

Метод измерений пульсирующего расхода жидкости

Ж. А. ДАЕВ

Казахско-Русский международный университет,
Актобе, Казахстан, e-mail: zhand@yandex.ru

Рассмотрена модель течения нестационарного потока жидкости. Предложен комбинированный метод измерений расхода пульсирующего потока жидкости. Получены основные зависимости и уравнения для данного метода.

Ключевые слова: пульсация, расходомеры, расход.

A model of non-steady liquid flow is considered. A combined method for measuring pulsating liquid flow is proposed. The basic relations and equations for this method are obtained.

Key words: flow rate, pulsation, liquid flow.

Большинство методов и моделей измерений расходов жидкостей и газов базируются на предположении, что поток стационарен. Однако часто эти потоки, протекая через трубопроводные системы при работающих насосах и компрессорах, становятся нестационарными, в них возникают различного рода пульсации, являющиеся источниками дополнительных погрешностей. Существующие методы оценки пульсирующих потоков сложны, носят экспериментальный характер, связь с уравнениями движения жидкости просматривается не всегда [1]. При возникновении пульсаций в потоках в традиционные уравнения вводят поправочные коэффициенты, зависящие от частоты и амплитуды.

Цель данной работы — получение зависимости для пульсирующего потока идеальной жидкости. Эта зависимость должна стать базовой моделью для решения задачи измерения расхода потоков реальных жидкостей и газов. В статье рассмотрен метод переменного перепада давления на базе сужающих устройств, как один из самых простых и распространённых способов измерения расхода и количества жидкостей и газов.

Согласно [1, 2] при увеличении частоты пульсаций основной вклад в погрешность измерений вносит локальная составляющая ускорения жидкости. Смоделируем процесс течения жидкости с учётом этой составляющей. Движение идеальной жидкости описано уравнением Эйлера [3]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (1)$$

где V , ρ , p — скорость, плотность и давление жидкости, соответственно; t — время; ∇ — оператор Гамильтона.

Уравнение (1) при решении задач дополняют уравнением непрерывности, которое представляет закон сохранения вещества:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0. \quad (2)$$

Известно, что $j = \rho V$ — плотность потока, по которой определяется количество жидкости, протекающее в единицу

времени через единицу площади, расположенную перпендикулярно скорости [3]. Из-за сложности интегрирования уравнений (1), (2) при решении задач полагают, что жидкость несжимаема, а её движение стационарно, поэтому локальные составляющие производных скорости и плотности приравнивают нулю, после чего уравнения легко интегрируются. После интегрирования (1), (2) становятся стандартными уравнениями, положенными в основу многих методов измерения расхода и количества жидкостей и газов, например Бернулли и неразрывности потока.

Найдём решение уравнения (1) для одномерного течения пульсирующей идеальной жидкости, её плотность в рамках задачи примем постоянной. Для этого предварительно заменим частные производные на бесконечно малые разности и перепишем (1) в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} + V \frac{dV}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}. \quad (3)$$

Далее разделим уравнение (3) на конвективную составляющую производной скорости. Сократив подобные величины, получим

$$\frac{dx}{Vdt} + 1 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{VdV}. \quad (4)$$

В выражении (4) заменим приращение dx на конечную характерную длину L канала, приращение времени dt — на конечный промежуток времени, который обозначим $1/f$. Тогда (4) перепишем как

$$\left(\frac{Lf}{V} + 1\right) V dV = -\frac{dp}{\rho}, \quad (5)$$

где f — частота пульсаций потока.

Раскроем скобки и проинтегрируем (5), после чего выведем выражение:

$$V^2/2 (2Lf/V + 1) + p/\rho = \text{const}, \quad (6)$$

где $Sh = Lf/V$ — число Струхала, являющееся мерой нестационарности пульсирующего потока идеальной жидкости.

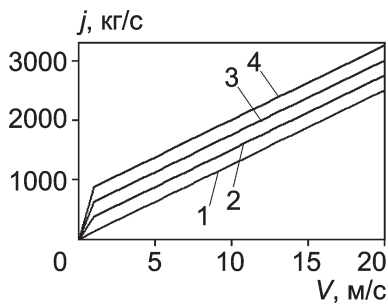


Рис. 1. Сравнительная зависимость плотности потока от скорости при различных значениях частоты пульсации:

1 – $f = 0$ Гц; 2 – $f_1 = 10$ Гц; 3 – $f_2 = 20$ Гц;
4 – $f_3 = 30$ Гц

Проведя аналогичные рассуждения, найдем соотношение для уравнения неразрывности потока при пульсирующем потоке жидкости:

$$j(Sh + 1) = \text{const.} \quad (8)$$

Для $Sh \gg 1$ поток считается нестационарным, а локальная составляющая ускорения начинает преобладать над его конвективной составляющей. Последнее учтено в (7), (8) через отличное от нуля число Струхала. Для $Sh \ll 1$ или $Sh \rightarrow 0$ выражения (7), (8) переходят в уравнения Бернулли и уравнение неразрывности для стационарного потока.

На рис. 1 приведён график, отражающий зависимость плотности потока от скорости жидкости. Из графика следует, что игнорирование частоты пульсаций может привести к дополнительным погрешностям измерений расхода, а плотность скорости потока значительно возрастает с ростом частоты. На основании уравнений (7), (8) выведем зависимость, реализующие методику измерений пульсирующего расхода жидкости.

На рис. 2 изображён процесс движения пульсирующего потока. Для составления уравнений движения рассмотрим два сечения, используя методы гидродинамического и геометрического подобий. Из выражения (7) в соответствии с рис. 2 получим уравнение:

$$V_1^2(2Sh_1 + 1)/2 + p_1/\rho = \\ = V_2^2(2Sh_2 + 1)/2 + p_2/\rho + \xi V_2^2(2Sh_2 + 1)/2, \quad (9)$$

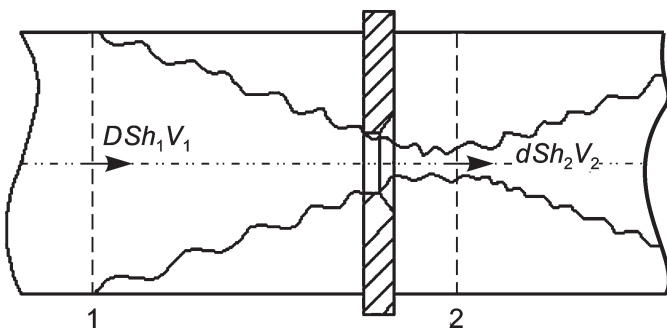


Рис. 2. Процесс движения пульсирующего потока жидкости через сужающее устройство:

1, 2 — первое и второе сечения, соответственно

Перепишем (6) в виде решения уравнения (1) для пульсирующего потока в следующем виде:

$$V^2(2Sh + 1)/2 + p/\rho = \\ = \text{const.} \quad (7)$$

Таким образом, выражение (7) является окончательным уравнением движения пульсирующего потока идеальной жидкости. Проведя аналогичные рассуждения, найдем соотношение для уравнения неразрывности потока при пульсирующем потоке жидкости:

где V_1, V_2 — скорости жидкости в первом и втором сечениях, соответственно; Sh_1, Sh_2 — числа Струхала в соответствующих сечениях; p_1, p_2 — давление флюида до и после сужающего устройства; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Скорость в первом сечении можно выразить из (8) следующим образом:

$$V_1 = \mu \beta^2 (Sh_2 + 1/Sh_1 + 1) V_2, \quad (10)$$

где μ — коэффициент, учитывающий сужение струи; β — отношение диаметра сужающего устройства d к диаметру трубопровода D .

Введем в (9), (10) коэффициент отбора давления $\Psi = \Delta p^*/\Delta p$, где $\Delta p^* = p_1 - p_2$ — перепад давления на сужающем устройстве; Δp — перепад давления, подаваемого на вход измерительного преобразователя. Выражение для скорости жидкости во втором сечении запишем как

$$V_2 = \left\{ \Psi / \left[(1 + \xi)(2Sh_2 + 1) - \mu^2 \beta^4 \left[(Sh_2 + 1/Sh_2 + 1) \right]^2 \right] \right\}^{1/2} \times \\ \times (2\Delta p/\rho)^{1/2} = \alpha (2\Delta p/\rho)^{1/2}, \quad (11)$$

где α — коэффициент расхода, в состав которого входит число Струхала, связанное с пульсирующим характером движения.

Выведем уравнение для коэффициента скорости входа E , который можно записать через отношение кинетической энергии потока к потенциальной, выраженной в виде перепада давления на сужающем устройстве. Решив совместно (7), (8), определим этот коэффициент:

$$E = \left[1 - \beta^4 (2Sh_1 + 1/2Sh_2 + 1)(Sh_2 + 1/Sh_1 + 1)^2 \right]^{-1/2}. \quad (12)$$

Разделив коэффициент расхода в уравнении (11) на уравнение (12), получим коэффициент истечения сужающего устройства для пульсирующего потока:

$$C = \alpha / E = \left\{ \Psi (1 - \beta)^4 k_0 k_{Sh}^2 / \left[(1 + \xi)(2Sh_2 + 1) - \mu^2 \beta^4 k_{Sh}^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (13)$$

где $k_0 = (2Sh_1 + 1)/(2Sh_2 + 1)$; $k_{Sh} = (Sh_2 + 1)/(2Sh_1 + 1)$.

Таким образом, коэффициент истечения C в данном случае также является функцией от числа Струхала.

Нетрудно заметить: если числа Струхала обращаются в нуль, то величины, определяемые по формулам (11)—(13), принимают традиционные значения для стационарного движения жидкости. Следовательно, для пульсирующих течений традиционные уравнения нахождения коэффициента истечения по Ридер-Харрису или Штольцу требуют модификации путём введения числа Струхала.

Запишем выражение для определения расхода жидкости:

$$Q = (2\Delta p/\rho)^{1/2} C E \pi d^2/4. \quad (14)$$

Закключение. Отличительной особенностью предложенного метода являются числа Струхала, присутствующие в коэффициенте истечения и учитывающие нестационарность

потока. Следовательно, для нестационарных течений жидкости необходимо иметь соответствующие выражения для коэффициентов истечения и скорости входа. В случае измерений расхода нестационарного потока газа должен быть найден соответствующий коэффициент расширения. Основные положения предложенного метода необходимо проверить, одновременно измерив частоты пульсаций потока на определённом участке трубопровода и скорость потока, т. е. установив зависимость коэффициента истечения сужающего устройства от числа Струхала. С увеличением частоты пульсаций при одной и той же скорости потока регистрируемый расход вещества должен увеличиваться, приобретая дополнительное ускорение (см. рис. 1). После получения экспериментальных данных метод можно будет распространить на реальные жидкости и газы.

Таким образом, выведено уравнение Бернулли для нестационарного потока идеальной жидкости, из которого оп-

ределены аналитические выражения, составляющие основу предложенного метода измерений расхода пульсирующего потока идеальной жидкости как базовой модели для построения методик измерений расхода и количества реальных жидкостей и газов.

Л и т е р а т у р а

1. **Кремлёвский П. П.** Расходомеры и счётчики количества веществ. Справочник. Л.: Машиностроение, 1989.
2. **Tweten D., Nored M., Brun K.** The Physics of Pulsations // Conf. Gas Machinery. Albuquerque, 2008. P. 1—16.
3. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

Дата принятия 12.03.2015 г.

531.787.089.6:665.6

Разработка эталонной установки для метрологического обеспечения измерений давления насыщенных паров нефти и нефтепродуктов

О. С. ВИТКОВСКИЙ¹, М. Я. МАРУСИНА²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: O. S. Vitkovskiy@vniim.ru

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики ИТМО, С.-Петербург, Россия, e-mail: marusina_m@mail.ru

Представлены результаты разработки эталонной установки нового метода для измерений давления насыщенных паров нефти и нефтепродуктов. Приведены характеристики стандартных образцов, аттестуемых на установке. Обоснованы преимущества устройства перед зарубежными аналогами, показаны перспективы его автоматизации и утверждения в качестве рабочего эталона.

Ключевые слова: эталон, давление насыщенных паров, нефтепродукты, анализаторы, стандартные образцы.

The results of the development of a reference device for measurement of saturated vapor pressure in oil and oil products are presented. A new method is described for the measuring of saturated vapour pressure, which forms the basis of the developed reference device. The characteristics are given of the reference materials certified using the reference device. The advantages of this device are demonstrated compared to foreign-made similar devices. The perspective of automatic performance and approval of the device as a working measurement standard are shown.

Key words: measurement standard, saturated vapour pressure, oil product, analyzers, reference materials.

Давление насыщенных паров (ДНП) — одна из важнейших характеристик при оценке качества нефти и нефтепродуктов. Оно определяет эксплуатационные свойства нефтепродуктов, таких как различные виды топлива, масел, растворителей и т. д., а также результаты расчётов технологических процессов [1].

Цена на нефть и нефтепродукты напрямую зависит от их качества, поэтому необходимо обеспечивать контроль как на стадии добычи и транспортировки, так и при переработке и хранении. При хранении и транспортировке нефти и нефтепродуктов невозможно обойтись без потерь. Больше половины всей массы технологических утечек приходится на

выделяющиеся из нефтепродуктов углеводороды, количество которых, при прочих равных внешних условиях, зависит от испаряемости, напрямую связанной с ДНП и содержанием в нефти растворённых и свободных газов. Без должного контроля этих параметров невозможно выявить основные причины потерь и принять соответствующие меры по их предотвращению [2—4].

В России ДНП определяют методом, основанным на использовании прибора под названием Бомба Рейда [1]. В международном стандарте [5] отмечено, что измеренное таким образом ДНП приблизительно соответствует ДНП испытуемого продукта при 37,8 °С, при этом его погреш-