с третьего, интеграл запишем следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} (\tilde{n}_i - v_1)^{-1} &= \frac{1}{c_i} (1 - \frac{v_1}{c_i})^{-1} = \frac{1}{c_i} (1 + (-1) \frac{v_1}{c_i} + \frac{(-1)(-2)}{2!} (\frac{v_1}{c_i})^2 + \dots) = \frac{1}{c_i} (1 - \frac{v_1}{c_i}) = \frac{1}{c_i} - \frac{v_1}{c_i^2}; \\ \omega \int (\frac{1}{\tilde{n}_i} - \frac{v_1}{c_i^2}) dz &= \omega \frac{z \Big|_{-l_1/2}^{+l_1/2}}{c_i} - \frac{\omega}{c_i^2} \int_{-l_1/2}^{+l_1/2} v_1 dz = \omega \frac{l_1 - (-l_1)}{2c_i} - \frac{\omega}{c_i^2} \int_{-l_1/2}^{+l_1/2} v_1 dz = \omega \frac{l_1}{c_i} - \frac{\omega}{c_i^2} \int_{-l_1/2}^{+l_1/2} v_1 dz; \\ \varphi_1 &= \omega \frac{l}{c_1} + \frac{\omega}{c_1^2} \int_{-l_1/2}^{+l_1/2} v_1 dz. \end{aligned} \quad (1)$$

Предполагается, что разница между l_1 и l_2 незначительна и ею можно пренебречь. Точно такое же выражение можно получить для второго луча:

$$\varphi_2 = \omega t^2 = \omega \frac{l}{c_1} + \frac{\omega}{c_1^2} \int_{-l_1/2}^{+l_1/2} v_2 dz.$$

Тогда разность фаз при $l_1 = l_2 = l$ равна

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\omega}{\tilde{n}_l^2} \int_0^l (v_1 - v_2) dz = \frac{\omega}{c_l^2} \int_0^l \Delta v dz.$$

Далее примем $c_1 = c = \text{const}$ и найдем среднее квадратическое значение разности фаз, z и z' – первая и вторая производные:

$$\overline{\varphi^2} = \frac{\omega^2}{\tilde{n}_l^4} \int_0^l dz' \int_0^l dz'' \overline{\Delta v(z') \Delta v(z'')}. \quad (2)$$

Входящее под знак интеграла среднее равно [3]

$$\begin{aligned} \overline{\Delta v(z') \Delta v(z'')} &= \overline{[v_1(z') - v_2(z')] [v_1(z'') - v_2(z'')]} = \\ &= \overline{v_1(z') v_1(z'')} + \overline{v_2(z') v_2(z'')} - \overline{v_1(z') v_2(z'')} - \overline{v_2(z') v_1(z'')} \end{aligned} \quad (3)$$

Осуществляя преобразования (3) в соответствии с [4], из формулы (2) можно получить выражение для дисперсии фазового сдвига

$$D_{\varphi} = \text{const} \frac{\Omega}{c^2} l^{1/2} (2a)^{5/6}.$$

Рассмотрим влияние вихрей турбулентного потока на выходную информацию ультразвуковых расходомеров. Расчетная схема для вычисления времени прохождения ультразвуковых волновых пакетов, пересекающих вихрь вдоль лучей И-П₁ и И-П₂, приведена на рис. 1, а. При перемещении вдоль направления y время или фазовый сдвиг вдоль луча И-П₂ изменяется согласно выражению (1), тогда скорость движения сред примет вид

$$v_l = v \cdot \text{const} \varphi = v[(y-a)/r].$$

Выразим радиус вихря в виде

$$r = [(y-a)^2 + z^2]^{1/2}.$$

Тогда для времени прохождения ультразвукового сигнала по второму каналу получим

$$\tau_2 = \frac{1}{\tilde{n}} \int_{-l_2/2}^{+l_2/2} \left(1 - \frac{v}{c} \cdot \frac{y-a}{[(y-a)^2 + z^2]^{1/2}}\right)^{-1} dz. \quad (4)$$

В реальных вихрях наиболее часто закон распределения скоростей может быть принят в следующем виде [5]:

$$v = \frac{1}{4} \left(\frac{r_0}{r}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{1,26r^2}{r_0^2}\right)\right] v_{\max}. \quad (5)$$

В этом вихре окружная скорость v изменяется по линейному закону в зависимости от радиуса r в интервале от 0 до r_0 . При $r > r_0$ v асимптотически изменяется по закону $1/r$. Значения v_{\max} , Γ и r_0 связаны между собой соотношением

$$v_{\max} = \frac{0,716\tilde{\Lambda}}{2\pi r_0},$$

где Γ – максимальная циркуляция, асимптотически достигаемая при больших r и определяемая выражением

$$\tilde{\Lambda} = \int_L v dr,$$

где L – замкнутый контур интегрирования.

