

УДК 622.691.4.054

И.Р. Байков, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Республика Башкортостан, Россия); **С.В. Китаев**, д.т.н., доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Республика Башкортостан, Россия); **Г.И. Зубаилов**, к.т.н., главный инженер, ОАО «Гипрониюгаз» (Саратов, Россия)

Аналитическое моделирование погрешностей измерения расхода газа в системах газораспределения

В связи с изменившимися в последние годы условиями функционирования газораспределительных сетей, ростом срока их эксплуатации и, следовательно, износом оборудования проблема обеспечения эффективной, надежной и экологически безопасной работы сетей остается весьма актуальной. Одной из наиболее важных задач является обеспечение достоверного учета поставленного экологически чистого топлива.

В работе предложен способ аналитического моделирования погрешностей для достоверного учета расхода газа в газораспределительных сетях, позволяющий снизить нерациональные потери газа и повысить безопасность работы газораспределительных систем.

Ключевые слова: природный газ, газораспределительные сети, учет расхода газа, коэффициент расхода, измерительная диафрагма.

При распределении газа на объектах редуцирования газа устанавливаются замерные узлы для определения количества переданного газа потребителю. Для измерения расхода газа в газораспределительных сетях применяют счетчики различных типов. На ГРП, ГРПБ в качестве приборов учета расхода газа чаще всего применяют камерные счетчики и расходомеры с сужающими устройствами. На объектах с большими расходами газа, например ГРС, применяются в основном диафрагмы и турбинные счетчики. Функциональная зависимость процесса измерения расхода газа методом переменного перепада (диафрагмы) давления имеет следующий вид [1]:

$$Q_n = f\left\{\alpha\{\alpha_n[m(d,D)], K_{\alpha_w}, K_{\alpha_r}, K_{Re}\}, \xi\left[\frac{\Delta p}{p}, m(d,D), \chi(p,T)\right], k_t(T), d, p, \Delta p, \rho_n, \left(\sum_{j=1}^n N_{i(\text{мол})}\right), T, K, \left[p, T, \rho_n\left(\sum_{j=1}^n N_{i(\text{мол})}\right)\right]\right\}, \quad (1)$$

где α , α_n – соответственно коэффициент расхода и исходный коэффициент расхода сужающего устройства; d , m – соответственно диаметр и относительная площадь сужающего устройства; D – диаметр измерительной линии; K_{α_w} , K_{α_r} , K_{Re} – соответственно поправочный множитель к исходному коэффициенту расхода α_n на шероховатость измерительной линии, степень притупления входной кромки сужающего устройства

и число Рейнольдса; ξ , K , χ – соответственно коэффициенты расширения, сжимаемости и показатель адиабаты газа; p , T – давление и температура газа в условиях измерения; k_t – поправочный коэффициент на температурное расширение отверстия сужающего устройства; Δp – перепад давления газа на сужающем устройстве; ρ_n – плотность газа при стандартных физических условиях; $N_{i(\text{мол})}$ – молярное содержание компонента в газовой смеси. Данная функциональная зависимость содержит три категории параметров: определяемые в результате прямого однократного измерения, определяемые расчетным методом, определяемые экспериментально.

Ссылка для цитирования (for references):

Байков И.Р., Китаев С.В., Зубаилов Г.И. Аналитическое моделирование погрешностей измерения расхода газа в системах газораспределения // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015. – No 2. – С. 32–35.
 Baykov I.R., Kitayev S.V., Zubailov G.I. Analiticheskoe modelirovanie pogreshnostej izmerenija rashoda gaza v sistemah gazoraspredelenija [Analytical Simulation Of Errors In Measurement Of Gas Flow In Gas Distribution Systems]. *Territoriya «NEFTEGAZ» – Oil and gas Territory*, 2015, No 2. P. 32–35.

Точность измерения расхода газа выражается интервалом, в котором с установленной вероятностью находится суммарная погрешность измерения.

