

РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 681.121.89.082.4; 681.2.083; 681.2.088

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ВРЕМЯИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

С.И. Герасимов

В статье приведен анализ отдельных факторов, часто не учитываемых на практике, которые могут приводить к возникновению погрешности измерения расхода жидкости. Рассмотрена методическая погрешность измерения расхода времяимпульсным ультразвуковым методом, обусловленная отличием фактического профиля поперечного сечения напорного трубопровода от круглой формы. Представлено аналитическое выражение для оценки данной погрешности. Даны рекомендации по ее уменьшению.

Ключевые слова: ультразвук, измерение, расход, время импульсный метод, профиль сечения, погрешность

Введение

В настоящее время задача измерения объемного расхода и учета потребления жидкостных природных и энергоресурсов приобретает все большую актуальность и хозяйственно-экономическое значение [1]. Данное обстоятельство обусловлено не только экологическими факторами — необходимостью сохранения и возобновления природных ресурсов, но и их стоимостью, которая на данный момент чрезвычайно высока. Для обеспечения поставленной задачи используются жидкостные расходомеры и счетчики количества жидкости [1]. В современной расходомерии значительное место занимают ультразвуковые приборы измерения расхода [1, 2]. Так, на промышленных предприятиях широкое применение получили времяимпульсные ультразвуковые расходомеры [1, 3]. Поскольку подобные приборы часто имеют узкоспециализированную область применения, а охватить всевозможные их разновидности весьма затруднительно, в дальнейшем ограничимся рассмотрением расходомеров, предназначенных для работы с напорными трубопроводами и имеющие накладные электроакустические преобразователи (ЭАП) [3].

Принцип работы расходомера

В общем случае измерение расхода указанным методом [1, 3] сводится к определению параметра τ — разности времен распространения ультразвуковых сигналов про-

тив потока и по потоку жидкости в трубопроводе (см. рисунок 1). При известных внутреннем диаметре трубопровода D и скорости распространения ультразвуковых колебаний в неподвижной контролируемой среде c скорость потока, осредненную по линии ультразвукового луча, можно определить из нижеприведенного выражения:

$$V_D = \frac{\tau \cdot c^2}{2L \cos \alpha}, \quad (1)$$

где L — расстояние между ЭАП по линии ультразвукового луча, равное $D / \sin \alpha$ (см. рисунок 1); α — угол между направлением распространения ультразвуковых волн и осью трубопровода; l — расстояние между ЭАП по оси трубопровода, причем $l = L \cos \alpha$.

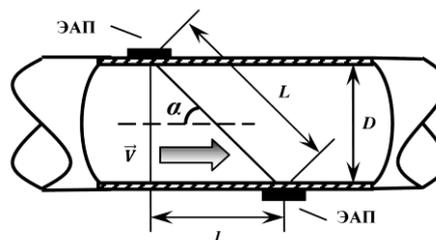


Рисунок 1 – Измерение расхода жидкости времяимпульсным методом

В общей сложности объемный расход Q можно вычислить из произведения осредненной по сечению трубопровода скорости пото-

РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

ка V_S и площади поперечного сечения трубопровода S , которая рассчитывается из известного его диаметра. В простейшем случае $V_S = V_D$ [1] без учета реального профиля скоростей потока жидкости на рассматриваемом участке трубопровода, а

$$Q = V_S S = \frac{\pi V_D D^2}{4}. \quad (2)$$

Суть проблемы

Как следует из определения расхода [4], расход — это количество вещества, протекающего через сечение трубопровода за единицу времени, а объемный расход определяется согласно вышеприведенной формуле (2). При вычислении расхода делается допу-

казанную погрешность в соответствии с общепринятой классификацией погрешностей измерений следует отнести к методической погрешности, поскольку согласно ее определению [5] она образуется из неадекватности используемой модели.

Наиболее распространенный случай деформации трубопровода — овальность профиля его поперечного сечения. По сути, это есть дефект геометрической формы сечения трубопровода, возникающий в результате превращения исходного круглого сечения трубопровода в эллиптическое.

