

УДК 681.121.83

О.Е. Середюк, В.В. Малисевич, Д.О. Середюк, Н.Н. Малисевич

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ПРИРОДНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСХОДОМЕРОВ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Предложено техническое решение измерения энергетической ценности природного газа на базе расходомеров переменного перепада давления, которые дополнительно снабжены термоанемометрическими преобразователями. Приведены функциональная схема и алгоритм работы предложенного вычислителя энергетической ценности природного газа. На базе теории неопределенности в измерениях рассмотрены метрологическая модель определения энергетической ценности природного газа и алгоритм вычисления неопределенности. Рассмотрены модели неопределенностей составляющих компонент при определении энергетической ценности природного газа: модель измерения расхода, модель определения теплоты сгорания, модель перевода измеренного расхода газа к стандартным условиям.

Ключевые слова: природный газ, энергетическая ценность, расход, теплота сгорания, сужающее устройство, термоанемометрический преобразователь, стандартная неопределенность.

Введение

Постановка проблемы. С учетом постоянно-го роста цены природного газа актуальным есть вопрос повышения точности его учета, что достигается применением новых подходов, средств и методик для измерения его объема и объемного расхода. Поэтому с учетом международного опыта и действительного в Украине национального стандарта [1] учет природного газа должен осуществляться информационно-измерительными системами, которые осуществляют его измерение не только в единицах объема или расхода, но и учитывают при этом его калорийность. Таким образом, становится возможным определение энергии газа. В таком случае при транспортировке природного газа целесообразным является употребление понятия энергетической ценности природного газа, которая в соответствии со стандартом [1] характеризует расход энергии газа за единицу времени, размерность которой составляет МДж/с.

Анализ последних достижений и публикаций. Нормативно узаконены методы и средства для измерения только расхода природного газа, метрологический анализ которых базируется на теории погрешностей [2]. Известны технические решения для измерения калорийности природного газа, метрологический анализ которых также базируется на теории погрешности [3].

Известны новые технические решения [4, 5] устройств для определения энергетической ценности природного газа. Однако до настоящего времени отсутствует оценка точности измерения энергетической ценности такими устройствами на базе теории неопределенности.

Формулирование цели статьи. Целью работы является исследование неопределенности измерения энергетической ценности природного газа вычислителями на базе расходомеров переменного перепада давления, дополнительно укомплектованными термоанемометрическими преобразователями.

Изложение основного материала

Вычислитель энергетической ценности природного газа на базе расходомера переменного перепада давления (рис. 1) содержит трубопровод 1 с рабочей средой 2, сужающее устройство 3, обводной трубопровод 4 с запорными вентилями 5 и 6, термоанемометрический преобразователь 7, преобразователь абсолютного давления рабочей среды 8, преобразователь температуры 9, преобразователь 10 перепада давления на сужающем устройстве, нормирующие преобразователи 11, 12 выходного сигнала с измерительных термопреобразователей и ПЭВМ 13.

Алгоритм работы расходомера переменного перепада давления при измерении энергетической ценности е природного газа базируется на использовании формулы:

$$e = q_v H K_C, \quad (1)$$

где q_v – объемный расход газа при рабочих условиях; H – теплота сгорания природного газа; K_C – коэффициент перевода измеренного расхода к стандартным условиям, который определяется как

$$K_C = \frac{p}{p_C} \cdot \frac{T_C}{T} \cdot \frac{1}{K}, \quad (2)$$

где p , T , p_C , T_C – давление и температура природного газа при рабочих и стандартных условиях соответственно; K – коэффициент сжимаемости природного газа.