Результирующая относительная средняя квадратическая погрешность расхода газа σ_{Q_H} , измеряемого методом переменного перепада давления, оценивается исходя из следующих обобщенных выражений [1]:

$$\Delta \Sigma_{Q_H} = \frac{\partial Q_H}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial Q_H}{\partial \xi} \Delta \xi + \frac{\partial Q_H}{\partial k_t} \Delta k_t + \frac{\partial Q_H}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial Q_H}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial Q_H}{\partial (\Delta p)} \Delta \Delta p + \frac{\partial Q_H}{\partial \rho_H} \Delta \rho_H + \frac{\partial Q_H}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial Q_H}{\partial K} \Delta K \quad (2)$$

или

$$\sigma_{Q_H} = \left[\left(\sigma_{\alpha} \frac{\partial Q_H}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(\sigma_{\xi} \frac{\partial Q_H}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\sigma_{k_t} \frac{\partial Q_H}{\partial k_t} \right)^2 + \left(\sigma_d \frac{\partial Q_H}{\partial d} \right)^2 + \left(\sigma_{\Delta p} \frac{\partial Q_H}{\partial \Delta p} \right)^2 + \left(\sigma_{\rho_H} \frac{\partial Q_H}{\partial \rho_H} \right)^2 + \left(\sigma_T \frac{\partial Q_H}{\partial T} \right)^2 + \left(\sigma_K \frac{\partial Q_H}{\partial K} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Исходя из обобщенных зависимостей (2) и (3), средняя квадратическая относительная погрешность σ_{Q_H} измерения расхода определяется по выражению:

$$\sigma_{Q_H} = \left[\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{k_t}^2 + 4\sigma_d^2 \left(1 + \frac{m^2}{\alpha} \right)^2 + 4\sigma_{\Delta p}^2 \left(\frac{m^2}{\alpha} \right)^2 + \sigma_{\rho_H}^2 + 0,25 \left(\sigma_{\rho_H}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_T^2 + \sigma_K^2 \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

где σ_{α} , σ_{ξ} , σ_{k_t} – средние квадратические относительные составляющие погрешности соответствующих параметров.

Средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода при применении диафрагм вычисляется по выражению:

$$\sigma_{\alpha} = \left[\sigma_{m'}^2 + \sigma_{K_{ш}}^2 + \sigma_{K_n}^2 + \sigma_{\alpha_{Re}}^2 + 4\sigma_d^2 \left(1 + \frac{m^2}{\alpha} \right)^2 + 4\sigma_{\rho_H}^2 \left(\frac{m^2}{\alpha} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Значения $\sigma_{m'}$, $\sigma_{K_{ш}}$, σ_{K_n} и $\sigma_{\alpha_{Re}}$ для диафрагм определяются графически. При использовании графиков снижается точность расчета.