Подставив уравнение (5) в уравнение (4), получим выражение для времени прохождения сигнала в луче 2

$$\tau_2 = \frac{1}{\tilde{n}} \int_{-l_2/2}^{+l_2/2} \left(1 - \frac{1,4r_0 v_{\max} (y-a)}{c[(y-a)^2 + z^2]} \left[1 - \exp\left(-\frac{1,26[(y-a)^2 + z^2]}{r_0^2}\right)\right]\right)^{-1} dz, \quad (6)$$

которое можно решить численным методом.

Вызванная потоком разность времени прохождения ультразвуковых импульсов $\Delta\tau_2 = \tau_2 - l_2/c$, которая должна быть измерена для определения параметров вихря, изменяется по оси y , как показано на рис. 1, б (кривая 2). Время прохождения ультразвукового сигнала по каналу 1 определяется аналогичным образом. Вызванная потоком разность времен прохождения ультразвукового сигнала в данном случае равна $\Delta\tau_1 = \tau_1 - l_1/c$ (кривая 1). Зависимость разности $\Delta\tau_2 - \Delta\tau_1$ от смещения y вихря поперек звуковых лучей представлена кривой 3.

При близком расположении двух лучей оба канала подвергаются примерно одинаковым изменениям температуры и разность $\Delta\tau_v = \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2$ почти не зависит от температуры. Кроме того, квазисимметричная форма кривой 3 позволяет определять положение центра вихря и обеспечивает большую точность измерения. В общем случае, когда акустические каналы одинаковы по длине ($l_1 = l_2 = l$), а расстояние $2a$ между ними взято достаточно большим, при $y=0$ время прохождения ультразвуковых импульсов не зависит от радиуса r_0 вихревого ядра. При этих условиях циркуляция Γ может быть решена по высоте кривой 3 в соответствии с выражением

$$\tilde{A} = c^2 \Delta\tau_v \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{1}{2a}.$$

Если $l \gg 2a$, то это выражение принимает вид $\tilde{A} = c^2 \Delta\tau_v$.

Экспериментальное исследование влияния турбулентности потока на флуктуацию фазового сдвига принимаемого сигнала ультразвукового расходомера было осуществлено с помощью специальной конструкции, представленной на рис. 2. Исследования проводились с электроакустическими преобразователями 1 и 2 двух типов: 1) с дискретными пьезоэлементами, формирующими три дискретных акустических канала, распределенных равномерно поперек трубопровода; 2) с прямоугольными пьезоэлементами, формирующими акустический канал, охватывающий все поперечное сечение трубопровода. Изменение профиля скоростей осуществлялось в двух взаимно перпендикулярных плоскостях поворотом пластин 3 и 4 на углы α и β соответственно, 5 – электронный блок. Результаты исследования влияния изменения профиля скоростей турбулентного потока на погрешность ультразвукового расходомера при повороте пластины 4 на угол β показаны на рис. 3 [6].

Сравнивая полученные данные ($\beta = +15^\circ$) для преобразователя с дискретными элементами (кривая 1 на рис. 3) и с прямоугольными элементами (кривая 2), можно сделать вывод о том, что изменение профиля скоростей турбулентного потока в плоскостях, параллельных xOy , во втором случае не оказывает существенного влияния на дисперсию фазы принимаемого сигнала при излучении как по потоку, так и против потока. В то же время изменение профиля скоростей поворотом пластины 3 на тот же угол $\alpha = 15^\circ$, но в другой плоскости, оказывает заметное влияние на фазу принимаемого ультразвукового сигнала и, соответственно, на коэффициент передачи преобразователя как с дискретными, так и прямоугольными элементами [3].