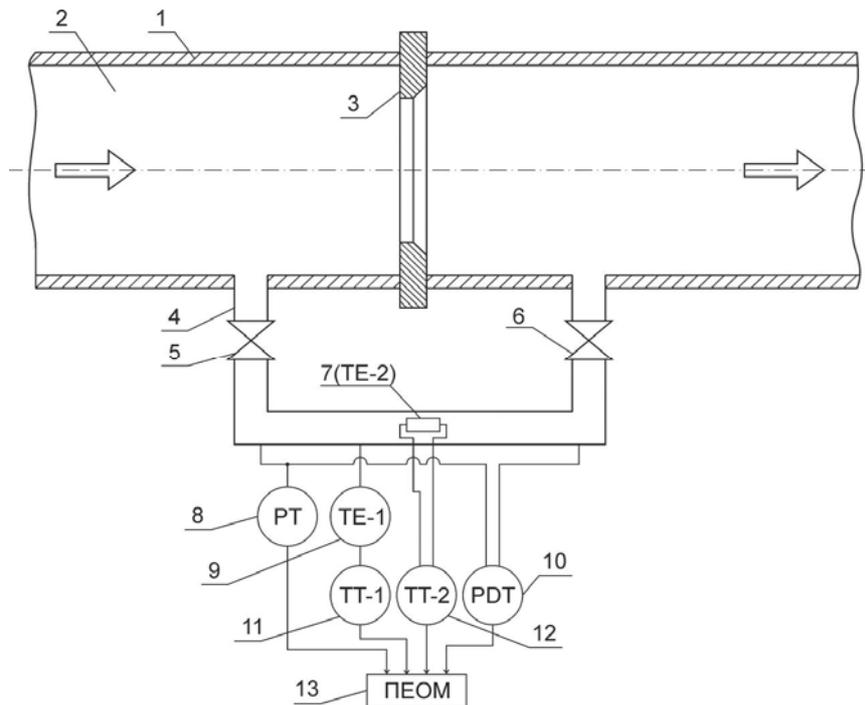


Рис. 1. Функциональная схема вычислителя энергетической ценности природного газа на базе расходомера переменного перепада давления с термоанемометром

Объемный расход природного газа равен [6]:

$$q_v = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K_B K_K}{\sqrt{1 - \beta^4}} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (3)$$

где K_B , K_K – градуировочный коэффициент расходомера и коэффициент коррекции результатов измерения расходомера при его функционировании на природном газе соответственно; $\beta = d / D$ – относительный диаметр отверстия сужающего устройства (d и D – диаметр отверстия сужающего устройства и внутренний диаметр измерительного трубопровода расходомера соответственно); Δp – перепад давления на сужающем устройстве; ρ – плотность природного газа при рабочих условиях.

Особенностью предложенного технического решения является тот факт, что градуировочный коэффициент расходомера переменного перепада давления определяется экспериментальным путем с использованием формулы [7]:

$$K_B = q_v \sqrt{1 - \beta^4} / \left(\frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \right). \quad (4)$$

Вычисление неопределенности измерения энергетической ценности природного газа осуществляется на базе формулы (1), что иллюстрируется на рис. 2.

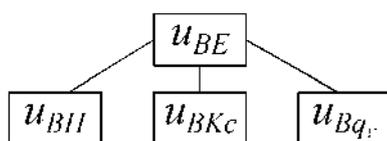


Рис. 2. Метрологическая модель определения энергетической ценности природного газа

Стандартная неопределенность вычисления энергетической ценности u_{BE} рассчитывается как

$$u_{BE} = \left[\left(\frac{\partial e}{\partial q_v} \cdot u_{Bqv} \right)^2 + \left(\frac{\partial e}{\partial H} \cdot u_{BH} \right)^2 + \left(\frac{\partial e}{\partial K_C} \cdot u_{BKc} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где $\frac{\partial e}{\partial q_v}$, $\frac{\partial e}{\partial H}$, $\frac{\partial e}{\partial K_C}$ – весовые коэффициенты при расчете неопределенности от параметров q_v , H , K_C ; u_{Bqv} , u_{BH} , u_{BKc} – стандартные неопределенности типа В при определении параметров q_v , H , K_C .

Расчет неопределенности измерения расхода природного газа u_{Bqv} осуществляется на базе формулы (3), что иллюстрируется на рис. 3.

При этом для расчета стандартной неопределенности u_{Bqv} используется формула, которая учитывает степень влияния каждого из параметров через частные производные:

$$u_{Bqv} = \left[\left(\frac{\partial q}{\partial K_B} \cdot u(K_B) \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial K_K} \cdot u(K_K) \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial d} \cdot u_B(d) \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial D} \cdot u_B(D) \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \Delta p} \cdot u_B(\Delta p) \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \rho} \cdot u(\rho) \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где $\frac{\partial q}{\partial K_B}$, $\frac{\partial q}{\partial K_K}$, $\frac{\partial q}{\partial d}$, $\frac{\partial q}{\partial D}$, $\frac{\partial q}{\partial \Delta p}$, $\frac{\partial q}{\partial \rho}$ – весовые

коэффициенты влияния при расчете неопределенности от параметров $K_B, K_K, d, D, \Delta p, \rho$ соответственно; $u(K_B), u(K_K), u_B(d), u_B(D), u_B(\Delta p), u_B(\rho)$ – стандартные неопределенности определения коэффициентов K_C, K_K и измерения параметров $d, D, \Delta p$ и ρ соответственно.

Количественный анализ всех составляющих неопределенности и коэффициентов чувствительности, который осуществлен в [6], показал, что значение стандартной неопределенности составляет $u_{Bqv} = 9,43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ при расходе газа $\bar{q}_V = 0,0353 \text{ м}^3/\text{с}$ для расходомера, который характеризуется параметрами $\bar{K}_B = 0,5679, \bar{K}_K = 0,9999; \bar{d} = 43,0 \text{ мм}; \bar{D} = 101,8 \text{ мм}; \Delta \bar{p} = 2,5 \text{ кПа}; \bar{\rho} = 2,827 \text{ кг/м}^3$.

