

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЖОУЛЯ-ТОМСОНА В ЗАДАЧАХ УЧЕТА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Пистун Е.П., Матико Ф.Д., Масняк О.Я.

Национальный университет "Львовская политехника",
Институт энергоаудита и учета энергоносителей

Течение газа через сужающие устройства сопровождается изменением параметров состояния газа (давления, температуры, плотности) вдоль измерительного участка трубопровода. Изменение температуры газа в горловине сужающего устройства и по длине трубопровода после него приводит к тому, что сужающее устройство расходомера и его измерительный преобразователь температуры, размещенный на расстоянии 5 ... 15 D20 [1] после сужающего устройства, находятся в зоне разных температур газового потока. Это приводит к появлению дополнительной составляющей погрешности измерения расхода газа.

В системах учета на базе метода переменного перепада давления нет возможности измерять температуру газа в сечении сужающего устройства без искажения кинематической структуры потока перед ним. Поэтому разницу температур газа перед сужающим устройством и в месте размещения преобразователя определяют [1] расчетным путем, применяя интегральное уравнение дроссельного эффекта (эффекта Джоуля-Томсона). Для реализации этого уравнения необходимо иметь значение коэффициента дросселирования (коэффициента Джоуля-Томсона), который является функцией давления, температуры и состава природного газа.

Уравнение изменения температуры в процессе дросселирования газа имеет вид [4]

$$dT = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} dp = D_h dp. \quad (1)$$

Как видно из (1), для определения коэффициента дросселирования D_h необходимо вычислять изобарную теплоемкость газа c_p , параметры уравнения состояния газа (удельный объем v) и некоторые производные от уравнения состояния.

Уравнение состояния газа может иметь разный вид в зависимости от того, какие независимые параметры состояния оно связывает. Для описания состояния природного газа действующие нормативные

документы (в частности [2]) предлагают уравнение состояния вида $Z = f(\rho, T)$.

В частности для расчета коэффициента дросселирования D_h на основании уравнения состояния ВНИЦ СМВ [2], которое имеет вид $Z = f(\rho, T)$, формулу (1) необходимо преобразовать к виду [5]:

$$D_h = \left[T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho - \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right] / \left[c_p \rho \left(Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right) \right] \quad (2)$$

На основании формулы (2) и уравнения состояния ВНИЦ СМВ [2], авторами получено следующее уравнение для расчета коэффициента дросселирования

$$D_h = \frac{10^3 (A_2 - A_1)}{c_p \rho (1 + A_1)}, \quad (3)$$

где D_h – коэффициент дросселирования, К/мпа;

c_p – удельная изобарная теплоемкость газа, кДж/(кг*К);

ρ – плотность газа в рабочих условиях, кг/м³;

A_1, A_2 – безразмерные комплексы, которые вычисляют согласно ГОСТ 30319.3-96 [2].

В международном стандарте ISO 20765-1 [3] представлено фундаментальное уравнение, которое определяет связь свободной энергии Гельмгольца с приведенными плотностью, температурой и компонентным составом газа. Уравнения для определения термодинамических свойств, в том числе и для определения коэффициента Джоуля-Томсона, получены в [3] на основании уравнений частных производных от свободной энергии Гельмгольца. Метод предложенный в ISO 20765-1 [3] предназначен для расчета свойств смесей в газообразном состоянии и имеет широкую область применения ($p \leq 30 \text{ МПа}$, $250 \text{ К} \leq T \leq 350 \text{ К}$).

С точки зрения применения в вычислителях расхода оба указанные методы: метод на основе формулы (3) и уравнения состояния ВНИЦ СМВ и метод ISO 20765-1 имеют ряд недостатков. Оба метода реализованы на базе уравнений с взаимозависимыми параметрами (Z, ρ), (ρ, p), которые могут быть вычислены только итерационным путем, что увеличивает вычислительную нагрузку процессоров в вычислителях. Методы требуют введения данных о полном компонентном составе газа, что требует коррекции программного обеспечения современных вычислителей, подавляющее большинство которых ориентировано на применении упрощенных данных о составе газа. Поэтому актуальной является разработка упрощенной методики для расчета коэффициента Джоуля-Томсона по трем параметрам

состава природного газа – плотность при стандартных условиях, содержание азота и углекислого газа.