Целью работы являлось совершенствование графического способа расчета

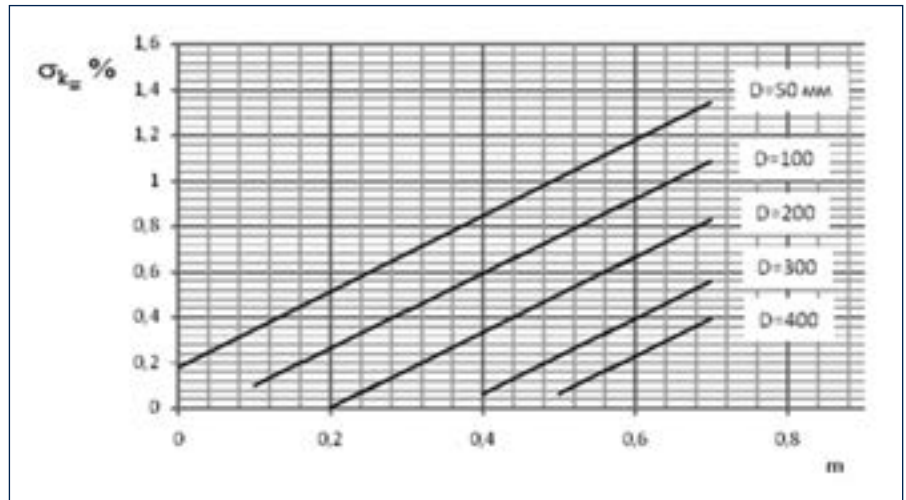


Рис. 1. Зависимость среднев квадратической погрешности σ_{Q_H} для диафрагм

Fig. 1. Dependence of mean square error σ_{Q_H} for diaphragms

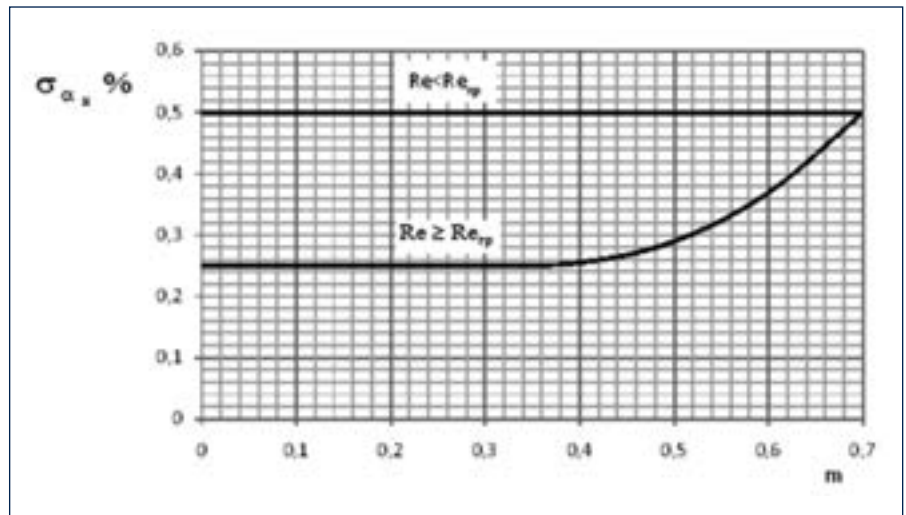


Рис. 2. Зависимость среднев квадратической погрешности σ_{α} для диафрагм

Fig. 2. Dependence of mean square error σ_{α} for diaphragms

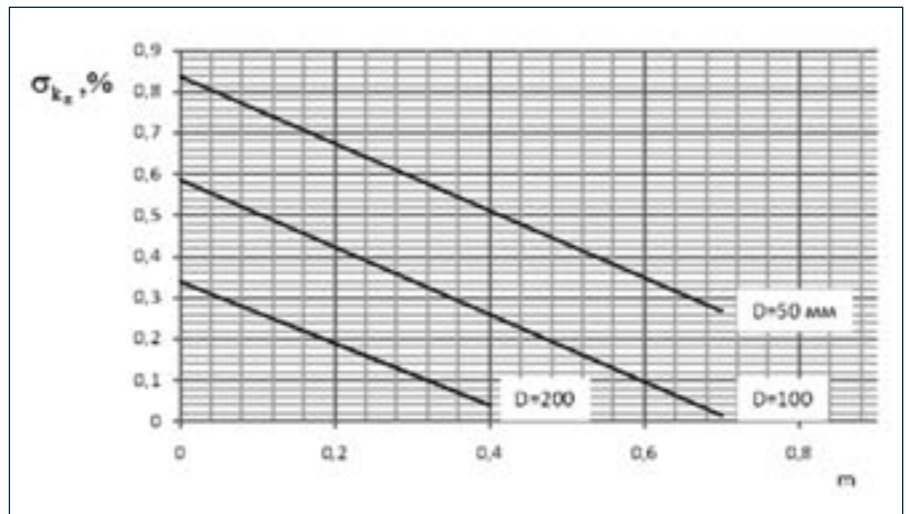