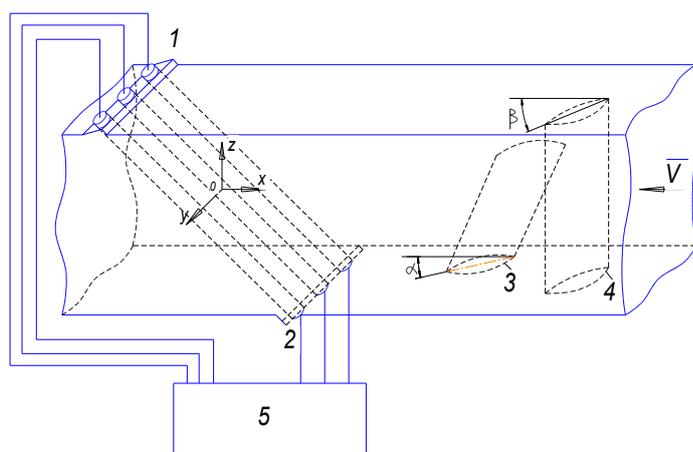


Рис. 2. Устройство для исследования влияния изменения профиля скоростей потока на коэффициент передачи преобразователя расхода

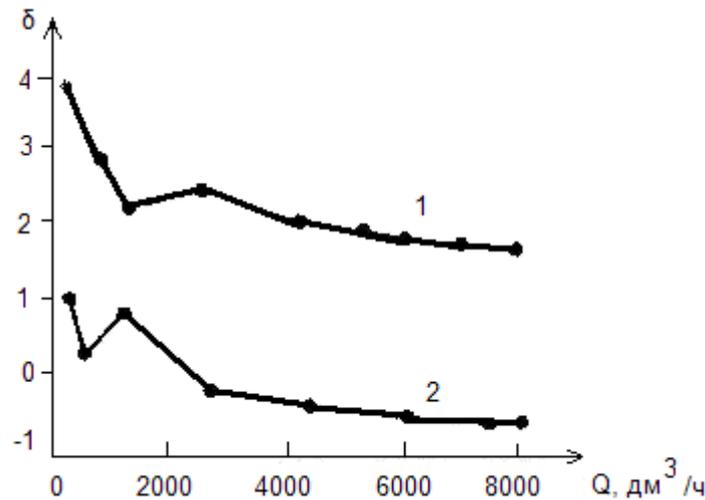


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения от расхода Q ультразвукового расходомера с многоканальным ЭАП (1) и с ЭАП с прямоугольными элементами (2)

Как видно из рис. 2, пластина 3 находится в непосредственной близости от акустических каналов, что приводит к влиянию возникающих вихрей в контролируемой среде на скорость распространения звука по потоку и против потока в соответствии с ранее приведенными выражениями (5) и (6). Причем в данном случае вместо двух акустических каналов используется один, но в разные моменты времени и в противоположных направлениях. Поэтому в соответствии с формулами преобразования в ультразвуковых расходомерах с частотным выходом можно записать для времени распространения акустического сигнала по потоку и против потока

$$t_1 = \frac{l_0}{c + v \pm \Delta v};$$

$$t_2 = \frac{l_0}{c - v \pm \Delta v},$$

откуда для выходной величины получим

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2}{l_0} (v \pm \Delta v).$$

В этих формулах Δv есть приращение скорости потока вдоль акустического пути из-за искажения профиля скоростей в вертикальной плоскости, возникающего при повороте пластины на угол α , причем при повороте пластины 3 по часовой стрелке коэффициент передачи электроакустического преобразователя увеличивается, при повороте против часовой стрелки – уменьшается.

Указанная зависимость может явиться источником дополнительных погрешностей измерения расхода сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бударин В.А. Метод расчета движения жидкости. – Одесса: Астропринт, 2006. – 138 с.
2. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.

4. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
5. *Антонов Н.Н.* Многоканальный частотно-временной ультразвуковой расходомер / Н.Н. Антонов, А.Г. Сафин, Е.В. Дмитриев, В.А. Решетников. // Измерительная техника. – 1976. – № 8.
6. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного поля. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2011 г.

INFLUENCE OF STREAM TURBULENCE ON TRANSFER FACTOR OF ELECTRO-ACOUSTIC CONVERTER OF FLOWMETER

A.O. Krylov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The influence of stream turbulence on the transfer factor of the electro-acoustic converter of the flowmeter defining the oil expense in the main pipelines is considered in the paper.

Keywords: *the main pipeline, turbulence of a stream, transfer factor, a flowmeter.*

Alexander O. Krylov, Teacher.