Поиск решения поставленной задачи

Исходя из определения, овальность [6] — частный случай отклонения от округлости,

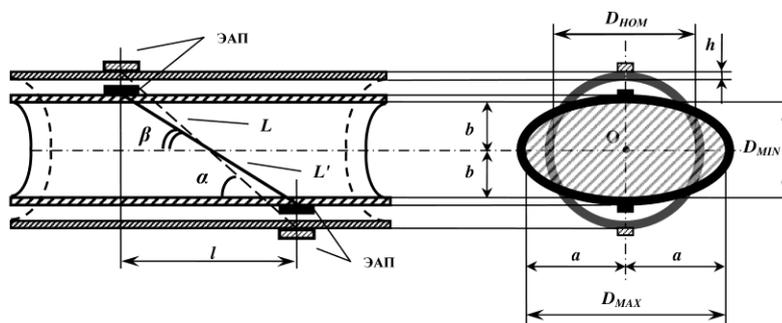


Рисунок 2 – Изображения разрезов продольных (слева) и поперечных (справа) сечений труб круглой и овальной форм

щение, что поперечное сечение трубопровода имеет форму круга, площадь которого $S_{KP} = \frac{\pi D_{НОМ}^2}{4}$, где $D_{НОМ}$ — номинальное значение внутреннего диаметра трубопровода или измеренное фактическое значение внутреннего диаметра, равное $\frac{L_{ОКР}}{\pi} \cdot h$. Здесь $L_{ОКР}$ — длина внешней (наружной) окружности трубопровода, h — толщина его стенки (см. рисунок 2).

Однако, в действительности сечение трубопровода никогда не будет иметь идеально круглую форму (даже непосредственно после изготовления трубы). Таким образом, всегда будут присутствовать какие-либо местные деформации трубопровода, вызванные либо механическими повреждениями, либо длительным воздействием силы тяжести предметов, лежащих на верхней части трубы, и транспортируемой жидкости. Следовательно, отличие профиля сечения трубопровода от формы круга, очевидно, приведет к возникновению погрешности.

при котором реальный профиль трубы представляет собой овалообразную форму, наибольший D_{MAX} и наименьший D_{MIN} внутренние диаметры которой находятся во взаимно перпендикулярных направлениях. Относительной величиной, характеризующей овальность трубопровода, будет являться параметр овальности [7], равный отношению разности между D_{MAX} и D_{MIN} в одном поперечном сечении к номинальному диаметру $D_{НОМ}$ (см. рисунок 2).

$$EFK_o = \frac{D_{MAX} - D_{MIN}}{D_{НОМ}} \times 100\%. \quad (3)$$

С целью упрощения последующих вычислений будем считать трубопровод бесконечно длинным. Далее, примем допущение, что остаются неизменными такие параметры трубопровода, как $L_{ОКР}$ и h .

В силу того, что точной формулы вычисления длины окружности (периметра) эллипса однозначно не существует, то в расчетах будем использовать одну из множества приближенных формул нахождения периметра [8]. Исходя из соображений требуемой точно-

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ВРЕМЯИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

сти вычислений, а также простоты выполнения математических операций наиболее сбалансированным вариантом представляется использование формулы Рамануджана [8].

$$L_{OKP} = \pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right], \quad (4)$$

где a , b — большая и малая полуоси эллипса соответственно. Применительно к данному случаю: $D_{MAX} = 2a$, $D_{MIN} = 2b$, $D_{НОМ} = D$, что отображено на рисунке 2.

Выбор данной формулы обусловлен тем, что она обеспечивает хорошие результаты в случае малой величины овальности трубы, т.е. когда форма сечения трубы близка к форме круга. На практике степень деформации трубопровода, как правило, является небольшой — порядка нескольких процентов [9]. Большие деформации в подавляющем количестве случаев становятся визуально обнаруживаемыми. Более того, исходя из правил по монтажу ЭАП на трубопроводе, не рекомендуется производить установку ЭАП на поврежденных участках трубопровода.