Рис. 3. Зависимость среднев квадратической погрешности σ_{k_n} для диафрагм

Fig. 3. Dependence of mean square error σ_{k_n} for diaphragms

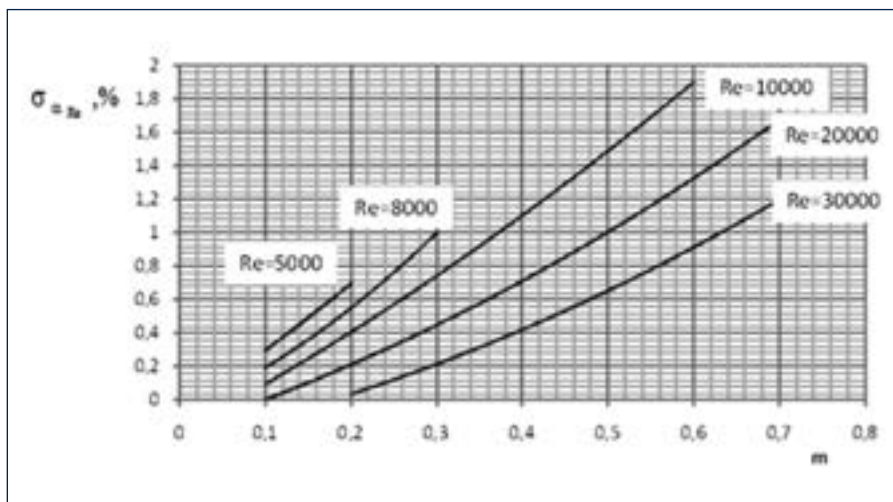


Рис. 4. Зависимость среднеквадратической погрешности σ_{air} для диафрагм
 Fig. 4. Dependence of mean square error σ_{air} for diaphragms

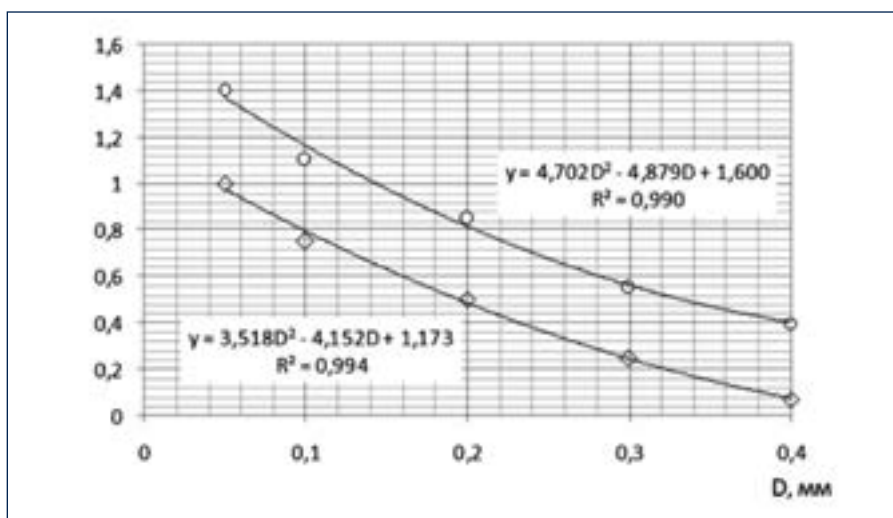


Рис. 5. Зависимости σ_{kw} от D и m_{min} и m_{max}
 Fig. 5. σ_{kw} dependences on D and m_{min} and m_{max}