Авторами разработана методика для расчета коэффициента Джоуля-Томсона в диапазоне абсолютного давления от 0,1 МПа до 15 МПа и температуры от 250 К до 350 К для указанных условий применения. Эти диапазоны изменения давления и температуры характерны для задач учета природного газа.

Зависимости коэффициента Джоуля-Томсона от давления при фиксированных значениях температуры для этой практически важной области представлены графически на рис.1. Зависимости построены по значениям ISO 20765-1 для природного газа следующего состава: плотность при стандартных условиях – 0,701 кг/м³, содержание азота – 0,997 %, содержание углекислого газа – 0,612 %.

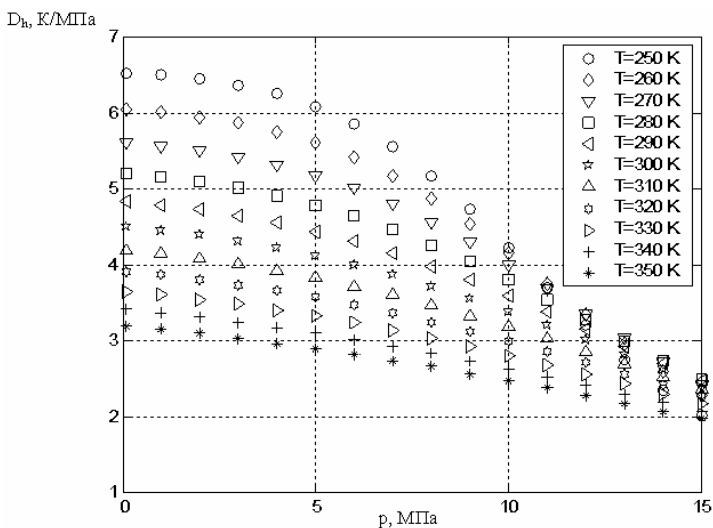


Рис.2. Зависимость коэффициента дроселирования от давления и температуры.

Как видно из этого рисунка, коэффициент Джоуля-Томсона D_h принимает максимальные значения при низких значениях давления и температуры. Чувствительность коэффициента D_h к изменению температуры растет с уменьшением давления. Напротив, при высоком давлении ($p > 10$ МПа) существенно уменьшаются как значение коэффициента дроселирования так и его чувствительность к изменению температуры. Если выделить область значений D_h при

давлении газа до 5 МПа, а это область применения подавляющего большинства расходомеров переменного перепада давления, то видно, что здесь значения коэффициента D_h близки к максимальным, а следовательно учет процесса дросселирования именно в этом диапазоне изменения давления является наиболее важным.

Методика построена на основании принципа соответственных состояний. Основное уравнение методики описывает зависимость коэффициента Джоуля-Томсона от приведенных температуры и плотности. Коэффициенты основного уравнения получены в результате обработки массивов значений коэффициента Джоуля-Томсона, полученных по ISO 20765-1 [3] для диапазона изменения давления от 0,1 МПа до 15,0 МПа и температуры от 250 К до 350 К.

Согласно разработанной методике расчет коэффициента Джоуля-Томсона выполняют по формуле:

$$D_h = \sum_{i=1}^6 \left(\left[\sum_{j=1}^5 a_{ij} \tau^{5-j} \right] \omega^{6-i} \right), \quad (4)$$

где τ , ω - приведенные температура и плотность;
 a_{ij} - коэффициенты уравнения (см. таблицу 1).