Перепишем формулу (3) с учетом вышеуказанных замечаний:

$$a - b = \frac{D_{НОМ}}{2} \frac{EFK_o}{100\%}. \quad (5)$$

Обозначим выражение (5) как k , т.е. $k = a - b$, тогда, приравнявая выражения, определяющие периметры эллипса (4) и круга ($L_{OKP} = \pi D_{НОМ}$), и решая сформированное уравнение относительно неизвестного b , получим:

$$b = 0,1 \left[3D_{НОМ} - 5k + \sqrt{4D_{НОМ}^2 - 5k^2} \right]. \quad (6)$$

Запишем выражение (6) в развернутом виде, подставив в него k , определяемый согласно выражению (5):

$$b = 0,1D_{НОМ} \left[3 - 0,5 \left(\frac{EFK_o}{100\%} \right) + \sqrt{4 - 1,25 \left(\frac{EFK_o}{100\%} \right)^2} \right] \quad (7)$$

Соответственно, большая полуось эллипса a определяется подстановкой найденного b согласно выражению (7) в (5).

$$a = b + 0,5D_{НОМ} \left(\frac{EFK_o}{100\%} \right). \quad (8)$$

В свою очередь, формула вычисления площади эллипса:

$$S_{эл} = \pi ab. \quad (9)$$

Оценка погрешности

Предпримем попытку оценки погрешности, возникающей вследствие отличия профиля поперечного сечения трубопровода от круглой формы. Прежде всего, будем исхо-

дить из того, что объемный расход транспортируемой жидкости остается неизменным.

Запишем обобщенное выражение определения относительной погрешности:

$$\delta_Q = \frac{Q_{ИЗМ} - Q_D}{Q_D} \times 100\% = \left(\frac{Q_{ИЗМ}}{Q_D} - 1 \right) \times 100\%, \quad (10)$$

где $Q_{ИЗМ}$ — измеряемый (вычисляемый) расход жидкости, Q_D — соответственно, действительный (фактический) расход.

Рассмотрим случай, когда трубопровод подвергается деформации так, как это отображено на рисунке 2, т.е. происходит сплющивание трубы в вертикальной плоскости. Следовательно, площадь поперечного сечения данного участка трубопровода уменьшится. Помимо этого, произойдет уменьшение и расстояния L , т.е. вместо L в формуле (1) вычисления скорости потока будет участвовать L' (см. рисунок 2). В свою очередь, L выражается через D . Стоит заметить, что при этом расстояние l в обоих случаях совпадает. Тогда, предполагая расход жидкости неизменным на данном участке трубопровода и полагая параметры τ и c константами, в силу уменьшения площади сечения трубопровода должна увеличиться действительная скорость потока жидкости.

Однако нельзя не отметить, что угол α также изменится при сплющивании трубы — в данном случае он уменьшится, станет более острым. Тангенс этого угла нетрудно выразить через диаметр: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_{НОМ}}{l}$. Тогда

отношение $\operatorname{tg} \alpha$ к диаметру составит $\frac{1}{l}$, так, что диаметры взаимно сократятся. Отмеченное будет справедливо и после возникновения деформации трубопровода — в этом случае диаметр $D_{НОМ}$ изменится на D' , а угол α , соответственно, на β . Здесь D' — фактическое значение внутреннего диаметра трубы, где $D' = 2b$ (см. рисунок 2).

Таким образом, скорость по приведенной формуле (1) будет вычисляться корректно для рассматриваемой деформации трубопровода. Более того, данный эффект влияния деформации трубопровода на показания расходомера не будет иметь места, а непосредственное влияние будет производить только изменение площади сечения трубопровода.

Несмотря на то, что расход жидкости остается неизменным при деформации трубопровода его измерение (вычисление) будет происходить с некоторой ошибкой по отно-

РАЗДЕЛ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

шению к фактическому расходу. Другими словами, изменение профиля поперечного сечения трубопровода на его измеряемом участке повлечет за собой изменение расчетного значения объемного расхода. В рассматриваемом случае мы получим завышенное значение объемного расхода жидкости. Тогда можно говорить о том, что итоговое выражение определения относительной методической погрешности измерения (вычисления) расхода, вытекающее из (10), по сути, сведется к отношению номинальной и фактической площадей сечений трубопровода:

$$\delta_Q = \left(\frac{S_{НОМ}}{S} - 1 \right) \times 100\%, \quad (11)$$

где $S_{НОМ}$ — номинальное (исходное) значение площади поперечного сечения трубопровода (в данном случае $S_{НОМ} = S_{КР}$), S — действительное значение площади поперечного сечения трубопровода (здесь $S = S_{ЭЛ}$).

