

Оценка расхода воды по данным ультразвукового измерения давления

Лысова Алена Александровна, доцент
 Кацай Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент
 Антипин Дмитрий Сергеевич, студент
 Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск)

В работе представлены результаты исследования по оцениванию объемного расхода воды при ламинарном и турбулентном течениях с образованием вихревой дорожки Кармана. Приведенные формулы учитывают температурные зависимости некоторых параметров воды.

Ключевые слова: ультразвук, давление, объемный расход, температурные зависимости, ламинарное течение, турбулентное течение, вихревая дорожка Кармана.

Введение: в настоящее время известно много способов и методов определения расхода вещества. Часть из них основана на применении ультразвука. Авторами работы предлагается один из вариантов определения расхода среды с помощью ультразвука.

Постановка задачи: сформировать выражения, связывающие расход воды с давлением при ламинарном и турбулентном течениях.

Методы решения

Известно, что при ламинарном течении жидкости средняя скорость потока определяется выражением [3, с. 11]:

$$V_{\text{ср}} = \frac{P_1 - P_2}{32 \cdot \mu(T) \cdot l} \cdot d^2,$$

где P_1 – давление в сечении А-А, Па;

P_2 – давление в сечении Б-Б, Па;

l – расстояние между сечениями А-А и Б-Б, м;

d – диаметр трубопровода, м;

$\mu(T)$ – динамическая вязкость воды, Па*с;

T – температура, °С.

Зависимость $\mu(T)$ имеет следующий вид [4]:

$$\mu(T) = \frac{1,77 \cdot 10^{-3}}{(1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2) \cdot (0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} \cdot T)}$$

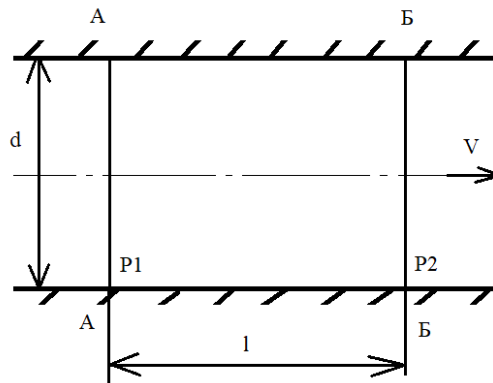


Рис. 1 Ламинарный поток

Объемный расход жидкости в случае трубопровода круглого сечения определяется выражением [4, с. 11]:

$$Q_0 = V_{\text{ср}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

В сечениях А-А и Б-Б, показанных на рис.1 перпендикулярно оси трубопровода, диаметрально противоположно располагаются источник и приемник ультразвука. На основе работ [1, с.10], [3, с. 4], [5] получена зависимость давления от скорости звука:

$$P = (P_0 + 3 \cdot 10^8) \cdot \left(\frac{1}{\beta \cdot c^2 \cdot \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} \cdot T}} \right)^7 - 3 \cdot 10^8 \quad (1)$$

где P – текущее давление, Па;

P_0 – атмосферное давление, 101325 Па;

$\beta = 4,44 \cdot 10^{-10}$ – коэффициент сжимаемости воды, м·с²/кг;

c – скорость звука, м/с;

T – температура воды, °С.

Давления P_1 и P_2 в сечениях А-А и Б-Б, рассчитанные по выражению (1), будут различными ввиду потери напора.

Для оценки расхода регистрируется время прохождения ультразвуковой волны через сечения А-А и Б-Б и рассчитываются давления в этих сечениях. Вследствие малого коэффициента сжимаемости воды, значения времени прохождения через сечения А-А и Б-Б будут отличаться на очень малые величины. Для регистрации быстрых процессов можно использовать цифровые сигнальные процессоры, построенные по DSP-технологии и имеющие разрешающую способность до $1 \cdot 10^{-9}$ с [2, с.102].

Таким образом, объемный расход можно оценить по следующему выражению:

$$Q_0 = \frac{\pi \cdot (P_1 - P_2)}{128 \cdot \mu(T) \cdot l} \cdot d^4$$

В случае турбулентного потока с образованием вихревой дорожки Кармана давление распределяется неравномерно по длине трубопровода. На пути ультразвука может попадаться несколько участков с различным давлением. Общее время прохождения ультразвука по длине трубопровода вычисляется через сумму времен участков:

$$t_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{c_i}$$

где x_i – протяженность i -го участка, м;
 c_i – скорость звука на i -м участке, м/с;
 n – количество участков.

Если предположить, что вихри не образуются, то время прохождения ультразвука через поперечное сечение трубопровода составит:

$$t = \frac{d}{c}$$

Сдвиг фазы определится по следующему выражению:

$$\Delta\varphi = \omega \cdot (t_{\text{общ}} - t),$$

где ω – угловая частота ультразвука, рад/с.

На основе работ [2, с. 10], [3, с. 4], [4] получена зависимость объемного расхода от сдвига фазы:

$$Q_0 = \frac{\Delta\varphi \cdot V_{\text{ср}} \cdot \left(0,212d \frac{2,7\mu(T)}{\rho \cdot V_{\text{ср}}}\right) \pi}{8a \cdot \omega \cdot \beta \frac{995,7}{0,984+0,483 \cdot 10^{-3} \cdot T}},$$

где $\Delta\varphi$ – измеряемый сдвиг фазы, рад;
 $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока, м/с;
 $\beta = 4,44 \cdot 10^{-10}$ – коэффициент сжимаемости воды, м \cdot с 2 /кг;
 d – диаметр трубопровода, м;
 t – время прохождения ультразвука по сечению, с;
 $T = 20^\circ\text{C}$ – температура воды;
 $\mu(T)$ – динамическая вязкость воды, Па \cdot с;
 a – ширина тела обтекания, м;
 ω – угловая частота ультразвука, рад/с.

Заключение: в процессе проведенного исследования получены выражения для оценки объемного расхода жидкости с помощью метода ультразвукового измерения давления для ламинарного и турбулентного течения с вихревой дорожкой Кармана. Приведенные выражения справедливы для диапазона температур от $+10^\circ\text{C}$ до $+100^\circ\text{C}$. Достоинство предлагаемого метода определения объемного расхода жидкости для ламинарного течения состоит в использовании оценок средней скорости потока на отдельных участках без уточнения параметров расчетного выражением.

Литература:

1. Воробьев, Е.А. Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации: учебное пособие / Е.А. Воробьев – СПб.: Изд-во СПбГУАП, 2002. – 54 с.
2. Жестков, А.В. Применение DSP-технологий для измерения расхода жидких и газообразных сред в кориолисовых и ультразвуковых расходомерах «Элметро» / А.В. Жестков // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. Вып. – №3. С. 102–106.
3. Измерение скорости звука в жидкостях: методические указания / сост. А.И. Коробков. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 37 с.
4. Физические свойства воды / HIGHEXPERT.RU: сервер группы инженеров, специализирующихся в области машиностроения. URL: <http://www.highexpert.ru/content/liquids/water.html> (дата обращения: 26.05.2020).