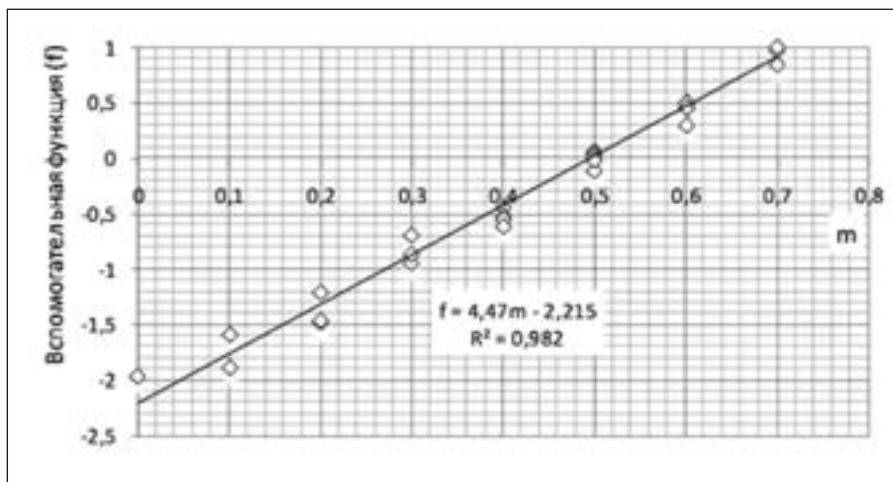


Рис. 6. Зависимость вспомогательной функции f от относительной площади сужающего устройства m
 Fig. 6. Dependence of f auxiliary function on m restriction orifice relative area

значений погрешности для диафрагм, заключающееся в использовании графиков.

Проведем аналитическое моделирование зависимостей погрешности для диафрагм (рис. 1–4). На рисунке 1 приведены зависимости σ_{air} в области $Re < Re_{гр}$ для всех значений m , параметр $\sigma_{air} = 0,5\%$. При $Re \geq Re_{гр}$ зависимость хорошо описывается функцией вида:

$$\sigma_{air} = 2E - 10m^5 + 3,03m^4 - 1,515m^3 - 5E - 10m^2 + 0,68m + 0,244. \quad (6)$$

Графики среднеквадратических погрешностей σ_{kw} , σ_{kn} и σ_{air} (рис. 2–4) представляют собой серию зависимостей от двух параметров: диаметра трубопровода измерительной линии D , или числа Рейнольдса Re , и относительной площади сужающего устройства m . Для моделирования зависимостей применим метод асимптотических координат [2, 3]. Суть метода заключается в следующем. Предположим, что имеется некоторая величина F , зависящая от двух параметров p и q . Пусть в условиях эксперимента задавались определенные значения параметра $q = q_1, q_2, \dots, q_n$ и определялась зависимость F от p при фиксированных q . В том случае, когда вид полученных кривых в плоскости (p, F) носит качественно сходный характер, часто удается подобрать специальные координаты, с помощью которых исследуемую сложную двумерную поверхность $F = F(p, q)$ удастся описать с помощью нескольких простых плоских кривых. При этом семейство кривых в плоскости (p, F) , соответствующих различным значениям q , «сжимается» в одну универсальную кривую. Поскольку вид этих координат устанавливается путем изучения качественного поведения кривых в некоторых характерных предельных случаях ($F = F(0, q)$ и $F = (\infty, q)$), то их можно называть асимптотическими координатами [2].

Построим аналитическую модель для характеристик, представленных на рисунке 2.

Пусть в плоскости (σ_{kw}, m) имеется серия кривых на интервале $[0, m]$. Построим первоначально зависимость

функции $\sigma_{кш}$ от второго параметра D для двух предельных значений параметра m: $m = m_{min}$, $m = m_{max}$. В результате будут получены функции: $\varphi(D, m_{min})$, $\psi(D, m_{max})$, показанные на рисунке 5 плоскими кривыми, которые описываются следующими эмпирическими зависимостями:

$$\varphi = 3,518D^2 - 4,12D - 1,173, \quad (7)$$

$$\psi = 4,702D^2 - 4,879D + 1,6. \quad (8)$$

Прямой проверкой легко убедиться, что если вместо функции $\sigma_{кш}$ ввести новую вспомогательную функцию f, определяемую по формуле:

$$f = \frac{Q_{кш} - \varphi}{\psi - \varphi}, \quad (9)$$

то видно, что функция обладает следующими свойствами: $f = 0$ при $m = m_{min}$ и $m = 1$ при $m = m_{max}$.

Для вспомогательной функции f можно использовать приближенную зависимость вида:

$$F = 4,47m - 2,215. \quad (10)$$

Коэффициенты полученной зависимости определялись методом наименьших квадратов по всему объему выборки. Таким образом, искомую сложную двумерную поверхность в трехмерном пространстве удалось описать всего тремя плоскими кривыми, изображенными на рисунках 5 и 6.

Подставляя уравнения (7), (8), (10) в уравнение (9) и преобразуя его, получим следующую зависимость $\sigma_{кш}$ от D и m:

$$Q_{кш} = (4,47m - 2,215)[(4,702D^2 - 4,879D + 1,6) - (3,518D^2 - 4,152D + 1,173)] + (3,518D^2 - 4,152D + 1,173). \quad (11)$$

Аналогично произведем моделирование характеристик для среднеквадратических погрешностей (рис. 3, 4), получим:

$$Q_{кн} = (2,333m + 0,043)[(20D^2 - 8D + 0,85) - (16,66D^2 - 7,5D + 1,183)] + (16,66D^2 - 7,5D + 1,183). \quad (12)$$

$$Q_{кРе} = (1,707m + 1,962)[(-0,64 \cdot \ln(10^{-4} \cdot Re) + 1,962) - (-0,21 \cdot \ln(10^{-4} \cdot Re) + 0,137)] + (-0,21 \cdot \ln(10^{-4} \cdot Re) + 0,137). \quad (13)$$

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что погрешность расчета по полученным моделям не превышает 5%. Полученные аналитические зависимости могут быть легко интегрированы в автоматизированные комплексы систем учета расхода газа.

Литература:

1. Динков В.А. Измерение и учет расхода газа: Справочное пособие / В.А. Динков, З.Т. Галиуллин, А.П. Подкопаев, В.С. Кондратьев. – М.: Недра, 1979. – 304 с.
2. Байков И.Р. Моделирование технологических процессов трубопроводного транспорта нефти и газа / И.Р. Байков, Т.Г. Жданова, Э.А. Гареев. – УГНТУ, 1994. – 128 с.
3. Байков И.Р. Эксплуатация энергомеханического оборудования в современных условиях / И.Р. Байков, С.В. Китаев, С.Р. Талхин // Нефтегазовое дело. – 2007. – 2007. – № 1. – Т. 5. – С. 159–162.

I.R. Baykov, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia), Doctor of Engineering, Professor, Head of Industrial Heat Engineering Department;
S.V. Kitayev, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia), Doctor of Engineering, Assistant Professor of Oil and Gas Transportation and Storage Department;
G.I. Zubailov, Giproniigaz JSC (Saratov, Russia), PhD in Engineering, Chief Engineer

Analytical Simulation Of Errors In Measurement Of Gas Flow In Gas Distribution Systems

Due to the functioning conditions of gas distribution networks that have changed in recent years increase of service life and, as consequence, wear of equipment, the problem of ensuring efficient, reliable and environmentally safe operation of networks remains quite relevant. One of the most important target is providing of accurate metering of supplied clean fuel.

The paper provides a method for analytical simulation of errors for accurate metering of gas consumption in gas distribution networks allowing reduction of irrational losses of gas and enhancement of operational safety of gas distribution systems.

Keywords: natural gas, gas distribution networks, gas consumption metering, flow ratio, measuring orifice.

References:

1. Dinkov V.A., Galiullin Z.T., Podkopayev A.P., Kondratyev V.S. *Izmerenie i uchet raskhoda gaza* [Measurement and metering of gas consumption]: Reference Book. Moscow, Nedra, 1979. 304 p.
2. Baykov I.R., Zhdanova T.G., Gareyev E.A. *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov truboprovodnogo transporta nefiti i gaza* [Simulation of the oil and gas pipeline transportation processes]. Ufa State Oil Technical University, 1994. 128 p.
3. Baykov I.R., Kitayev S.V., Talkhin S.R. *Ekspluatatsiya energomekhanicheskogo oborudovaniya v sovremennykh usloviyakh* [Power and mechanical equipment operation in the current context]. *Neftgazovoe delo = Oil and Gas Engineering*, 2007, No. 1, Vol. 5. Pp. 159–162. Baykov I.R. *Ekspluatatsiya energomekhanicheskogo oborudovaniya v sovremennykh usloviyakh* (Power and mechanical equipment operation in the current context) / I.R. Baykov, S.V. Kitayev, S.R. Talkhin // *Oil and Gas Engineering*. – 2007. – 2007. – No. 1. – Vol. 5. – P. 159–162.