Исходя из выше сказанного, можно сделать выводы: программный продукт Revit основан на технологии информационного моделирования строительных объектов (BIM), объединяющий в себе проектирование зданий, инженерных систем и особенности конструктивного решения зданий.

1. Баклушина И.В. Об интеграции BIM-технологий в образовательный процесс технического вуза//Тенденции развития науки о образования.2020. – №58. – С. 14-17.
2. Павлов Н.Г., Кузнецов А.А., Ни Е.Н., Фалеева Е.В. BIM системы. Программное обеспечение Revit//Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2018. Т. 2. С. 101-104.
3. Суродеев А.В., Терешкин И.П. Основные аспекты внедрения BIM-технологий в России// XLVII Огарёвские чтения.2019. – С. 216-219.
4. О программе Autodesk Revit. Введение. Возможности [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://sapr-journal.ru/stati/autodesk-revit/>
5. Якубенко, А., Уроки Revit / САПР-журнал / SAPR-Journal.ru / URL:<http://sapr-journal.ru/category/uroki-revit/>

Лысова А.А., Антипин Д.С.

Определение расхода жидкости при ламинарном и турбулентном течении с помощью ультразвукового измерения давления

*Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет)
(Россия, Челябинск)*

doi: 10.18411/lj-06-2020-104

idsp: ljjournal-06-2020-104

Аннотация

Предлагается математическая модель для определения объемного расхода при ламинарном и турбулентном течении жидкости с образованием вихревой дорожки Кармана, в которой учитываются температурные зависимости некоторых параметров жидкости.

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

Abstract

Formulas are proposed for determining the volume flow rate for laminar and turbulent water flow with the formation of a vortex path. These formulas take into account the temperature dependence of some water parameters.

Keywords: ultrasound, pressure, volume flow, temperature dependencies, laminar flow, turbulent flow.

В настоящее время известно множество способов и методов определения расхода вещества. Часть из них основана на применении ультразвука. При этом есть устройства, которые используют ламинарный поток, а другие – турбулентный. Одним из видов турбулентного потока является вихревая дорожка Кармана. Авторами работы предлагается один из вариантов определения расхода среды с помощью ультразвука при ламинарном потоке и при турбулентном потоке с образованием вихревой дорожки Кармана.

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

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

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 [5]

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

Рисунок 1 – Ламинарный поток

А объемный расход в случае трубопровода круглого сечения равен:

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

Перпендикулярно оси трубопровода в сечении А-А и Б-Б диаметрально противоположно располагаются источник и приемник ультразвука. На основе [1, с.10], [3, с. 4], [4] авторами работы получена зависимость давления и скорости звука:

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

где P – текущее давление, Па,

P_0 – атмосферное давление, 101325 Па,

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

d – диаметр трубопровода, м,

t – время прохождения ультразвука по сечению, с,

T – температура воды, °С.

При этом давление P_1 и P_2 , посчитанные по формуле выше, не будут равны друг другу ввиду потери напора.

Регистрируется время прохождения ультразвука по сечению А-А и по сечению Б-Б и считается давление в соответственном сечении. Вследствие малого коэффициента сжимаемости воды, значения времени прохождения на сечениях А-А и Б-Б будут отличаться на очень малые величины, что может стать проблематичным для работы таких сигналов ЦАП микроконтроллеров, однако известна DSP-технология цифровых сигнальных процессоров, имеющих разрешающую способность до $1 \cdot 10^{-9}$ с [2, с.102].

Таким образом, объемный расход:

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

На основе [1, с. 10], [3, с. 4], [4] Авторами работы были получены графические зависимости плотности от давления и скорости звука в воде от давления.

Рисунок 2 – Графики зависимостей плотности воды и скорости звука от давления

В случае турбулентного потока с образованием вихревой дорожки Кармана давление распределяется неравномерно по длине трубопровода, а участками. Авторами статьи предложено следующее решение. На пути ультразвука может попадаться несколько участков с различным давлением. Общее время прохождения составит:

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

где x_i – протяженность i -го участка, м,

c_i – скорость звука в i -м участке, м/с.

n – количество участков.

Если предположить, что вихри не образуются, то время прохождения ультразвука по диаметру трубопровода составит:

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

Сдвиг фазы составит:

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

где ω – угловая частота ультразвука, рад/с.

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

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

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·с²/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·с,

a – ширина тела обтекания, м

ω – угловая частота ультразвука, рад/с.

Приведенные формулы справедливы для диапазона температур $+10...+100^\circ\text{C}$. Достоинством определения объемного расхода для ламинарного течения по такой формуле является отсутствие необходимости проведения моделирования для уточнения каких-либо параметров формулы. Недостатком определения объемного расхода для турбулентного течения по такой формуле является необходимость проведения моделирования для оценки средней скорости потока, количество и протяженность участков. Общим достоинством этих формул является учет температуры. Общим их недостатком является нелинейные зависимости от давления и температуры.

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 – <http://www.higheexpert.ru>