Таблица 1

a_{ij}	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$
$i = 1$	-67.802	446.76	-1102.4	1209.1	-498.87
$i = 2$	143.8	-965.14	2433.4	-2736.8	1162.1
$i = 3$	-113.04	775.41	-2001.9	2307.9	-1003.15
$i = 4$	22.27	-158.22	420	-490.79	209.56
$i = 5$	14.178	-95.204	241.87	-276.03	118.25
$i = 6$	2.7783	-20.996	62.704	-90.622	56.442

Значения приведенной температуры t и плотности w вычисляют по известным формулам:

$$\tau = T / T_{ПК}, \quad \omega = \rho / \rho_{ПК}, \quad (5)$$

где T - термодинамическая температура природного газа, К;

ρ - плотность природного газа в рабочих условиях, кг/м³.

Плотность природного газа в рабочих условиях находят по известной зависимости

$$\rho = \frac{P \cdot T_{СТ}}{P_{СТ} \cdot T \cdot K} \rho_{СТ}, \quad (6)$$

где p - абсолютное давление природного газа, МПа

K - коэффициент сжимаемости, который может быть вычислен по упрощенным данным о составе газа и давлении газа до 12 МПа по методам NX19 мод., GERG91 мод. [2], СД 7-2005 [6], а при давлении более 12 МПа – только по методике СД 7-2005 [6];

P_{CT} , T_{CT} - давление и температура стандартных условий.

Псевдокритическую температуру газа рассчитывают по формуле ГОСТ 30319.1-96 [2]

$$T_{ПК} = 88,25(0,9915 + 1,759p_{CT} - x_y - 1,681x_a), \quad (7)$$

а псевдокритическую плотность – по упрощенной формуле, предложенной авторами в [7]

$$\rho_{ПК} = 163,5 \cdot (p_{CT} / 0,6682)^{0,6} + 62,62x_a + 163,359x_y. \quad (8)$$

В формулах (6) - (8) ρ_{CT} - плотность природного газа при стандартных условиях, кг/м³; x_a - молярная доля азота; x_y - молярная доля углекислого газа.

Проверка разработанной методики выполнена относительно расчетных значений коэффициента Джоуля-Томсона, полученных по методу ISO 20765-1 [3] для природных газов, состав которых отвечает сертификатам качества лабораторий ДК «Укртрансгаз» из разных регионов, и для тестовых смесей с содержанием азота и углекислого газа до 5% каждого. Относительное отклонение значений методики от значений ISO 20765-1 не превышает 1,5% для указанных природных газов. Детальное тестирование методики показывает, что для природных газов с плотностью при стандартных условиях до 0,75 кг/м³ и содержанием азота и углекислого газа до 5 % каждого, относительное отклонение значений методики от значений ISO 20765-1 не превышает 3,0% для давления от 0,1 МПа до 15,0 МПа и температуре от 250 К до 350 К.

Методика предлагается для применения в вычислителях расхода природного газа и для исследования процессов дросселирования при течении природного газа через сужающие устройства, регуляторы давления (редуктора) различных конструкций.

Литература

1. ГОСТ 8.586.5-2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений.

2. ГОСТ 30319.0:3-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. - М.: Изд-во стандартов, 1996.

3. ISO 20765-1:2005. Natural gas – Calculation of thermodynamic properties. Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications.

4. Поршаков Б.П. и др. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 349 с.

5. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. — М.: Энергия, 1977. – 180 с.

6. СД 7-2005. Газ природный. Методика расчета коэффициента сжимаемости в диапазоне давления 12 ... 25 МПа // Е. Пистун, Ф. Матико. – Минск, 2005.

7. ДССДД 8-2006. Газ природный. Методика розрахункового визначення показника адіабати в інтервалах тиску від 0.1 до 25 МПа і температури від 250 до 320 К // Є. Пістун, Ф. Матіко. Введ. 01.09.2006. – Київ: Держстандарт України, 2006. – 16 с.

Сведения об авторах:

Пистун Евгений Павлович – проф., д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации тепловых и химических процессов Национального университета «Львовская политехника», Председатель правления ЗАО «Институт энергоаудита и учета энергоносителей».
epistun@polynet.lviv.ua, epistun@ieoe.com.ua

Матико Федор Дмитриевич – к.т.н., доцент этой же кафедры
mfd@polynet.lviv.ua

Масняк Олег Ярославович – научный сотрудник ЗАО «Институт энергоаудита и учета энергоносителей».