Представим выражение (11) в окончательном виде, производя в него подстановку формул расчета площадей круга и эллипса:

$$\delta_Q = \left[\frac{D_{НОМ}^2}{ab} - 1 \right] \times 100\%. \quad (12)$$

Произведем оценку рассматриваемой погрешности согласно вышеприведенному здесь аналитическому выражению (12). С целью более наглядного представления величины и значимости данной погрешности по отношению к основной нормируемой погрешности расходомера можно отобразить график исследуемой функциональной зависимости от значения деформации (параметра овальности) трубопровода (см. рисунок 3).

Очевидно, для того, чтобы стало возможным построение указанной зависимости, необходимо задаться определенными значениями параметров $D_{НОМ}$ и EFK_O . Так, прием среднестатистическое значение диаметра равным 100 мм, как сравнительно широко используемого. Параметр деформации или овальность трубопровода EFK_O будет варьироваться в пределах от 0 до 5%, поскольку, как это упоминалось ранее, имеет смысл анализировать влияние деформации трубопровода на показания расходомера только в отмеченном диапазоне значений. В качестве материала трубы предполагается сталь.

Как следует из представленного графика, полученная зависимость имеет нелинейный характер при заданных условиях. Кроме того, стоит подчеркнуть, что полученные ре-

зультаты представлены для случая, когда деформация трубопровода происходит в вертикальной плоскости (см. рисунок 2). В случае деформации трубопровода в горизонтальной плоскости следует полагать, что выражение (12) также останется справедливым, потому что, как было установлено, при изменении D изменится и угол α , но l при этом будет иметь прежнее значение.

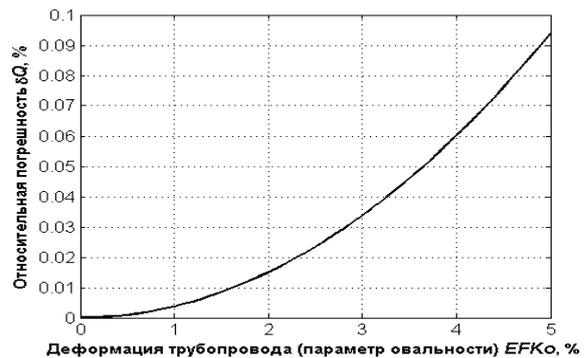


Рисунок 4 – График относительной погрешности измерения расхода жидкости

На практике в процессе своей эксплуатации трубопровод может подвергаться весьма значительным внешним воздействиям. Так, согласно [9] допустимое значение параметра овальности трубы может достигать 3,5%, и тогда результирующая погрешность измерения расхода жидкости составит 0,046%. Это является весьма незначительным по отношению к основной нормируемой погрешности приборов подобного рода (1-3%) [1].

Уместным будет отметить, что в приведенных здесь расчетах не учитывалось влияние профиля скоростей потока жидкости, который, очевидно, при изменении профиля сечения трубы также изменится. Тем не менее, можно предположить, что данное влияние будет сравнительно слабым по сравнению с изменением площади сечения трубы.

Строго говоря, осредненную по сечению трубопровода скорость потока V_S следует не считать равной скорости V_D , поскольку в действительности $V_S = V_D K_r$ [1, 3], где K_r есть гидравлический коэффициент, учитывающий распределение локальных скоростей потока жидкости в трубопроводе.

$$K_r = [1,119 - 0,011 \cdot \lg(Re)]^{-1}, \quad (13)$$

где Re — число Рейнольдса [1], зависящее от свойств транспортируемой жидкости.

$$Re = \frac{V_D D}{\mu}, \quad (14)$$

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ВРЕМЯИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

где μ — кинематическая вязкость жидкости.