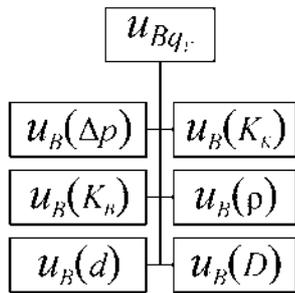


Рис. 3. Метрологическая модель определения расхода природного газа расходомером переменного перепада давления

Поскольку для определения теплоты сгорания природного газа используется термоанемометрический преобразователь, информативным параметром которого является коэффициент теплоотдачи α_C его чувствительного элемента, неопределенность измерения теплоты сгорания природного газа будет вычисляться согласно модели, приведенной на рис. 4.

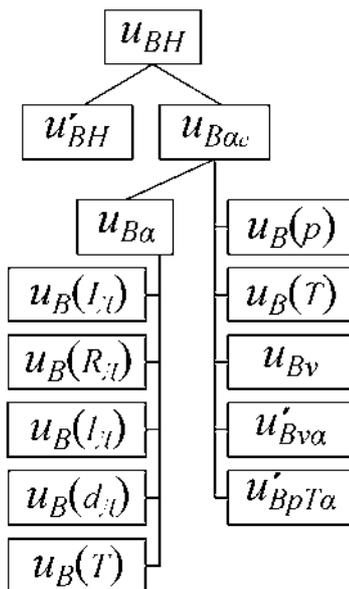


Рис. 4. Метрологическая модель определения теплоты сгорания природного газа

Основную стандартную неопределенность u_{BH} рассчитаем по формуле:

$$u_{BH} = \sqrt{u'_{BH}{}^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha_C} \cdot u_{B\alpha_C} \right)^2}, \quad (7)$$

где $\partial H / \partial \alpha_C$ – коэффициент чувствительности для расчета неопределенности параметра α_C ; u'_{BH} – стандартная неопределенность аппроксимации функциональной зависимости при определении теплоты сгорания, которая составляет $u'_{BH} = 48530,95 \text{ Дж/м}^3$ [8]; $u_{B\alpha_C}$ – стандартная неопределенность вычисления коэффициента теплоотдачи термоанемометра при стандартных условиях.

Стандартная неопределенность $u_{B\alpha_C}$ вычисляется по формуле:

$$u_{B\alpha_C} = \left[\left(\frac{\partial \alpha_C}{\partial \alpha} \cdot u_{B\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_C}{\partial p} \cdot u_B(p) \right)^2 + u'_{BpT\alpha}{}^2 + u'_{Bv\alpha}{}^2 + \left(\frac{\partial \alpha_C}{\partial T} \cdot u_B(T) \right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_C}{\partial v} \cdot u_{Bv} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial \alpha_C}{\partial \alpha}, \frac{\partial \alpha_C}{\partial p}, \frac{\partial \alpha_C}{\partial T}, \frac{\partial \alpha_C}{\partial v}$ – коэффициенты влияния параметров α, p (давление), T (температура), v (скорость потока) при расчете неопределенности коэффициента теплоотдачи α_C ; $u_{B\alpha}, u_{Bv}, u_B(p), u_B(T)$, – стандартные неопределенности определения коэффициента α , параметров v, p, T ; $u'_{BpT\alpha}, u'_{Bv\alpha}$ – неопределенности аппроксимации функциональной зависимости коэффициента α от давления, температуры и скорости потока.

Стандартная неопределенность $u_{B\alpha}$ рассчитывается на базе рис. 4 по аналогичной формуле с учетом конструктивных параметров термопреобразователя: I_d (ток в термоанемометре), R_d, d_d, l_d (сопротивление, диаметр и длина чувствительного элемента термопреобразователя).

Численное моделирование показало, что значения стандартных неопределенностей составляет $u_{B\alpha} = 6,809 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, u_{B\alpha_C} = 7,373 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, u_{BH} = 1,07 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$.

Стандартная неопределенность определения коэффициента K_C рассчитывается по формуле:

$$u_{BK_C} = \left[\left(\frac{\partial K_C}{\partial p} \cdot u_B(p) \right)^2 + \left(\frac{\partial K_C}{\partial T} \cdot u_B(T) \right)^2 + \left(\frac{\partial K_C}{\partial K} \cdot u_{BK} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

где $\frac{\partial K_C}{\partial p}$, $\frac{\partial K_C}{\partial T}$, $\frac{\partial K_C}{\partial K}$ – коефіцієнти чутливості по параметрах p , T , K .

Таким образом после проведения математических вычислений для неопределенностей $u_{Bqv}=9,43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, $u_{Bkc}=3,5 \cdot 10^{-3}$, $u_{Bh}=1,07 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$ получаем

$$u_e=7,4 \cdot 10^4 \text{ Дж/с.}$$

Принимая расчетное значение энергетической ценности $\bar{e}=2,36 \cdot 10^6 \text{ Дж/с}$, получим следующее числовое значение относительной стандартной неопределенности измерения энергетической ценности природного газа:

$$\delta u_e = \frac{u_e}{\bar{e}} \cdot 100 = 3,2 \%. \quad (10)$$

Выводы

Проведенные исследования неопределенности измерения энергетической ценности природного газа обосновывают возможность практического использования вычислителей энергетической ценности природного газа на базе расходомеров переменного перепада давления.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния компонентного состава природного газа на функционирование термоанемометрического преобразователя при разных параметрах природного газа с целью повышения точности измерения энергетической ценности.

Список литературы

1. Природный газ. Визначення енергії: ДСТУ ISO 15112:2009. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 48 с. – (Національний стандарт).

2. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звукувальних пристроїв. Ч. 5. Методика виконання вимірювань: ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держстандарт України, 2009. – 198 с.

3. Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. / С.А. Чеховський, Н.М. Піндус, О.Є. Середюк [та ін.]. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 534 с.

4. Пат. 98215 U Україна, МПК (2006.01) G01W1/11. Інтегральна автоматизована система вимірювання, приготування й ефективного розподілення природного газу за базовими значеннями його енергетичної цінності, вираженої вимірними об'ємними теплотою згорання та витратою газу за стандартних умов / Крук І.С., Химко М.П., Крук О.П. [та ін.]. – № u201410726; заявл. 01.10.14; опубл. 27.04.15; Бюл. № 8.

5. Середюк О.Є. Експериментальні дослідження методу термоанемометричного контролю енергетичної цінності природного газу / О.Є. Середюк, В.В. Малісевич, Н.М. Малісевич // Методи та прилади контролю якості. – 2015. – № 2 (35). – С. 64-71.

6. Serediuk O. Transfer wartosci wzorca w pomiarach przeplywu gazu ziemnego / Orest Serediuk, Vitaliy Malisevych, Zygmunt Warsza // Pomiar, automatyka, robotyka (Польща). – 2012. – № 12. – P. 173-180.

7. Середюк О.Є. Метрологічна модель еталона передавання одиниці витрати природного газу на базі витратоміра змінного перепаду тиску / О.Є. Середюк // Український метрологічний журнал. – 2007. – №4. – С. 44-49.

8. Малісевич В.В. Метрологічна модель напірного витратоміра при контролі енергетичної цінності природного газу / В.В. Малісевич, О.Є. Середюк, Д.О. Середюк // Український метрологічний журнал. – 2015. – № 1. – С. 58-63.

Поступила в редколлегию 29.03.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Древецкий, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно.

МЕТРОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

О.Є. Середюк, В.В. Малісевич, Д.О. Середюк, Н.М. Малісевич

Запропоновано технічне рішення вимірювання енергетичної цінності природного газу на базі витратомірів змінного перепаду тиску, які додатково обладнані термоанемометричними перетворювачами. Наведено функціональну схему і алгоритм роботи запропонованого обчислювача енергетичної цінності природного газу. Розроблено метрологічну модель визначення енергетичної цінності природного газу та алгоритм розрахунку невизначеності. Розглянуто моделі невизначеностей складових компонент при визначенні енергетичної цінності природного газу: модель вимірювання витрати, модель визначення теплоти згорання, модель зведення вимірної витрати газу до стандартних умов.

Ключові слова: природний газ, енергетична цінність, витрата, теплота згорання, звукувальний пристрій, термоанемометричний перетворювач, стандартна невизначеність.

THE METROLOGICAL MODEL OF MEASURING OF NATURAL GAS ENERGY VALUE WITH THE USING OF THE VARIABLE PRESSURE-DROP FLOWMETERS

O.E. Serediuk, V.V. Malisevych, D.O. Serediuk, N.M. Malisevych

The technical solution for measurement of the energy value of natural gas on the basis of variable pressure-drop flowmeters, which are additionally provided with a hot-wire transducers is proposed. The functional circuit and operation algorithm of the proposed measurer of the energy value of natural gas are given. The metrological model for determining the energy value of natural gas and an algorithm for calculating the uncertainty are discussed on the basis of the theory of uncertainty in the measurements. The models of the uncertainties of the constituent components in determining of the energy value of natural gas are analyzed: flow rate measurement model, the model for determining the calorific value, the model of the measured gas flow rate translation to standard conditions.

Keywords: natural gas, energy value, flow rate, calorific value, constriction device, hot-wire transducer, standard uncertainty.