

ПОГРЕШНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ОТ РАСШИРЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ПЕРЕПАДАХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Чернов Борис Алексеевич – канд.техн.наук, доцент кафедры "Инженерная кибернетика" Алматинского университета энергетики и связи, г.Алматы

Статьяда, шығын көлемін есептейтін уақыт-импульстік ультрадыбыстық шығынөлшеуіштер алгоритмінің негізінде деформацияланған құбырдың жүйелік терістігі талданады. Алынған формулалардың коэффициенттерді түзету есебіне қолданылуына мысалдар келтірілген.

В статье на основе алгоритма время импульсных ультразвуковых расходомеров по вычислению объемного расхода анализируются их систематические погрешности от расширения и деформации трубопровода. Приводятся примеры использования полученных формул для расчета поправочных коэффициентов.

In article on basis of principle time-impulsy of supersonic gauges about calculation of bulky expenditure analyse them systematic error from warpation of pipeline. Become cited examples about use of receiptly formuls for calculation of correctional coefficients.

Ультразвуковыми называются расходомеры, основанные на измерении зависящего от расхода акустического эффекта, возникающего при проходе ультразвуковых колебаний через поток жидкости. Главное распространение из них получили времяимпульсные расходомеры, в которых измеряется разность времен T_1 и T_2 прохождения ультразвуковых сигналов (УЗС) по направлению и против потока жидкости. Данные расходомеры получают все более широкое применение благодаря ряду положительных черт, в том числе широкому диапазону температуры (от – 220 до 600 °С) и давления, широкому диапазону диаметра трубопроводов от 10 до 10000 мм и более, высокой точности измерений. При диаметре трубопроводов более 150 мм допускаемая относительная погрешность рассматриваемых расходомеров может составлять (0,1...0,25) %, но в среднем оценивается как (0,5...1) % /1,2/. К недостаткам этих приборов относятся, прежде всего, сложность и высокая стоимость.

Ультразвуковые расходомеры обычно служат для измерения объемного расхода, т.к. акустический эффект в них связан со скоростью потока жидкости. Из анализа справочной литературы и документации на времяимпульсные расходомеры, в том числе фирмы «ВЗЛЕТ» /1, 2/, следует, что алгоритм их работы по вычислению объемного расхода может быть выражен формулой

$$Q = \pi (L / \pi - 2h)^2 L_B^2 (T_2 - T_1) / 2L_0 (T_1 + T_2 - 2T_D)^2, \quad (1)$$

где L , h – длина окружности и толщины стенки трубопровода;

L_0 , L_B – осевая база и база прибора;

T_D – дополнительная задержка УЗС.

С изменением температуры твердых тел изменяются их размеры и объем. Поэтому с изменением температуры контролируемой жидкости и, следовательно, температуры стенок трубопровода будет возникать, как видно из (1), дополнительная погрешность измерения

расхода из-за температурных изменений L , h , L_0 и L_B .

С увеличением давления жидкости в трубопроводе увеличивается его диаметр и будет возникать, как видно из (1), вторая дополнительная погрешность измерения расхода из-за деформационных изменений L и L_B .

Отмеченные дополнительные погрешности ни разработчиками приборов, ни в нормативных метрологических документах и основополагающих публикациях [3] не рассматриваются. Рассмотрим и оценим эти погрешности.

Дополнительная температурная погрешность обусловлена тем, что в алгоритме (1) используются геометрические параметры L , h , L_0 и L_B , измеренные при температуре, не соответствующей температуре жидкости t . Если расходомер настроен и все его указанные выше геометрические параметры измерены при некоторой температуре t_K , то для устранения рассматриваемой погрешности правую часть (1) необходимо умножить на поправочный коэффициент

$$K_t = [1 + \alpha_{t-t_K}(t - t_K)]^3, \quad (2)$$

где α_{t-t_K} – коэффициент линейного расширения материала трубопровода в температурном интервале от t_K до t .

Коэффициент α_{t-t_K} изменяется с изменением температурного интервала нагрева. Из уравнения для железа $l_t = l_0(1 + 117 \cdot 10^{-7} t + 4,7 \cdot 10^{-9} t^2)$ найдем значения α_{t-t_K} [4], которые потребуются нам в дальнейшем:

1) для интервала (20...75) °С $\alpha_{75-20} = 1,215 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$;

2) для интервала (20...140) °С $\alpha_{140-20} = 1,245 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$;

3) для интервала (75...140) °С $\alpha_{140-75} = 1,271 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Особенность эксплуатации рассматриваемых расходомеров заключается в том, что, во-первых, при их настройке используются значения параметров L , h и L_0 , взятые из протокола первичного измерительного преобразователя, и которые соответствуют температуре $t_K =$

20 °С. Во-вторых, с разработкой детальной таблицы зависимости скорости распространения звука C от температуры и давления воды [5] появилась возможность при настройке расходомеров типа «ВЗЛЕТ» выставить с помощью поддержки T_D скорость звука, соответствующей фактической температуре воды t_C . Тем самым значение L_B корректируется по температуре t_C . В этих условиях поправочный коэффициент (2) запишется в виде

$$K_t = [1 + \alpha_{t-20}(t - t_K)] [1 + \alpha_{t-t_C}(t - t_C)]^2. \quad (3)$$

Следует отметить, что коррекция L_B по температуре t_C при выставлении скорости звука условна, т.к. с помощью T_D компенсируется действие всех нежелательных факторов, влияющих на вычисление C , и при том только при температуре t_C . К таким факторам относится, например, изменение толщины прокладок под электроакустическими преобразователями (ПЭА).

Большой диапазон изменения коэффициента K_t свойственен магистральным расходомерам ТЭЦ. Если они настроены, например, перед отопительным периодом при температуре воды 75 °С, то зимой при температуре воды 140 °С, как следует из (3),

$$K_t = [1 + 1,245 \cdot 10^{-5} (140 - 20)] [1 + 1,271 \cdot$$

$$10^{-5} (140 - 75)]^2 = 1,0032,$$

т.е. расходомеры занижают расход на 0,32 %. Если расходомеры настроены в отопительный период, то летом они завышают расход на 0,1 %, т.к.

$$K_t = [1 + 1,215 \cdot 10^{-5} (75 - 20)] [1 + 1,271 \cdot$$

$$10^{-5} (75 - 140)]^2 = 0,9990.$$

В тепловых сетях температурный интервал нагрева трубопроводов сравнительно невелик и для расчетов можно пользоваться одним значением коэффициента линейного расширения $\alpha = \alpha_{75-20} = 1,215 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Тогда выражение (3) можно переписать в виде

$$K_t = [1 + \alpha (t - 20)] [1 + \alpha (t - t_C)]^2. \quad (4)$$

Если расходомеры прямой и обратной сетевой воды (ПВ и ОБ) настроены, например, летом при температуре $t_{ПВ} = 69^\circ\text{C}$ и $t_{ОБ} = 54^\circ\text{C}$, то поправочные коэффициенты будут

$$K_{ПВ-Л} = 1 + 1,215 \cdot 10^{-5} (69 - 20) = 1,0006;$$

$$K_{ОБ-Л} = 1 + 1,215 \cdot 10^{-5} (54 - 20) = 1,0004.$$

А зимой при $t_{ПВ} = 81^\circ\text{C}$ поправочный коэффициент равен

$$K_{ПВ-З} = [1 + 1,215 \cdot 10^{-5} (81 - 20)] [1 + 1,215 \cdot 10^{-5} (81 - 69)]^2 = 1,0010.$$

Отметим непростую процедуру измерения на горячих трубопроводах с помощью рулеток, например, для уточнения L , L_0 и L_B , т.к. при этом в соответствии с техническими условиями на измерительные металлические рулетки необходимо вводить поправку на коэффициент линейного расширения материала измерительной ленты и соблюдать рабочее усилие ее натяжения.

Рассмотрим теперь вторую дополнительную деформационную погрешность, обусловленную тем, что в (1) используются геометрические параметры, измеренные при давлении, не соответствующем давлению жидкости p .

Сделаем упрощающие допущения и преобразования. Трубопровод считаем тонкостенным цилиндром с радиусом R без дна /6/. Поэтому учету подлежит только окружное напряжение его стенок $\sigma = pR / h$, не приводящее к деформации L_0 , а в уравнении (1) положим $L / \pi - 2h = L / \pi$.

На горизонтальных участках трубопровода пренебрегаем составляющей внутреннего давления, обусловленной весом транспортируемой жидкости. Для определенности также считаем, что ПЭА расходомера установлены по Z-схеме /2/, которая часто применяется при большом диаметре трубопровода. Тогда под действием внутреннего давления относительное удлинение L_B будет вдвое меньше относительного удлинения L .

Если L и L_B измерены при давлениях соответственно p_L и p_B , то для устранения второй рассматриваемой погрешности правую часть (1) необходимо умножить на поправочный коэффициент

$$K_p = \{ [1 + R(p - p_L) / hE] [1 + R(p - p_B) / 2hE] \}^2, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала трубопровода, для стали равный (190... 200) ГПа /6/.

Особенность эксплуатации расходомеров заключается в том, что используемые при их настройке протокольные значения параметров L и L_B получены на опорожненных трубопроводах ($p_L = p_B = 0$). В этих условиях значение поправочного коэффициента (5), например, при $p = 2,05$ МПа для магистрали «1000» ТЭЦ ($R = 499$ мм, $h = 13,8$ мм) $K_p = 1,0012$, а для магистрали «800» ($R = 402$ мм, $h = 8,9$ мм) $K_p = 1,0015$, т.е. расходомеры занижают расход соответственно на 0,12 % и 0,15 %.

С разработкой отмеченной выше настроечной таблицы появилась возможность при настройке расходомеров типа «ВЗЛЕТ» выставлять с помощью задержки T_d скорость звука, соответствующей фактическому давлению воды. Тем самым значение L_B в момент настройки соответствует давлению p_B . Если, например, расходомеры ТЭЦ настроены при $p_B = 0,9$ МПа, то при $p = 1,5$ МПа коэффициенты K_p для магистралей «1000» и «800», вычисленные по (5) при $p_L = 0$, должны быть соответственно 1,0007 и 1,0008.

Из (5) видно, что при неизменности модуля E рассматриваемая деформационная погрешность тем выше, чем больше окружное напряжение pR / h . Как показывает анализ, данная величина имеет высокое значение для трубопроводов ТЭЦ и тепловых сетей, имеющих диаметр более 600 мм.

Рассмотренные дополнительные погрешности ультразвуковых расходомеров, как видно, не велики: в тепловых сетях и на ТЭЦ эти погрешности по

температуре и по давлению воды по модулю обычно не превышают 0,3 % и 0,15 % соответственно. Но данные погрешности систематические, они могут быть по величине сопоставимы с основной погрешностью расходомеров высокой точности и поэтому заслуживают внимания.

Выводы

1. Приведен алгоритм расчета объемного расхода в ультразвуковых расходомерах, позволивший проанализировать их дополнительные погрешности от температурного расширения и деформации трубопроводов.

2. Получены формулы для расчета поправочных коэффициентов расходомеров, учитывающие особенности их эксплуатации в тепловых сетях и на источниках тепла.

3. В зависимости от величины перепадов температуры и давления транспортируемой жидкости рассмотренные погрешности расходомеров могут быть по величине сопоставимы с их основной погрешностью.

Список литературы

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник.- Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.

2. Расходомер-счетчик ультразвуковой многоканальный УРСВ «ВЗЛЕТ МР». Исполнения УРСВ-5хх. Руководство по эксплуатации В12.00-00.00-50 РЭ. В 2-х частях. - СПб, ЗАО «ВЗЛЕТ », 2005. – Ч.1 – 54 с.; Ч.II – 45 с.

3. Осипов Ю.Н., Колмогоров А.Н. Учет тепла – это почти просто. – СПб, ООО «Скарабей», 2001. – 112 с.

4. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1976. – 256 с.

5. Чернов Б.А. Повышение точности настройки ультразвуковых расходомеров «ВЗЛЕТ» // Вестник Алматинского института энергетики и связи. – 2010. - № 2 (9). – 28 с.

6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.– М.: Наука, 1986.– 512 с.