Если выразить скорость в приведенном выражении (14) согласно формуле (1) через D , то окажется, что D сократится. Можно сказать, что, исходя из данных рассуждений, результат вычисления числа Рейнольдса при использовании данного метода измерения скорости потока жидкости не зависит от значения внутреннего диаметра трубопровода.

$$Re = \frac{\tau \cdot c^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2\mu}. \quad (15)$$

Таким образом, в предположении о постоянстве значений параметров τ , c и μ можно утверждать, что теоретически изменение профиля потока жидкости не вносит каких-либо искажений в вычисляемый результат расхода жидкости. Вполне возможно, что на практике исследуемое обстоятельство и даст определенный эффект, однако, скорее всего, оно будет иметь незначительную силу. Стоит заметить, что входящий в формулу (15) угол α не является константой. Однако, его изменение невелико, поэтому оно не должно приводить к существенному несовпадению чисел Рейнольдса для потока жидкости до и после деформации трубопровода.

Заключение

В рамках данной работы получено аналитическое выражение оценки относительной методической погрешности измерения объемного расхода жидкости вследствие деформации трубопровода — отличия профиля его поперечного сечения от круглой формы. Установлено, что значение погрешности при данных условиях зависит от таких характеристик трубы, как ее номинальное значение внутреннего диаметра и параметр овальности. Показано, что при значительных деформациях трубопровода в определенных случаях становится возможным пренебречь возникающей погрешностью измерения расхода.

Полученное выражение (12) может быть полезным не только при теоретических исследованиях и оценке возможной погрешности в реальных трубопроводных системах, но и при частичной компенсации возникающего влияния деформации трубопровода на погрешность измерения расхода. Это становится осуществимым на практике, если имеется техническая возможность измерения степени деформации трубопровода. Отмеченное обстоятельство особенно актуально для высокоточных приборов, требующих обеспечения малых значений погрешности (0,1–0,5 %) [1].

Подытоживая вышесказанное, следует заключить, что не всегда допустимо прене-

брегать рассматриваемой составляющей погрешности измерения расхода жидкости, и что при эксплуатации подобных приборов высокой сложности существует множество факторов, влияющих на погрешность.

В качестве мер по уменьшению исследуемого влияния профиля поперечного сечения трубопровода на показания расходомера можно привести соблюдение рекомендаций и требований монтажа ЭАП, в частности осуществлять тщательный выбор места установки ЭАП на трубопроводе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ [Текст]: справ. / П.П. Кремлевский. — 4-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1989. — 701 с.
2. Громов, Г. В. Бесконтактные методы измерения расхода жидкости в напорных и безнапорных трубопроводах [Текст]: Г.В. Громов, А.В. Озеров, М.Н. Шафрановский // Мир измерений. — 2004. — №1. — С. 4–8.
3. Громов, Г. В. Ультразвуковой накладной расходомер для гомогенных сред [Текст]: Г.В. Громов // Приборы и системы управления. — 1997. — №11. — С. 17-18.
4. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения [Текст]. — Взамен ГОСТ 15528-70; введ. 1988–01–01. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 43 с.
5. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений: Метрология: Основные термины и определения: Рекомендации по межгосударственной стандартизации [Текст]. — Взамен ГОСТ 16263-70; утв. и введ. 2001.01.01. — М.: Стандартинформ, 2008. — 46с.
6. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация, сертификация [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев, В.В. Терегеря. — 2-е изд. — М.: Логос, 2003. — 525 с.
7. Р 51-31323949-42-99. Рекомендации по оценке работоспособности дефектных участков газопроводов [Текст]. — утв. 1998.22.12. — М.: ВНИИГАЗ, 1998. — 67 с.
8. Michon, G. P. Final answers. Perimeter of an ellipse [Электронный ресурс] / G. P.. Michon — Режим доступа: <http://www.professores.uff.br/hjbortol/disciplinas/2005.1/gma06077/> (дата обращения 21.03.2014).
9. СНиП 3.05.04-85*. Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации [Текст]. — Взамен СНиП III-30-74; утв. 1985.31.05; введ. в действие 1986.01.07. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 76 с.

Аспирант Герасимов С.И. ger_si@inbox.ru, — каф. Информационно-измерительной техники Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт».