УДК 665.276

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ГАЗОВОГО ПОТОКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН (ЧАСТЬ 2)

DETERMINATION OF THE GAS STREAM FLOW RATE WHEN CONDUCTING HYDRODYNAMIC STUDIES OF WELLS (PART 2)

М. С. Рогалев, Н. В. Саранчин, В. Н. Маслов, А. Б. Дерендяев
M. S. Rogalev, N. V. Saranchin, V. N. Maslov, A. B. Derendyaev

ООО «ТюменНИИгипрогаз», г. Тюмень

Ключевые слова: ***газовые скважины; газоконденсатные скважины; гидродинамические исследования скважин; расчет расхода газа, критическое истечение***
Key words: ***gas wells; gas condensate wells; hydrodynamic studies of wells; calculation of gas consumption; critical flow***

Предложения по расчету коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения.

Для постановки задачи, предложения по решению которой будут сформулированы в настоящей работе, рассмотрим описание основных положений, характеризующих режим прохождения газовым потоком диафрагмы диафрагменного измерителя критического течения (ДИКТ).

На рисунке 1 представлена схематичная конструкция ДИКТа и описание режима прохождения газового потока через него на основании работ E. L. Rawlins и M. A. Schelhardt [1], Д. Л. Катца [2], А. И. Гриценко, З. С. Алиева [3], где *I* — прямолинейный участок трубопровода перед сужающим устройством (диафрагмой) или корпус; *II* — накидная гайка для крепления сужающего устройства к корпусу; *III* — сужающее устройство — диафрагма; *1* — сечение в прямолинейном участке трубопровода; *0* — сечение, характеризующее режим движения газового потока в месте его входа в отверстие диафрагмы; *2* — сечение наибольшего сужения струи газового потока.

При проведении газодинамических исследований скважин газовым потоком является углеводородный газ. Поток газа проходит диафрагму ДИКТа за счет работы, совершаемой силами давления газового потока (p_1) до нее.

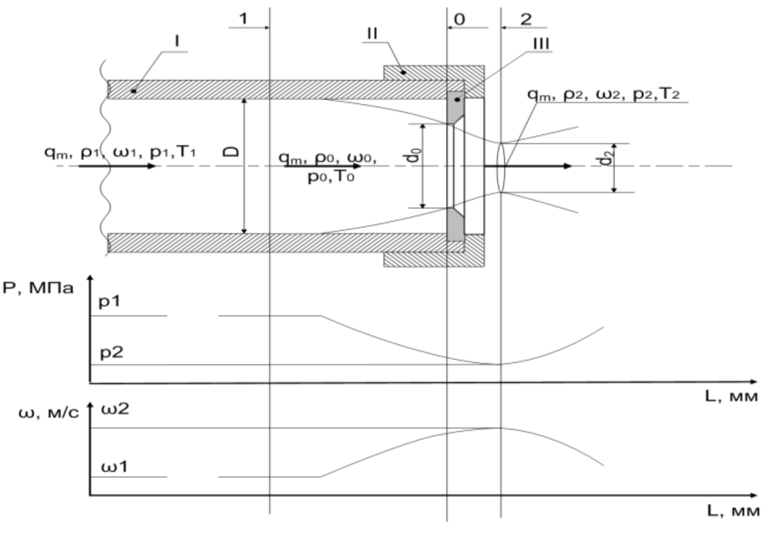

Рис. 1. ***Графический вид типовой конструкции ДИКТа и описание режима прохождения газового потока через него при критическом течении***

Критический режим течения газового потока через диафрагму, графически представленный на рисунке 1, наступает при достижении критического перепада давлений, который описывается следующим отношением:

$$y_{KP} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP} < 0,5\,, \quad (1)$$

где y_{KP} — критическое отношение давлений потока среды; p_2 — давление потока среды в сечении *2*, p_1 — давление потока среды в сечении *1* (см. рис. 1).

Критический режим течения газового потока через диафрагму соответствует поперечному сечению *2*, в режиме критического течения, через которое значение скорости его движения достигает локальной скорости звука, и наблюдается максимальное сужение его струи, описываемое коэффициентом ее сжатия (ε) относительно диаметра отверстия диафрагмы (d_0) в сечении *0* (см. рис. 1) [4].

При достижении критического перепада давлений (1) расход газового потока определяется термобарическими параметрами среды до диафрагмы (сечение *1*, рис. 1) [3].

Значения температуры (T_1) и давления (p_1) газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, в поперечном сечении *1* определяются при проведении прямых измерений [3].

Значения температуры (T_2) и давления (p_2) в месте максимального сужения струи газового потока (сечение 2, рис. 1), при прохождении диафрагмы в режиме критического течения, определяются из следующих выражений [4]:

$$y_{KP} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2}{k+1}\,, \quad (3)$$

где k — показатель изоэнтропии (адиабаты) газового потока; T_1 — температура потока среды в сечении *1*, T_2 — температура потока среды в сечении *2* (см. рис. 1).

В основе каждого выводимого выражения для расчета расхода газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, находится выражение неразрывности потока среды, общий вид которого может быть записан следующим образом:

$$G = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega_1 \cdot \rho_1 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \omega_0 \cdot \rho_0 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \omega_2 \cdot \rho_2 = \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \omega_2 \cdot \rho_2 = const \quad (4)$$

где G — массовый расход потока среды; ω_1, ω_0, ω_2 — средняя скорость потока среды в соответствующих сечениях; ρ_1, ρ_0, ρ_2 — плотность потока среды в соответствующих сечениях; D, d_0, d_2 — диаметры поперечного сечения потока среды в соответствующих сечениях; ε — коэффициент сжатия поперечного сечения потока среды в сечении *2* (см. рис. 1).

Анализируя вид выражения неразрывности потока среды (4), можно качественно оценить влияние на достоверность получаемого результата расчета расхода газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, корректности определения входящих в него величин.

В работах [5], [6] представлен ряд выражений для расчета плотности газового потока при критическом прохождении диафрагмы (сечение 2, рис. 1) ($\omega_2 \cdot \rho_2$) (массовый расход среды на единицу площади) в месте максимального сжатия струи, которые были использованы для разработки стандарта ISO 9300:2005 [7] при различных компонентных составах среды.

Значения диаметра отверстия диафрагмы (d_0) и внутреннего диаметра прямолинейной части трубопровода перед ней (D) определяются с высокой степенью достоверности при проведении прямых измерений.

В научно-технической литературе представлен ряд работ [4], [8], [9] с различными предложениями для расчета коэффициента сжатия струи. Все представленные выражения в данных работах выведены для случаев, когда среда является несжимаемой или слабосжимаемой. Также при выводе расчетных выражений большинством авторов использовались следующие допущения:

- в качестве отверстия, через которое происходит истечение среды, принимается щель определенного размера;
- в качестве объекта, из которого происходит истечение среды, принимается сосуд больших размеров, боковые стенки которого не оказывают влияние на формирование струи.

Некоторые авторы предлагают принимать значение коэффициента сжатия струи газового потока при критическом истечении в виде константы. Ниже приведены некоторые предложения:

- Бернулли $$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,; \qquad (5)$$
- Байера $$\varepsilon = \frac{\pi^2}{4} = 0{,}617\,; \qquad (6)$$
- Рэлея и Кетера $$\varepsilon = \frac{\pi}{\pi + 2} = 0{,}611\,. \qquad (7)$$

Н. Е. Жуковским [9] решена задача истечения слабосжимаемой среды из сосуда, имеющего конечные размеры. Полученное им решение для коэффициента сжатия струи ε зависит от соотношения размеров сосуда и размера отверстия в нем (β). Ниже приведено авторское расчетное выражение Н. Е. Жуковского:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\pi + 2 \cdot 2\theta / tg 2\theta}\,, \qquad (8)$$

где параметр θ определяется из выражения

$$tg\theta \left(1 + \frac{2}{\pi}\frac{2\theta}{tg 2\theta}\right) = \beta^2\,, \qquad (9)$$

где β — относительный диаметр отверстия диафрагмы, равный отношению диаметра отверстия диафрагмы к диаметру резервуара, из которого происходит истечение газа или жидкости.

Формула Н. Е. Жуковского выведена для случая истечения жидкости из плоской щели. Найденные по ней значения коэффициента сжатия струи (при $\beta < 0{,}6$) хорошо согласуются с опытными данными, полученными для круглых отверстий [4].

В дальнейшем формулы Н. Е. Жуковского (8, 9) А. Д. Альтшуль [4] предложил заменить более простым алгебраическим выражением

$$\varepsilon = 0{,}57 + \frac{0{,}043}{1{,}1 - \beta^2}\,. \qquad (10)$$

Представленные на рисунке 2 значения, рассчитанные с использованием формулы (10), с приемлемой точностью описывают опытные данные различных авторов по измерениям значений коэффициента сжатия струи для потока несжимаемой среды.

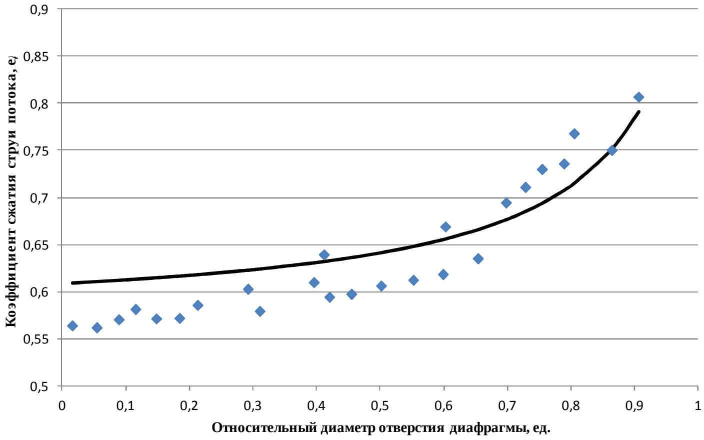

Рис. 2. ***Сопоставление формулы (10) с опытными данными различных авторов на основании информации, представленной в работе [4]***

В работе С. А. Чаплыгина [10] приведено точное аналитическое решение для определения коэффициента сжатия струи при истечении газа через щель из сосуда большого размера, когда влиянием боковых стенок сосуда можно пренебречь, а также предложено приближенное алгебраическое решение для практического использования, если газовой средой является воздух. На основании информации по свойствам воздуха С. А. Чаплыгиным значение показателя адиабаты для воздуха принято равным 1,4. Конечный вид данного выражения может быть представлен следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\pi + 2 - 5s_0 + 2s_0^2}\,, \qquad (11)$$

где s_0 — параметр, зависящий от перепада давления воздуха в сосуде и вне его.

Значения коэффициента сжатия струи, вычисленные для различных перепадов давления по формуле (11) по данным работы [10], приведены в таблице.

Значения коэффициента сжатия струи, вычисленные для различных перепадов давления

$\frac{p_1}{p_2}$	1,48	1,56	1,65	1,79	1,89
s_0	0,117	0,137	0,154	0,182	0,200
ε	0,68	0,70	0,71	0,73	0,74

Данные таблицы показывают, что рассчитанные значения коэффициента сжатия струи воздушного потока по выражениям (5)–(7) дают отклонение до 21 % от значения коэффициента сжатия струи, рассчитанного для воздуха при его критическом истечении

$$\left(\left(\frac{p_1}{p_2}\right)_{KP}^{воздуха} = 1{,}89\,,\ \varepsilon_{KP}^{воздуха} \approx 0{,}74 \right).$$

Анализ и обзор предлагаемых для практического использования расчетных формул при вычислении значения коэффициента сжатия струи газового потока показал, что однозначности в решении данного вопроса нет. Значения, получаемые по предлагаемым различными авторами выражениям, не совпадают. Не представлено решение, которое напрямую относится к определению коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического истечения, когда средой является углеводородная смесь. Также большинством работ не учитывается влияние на коэффициент сжатия струи боковых стенок сосуда, из которого истекает среда (в данном случае — ограничивающих стенок прямолинейной части трубопровода перед диафрагмой). Большинством авторов выражение выводится для случая истечения среды через плоскую щель, тогда как истечение газа через диафрагму имеет осесимметричную трехмерную форму.

Авторами проведена работа по сопоставлению получаемых расчетных значений расхода потока углеводородной газовой смеси, истекающей из прямолинейного цилиндрического участка трубопровода через диафрагму в режиме критического течения, при расчете ε по выражениям (5)–(8), (10) и (11) со значениями расхода, определенными для данной системы с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения. Расчет расхода потока углеводородной газовой смеси при критическом ее истечении через диафрагму осуществлялся по выражению, выведенному авторами и представленному в работе [часть 1]

$$Q_{CT} = \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \frac{z_{CT}}{z_1} \cdot \frac{p_1}{p_{CT}} \cdot \sqrt{\frac{R_M}{T_1}} \cdot T_{CT} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{1+z_1 \cdot (k-1)}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{2}{k+1} \cdot \frac{1+z_2 \cdot (k-1)}{1+z_1 \cdot (k-1)}\right)}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{2}{k-1}} - \beta^4 \cdot \varepsilon^2}}, \qquad (12)$$

где Q_{CT} — объемный расход потока углеводородной газовой смеси, приведенный к стандартным условиям; z_1, z_2 — фактор сжимаемости углеводородной газовой смеси в сечениях *1* и *2* рисунка 1; z_{CT} — фактор сжимаемости углеводородной газовой смеси при стандартных условиях; T_{CT}, p_{CT} — температура и давление, соответствующие стандартным условиям.

Теплофизические свойства потока углеводородной газовой смеси для выражения (12) рассчитывались по ГОСТ 30319–96 [11]. Значение диаметра отверстия диафрагмы при рабочей температуре перед ней рассчитывалось на основании ГОСТ 8.586–2005 [12]. Данные по отклонениям значений расхода потока углеводородной газовой смеси при ее критическом истечении через диафрагму, получаемые с использованием формулы (12) при расчете ε по выражениям (5)–(8), (10) и (11), от значений расхода, определенного с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения, представлены на рисунке 3.

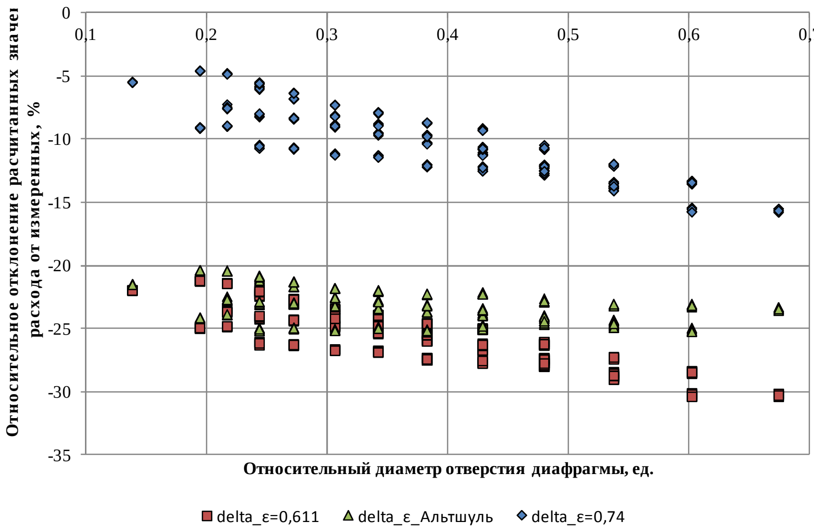

Рис. 3. ***Данные по отклонениям получаемых значений расхода потока углеводородной газовой смеси при критическом истечении через диафрагму при расчете*** ε ***по выражениям (7), (10) и (11) от значений расхода, определенного с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения***

Информация, представленная на рисунке 3, показывает, что использование расчетных выражений (5–8), (10) и (11) для определения ε, которые предлагаются в научно-технической литературе, приводит к значительным отклонениям при расчете расхода потока углеводородной газовой смеси, движущегося в режиме критического течения.

Данные рисунка 3 и общий вид выражения неразрывности потока среды (4) показывают, что достоверность определения коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, напрямую влияет на точность расчета расхода среды.

Для понимания причин отклонения получаемых значений коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, при расчете по формулам (5–8), (10) и (11) от требуемых значений авторами получено выражение для его определения на основании общего вида уравнения неразрывности потока (4) и уравнения состояния для реальных газов. Данное выражение примет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \frac{z_2}{z_1}. \qquad (13)$$

Структура выражения (13) показывает, что коэффициент сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, зависит от соотношения диаметра отверстия диафрагмы и внутреннего диаметра прямолинейного участка трубопровода, теплофизических свойств газового потока, отношения скоростей газового потока до диафрагмы и в месте максимального сужения его струи после диафрагмы. Зависимость выражения (13) от указанных параметров подтверждается заключением, приведенным в основополагающей работе по изучению режимов течения газовых потоков С. А. Чаплыгина [10], в котором говорится, что при больших скоростях течения газового потока влияние сжимаемости становится все большим, а при приближении к скорости звука — решающим, качественно совершенно изменяющим картину такого течения.

Следовательно, можно сказать, что выражение (13) корректно описывает зависимость коэффициента сжатия струи газового потока при прохождении диафрагмы в режиме критического течения от:

- теплофизических свойств газового потока (z_1, z_2, k);
- гидродинамических характеристик газового потока (ω_1, ω_2);
- геометрических характеристик прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой и отверстия в ней (β).

Недостатком выражения (13) является невозможность непосредственного вычисления коэффициента сжатия струи газового потока из-за того, что в это выражение входит несколько взаимозависимых неизвестных.

Рассмотренное выше показывает целесообразность проведения дальнейших исследований по разработке предложений расчетных выражений для определения коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, которыми будет учитываться изменение его газодинамических и термодинамических характеристик.

На основании проведенного обзора научно-технической литературы по изучению критического режима течения газового потока через сужающие устройства авторами сформирована концепция и проведена работа по разработке расчетного выражения для определения коэффициента сжатия струи.

Вывод выражения для расчета коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, должен базироваться на решении задачи газовой динамики для сжимаемой среды. При решении данной задачи должен быть осуществлен учет изменения ее теплофизических свойств, влияния стенок прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой и формы образующейся струи.

Сформулированная авторами задача была разделена на несколько более простых.

На первом этапе осуществлено решение задачи по определению коэффициента сжатия струи сжимаемой среды (ε_0) при ее критическом истечении через отверстие из сосуда большого объема, где отсутствует влияние на систему боковых стенок.

На втором этапе осуществлено решение задачи по влиянию на коэффициент сжатия струи наличия ограничивающих рассматриваемую систему боковых стенок прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой.

За основополагающие источники при выводе расчетного выражения для определения ε авторами приняты работы С. А. Чаплыгина [10] и С. В. Фальковича [13]. Осуществленный авторами вывод расчетного выражения для определения коэффициента сжатия струи при критическом истечении базируется на полученном С. А. Чаплыгиным точном аналитическом решении для коэффициента сжатия струи при истечении газа через щель из сосуда больших размеров, когда влиянием боковых стенок сосуда можно пренебречь. Для учета влияния боковых стенок прямолинейного участка трубопровода, расположенного перед диафрагмой, на получаемое значение коэффициента сжатия струи авторами использован результат работы С. В. Фальковича по решению задачи об истечении струи газа из прямоугольного сосуда конечной ширины через щель в стенке сосуда, которая расширила область применения метода С. А. Чаплыгина. Метод, примененный С. В. Фальковичем, интересен тем, что он не исходит из решения задачи о движении несжимаемой жидкости, а решает непосредственно задачу газовой динамики.

Струя газового потока, выходящая из прямолинейного участка трубопровода цилиндрической формы через отверстие диафрагмы в окружающее пространство в режиме критического течения, имеет осесимметричную форму (трехмерное представление системы).

В работе [14] представлены результаты исследований, которые показывают, что коэффициенты сжатия, определенные для плоской и осесимметричной формы струи газового потока при одинаковых отношениях диаметров отверстий к поперечным диаметрам сосудов, практически совпадают. Это позволяет при разработке расчетных выражений пользоваться решениями, полученными для плоской формы представления струи газового потока, проходящей диафрагму в режиме критического течения, и при необходимости использовать их для осесимметричной формы сосуда.

Исследования, представленные в [15], обосновывают возможность применения результатов работ С. А. Чаплыгина и С. В. Фальковича для вывода выражения коэффициента сжатия струи для рассматриваемой нами системы.

При адиабатических процессах связь между давлением и плотностью газа можно записать в виде

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k , \qquad (14)$$

поэтому интеграл Бернулли при адиабатических процессах принимает вид [10]:

$$\rho_2 = \rho_1 \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\frac{k+1}{k-1}\cdot a^2}\right)^{1/k-1} = \rho_2 = \rho_1 \left(1-\tau_2\right)^{1/k-1} , \qquad (15)$$

где τ_2 — параметр, введенный впервые С. А. Чаплыгиным и позволяющий все точные аналитические решения для коэффициента сжатия струи, полученные автором, выразить через этот параметр, который определяется выражением

$$\tau_2 = \frac{\omega_2^2}{\frac{k+1}{k-1}\cdot a^2} , \qquad (16)$$

и a — локальная скорость звука газового потока в сечении *2* (см. рис. 1).

Точное аналитическое решение, выраженное через параметр τ_2, полученное С. А. Чаплыгиным для коэффициента сжатия струи при истечении газа через щель из сосуда больших размеров, когда влиянием боковых стенок сосуда можно пренебречь, имеет следующий вид [10]:

$$\varepsilon_0 = \frac{d_2}{d_0} = \frac{\pi}{\pi + 8\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(-1)^{n-1}}{4n^2 - 1} x_n(\tau_2)}. \tag{17}$$

При критическом истечении газа значение ω_2 достигает локальной скорости звука, а именно $\omega_2 = a$, тогда выражение для параметра τ_2 принимает вид

$$\tau_2^{КР} = \frac{k-1}{k+1}. \tag{18}$$

Функциональная зависимость $x_n(\tau_2)$, представленная в выражении (17), определяется уравнением

$$x_n(\tau_2) = 1 + \frac{\tau_2}{n}\frac{y_n^{/}(\tau_2)}{y_n(\tau_2)}, \tag{19}$$

где $y_n(\tau_2)$ — гипергеометрическая функция, определяемая выражением

$$y_n(\tau_2) = F(a_n, b_n, 2n+1, \tau_2). \tag{20}$$

Коэффициенты a_n и b_n гипергеометрической функции определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} a_n + b_n = 2n - \dfrac{1}{k-1} \\ a_n \cdot b_n = -\dfrac{1}{k-1} n(2n+1) \end{cases}. \tag{21}$$

Авторами статьи проведена работа по оценке возможности представления точного решения выражения (17) в форме функциональной зависимости от показателя адиабаты по аналогии с выражением (11), когда $\tau_2 = \tau_2^{КР}$. Фактически для газовых углеводородных сред при прохождении ими диафрагмы в режиме критического течения показатель адиабаты изменяется в диапазоне от 1,3 до 1,5.

На рисунке 4 приведен результат численных расчетов коэффициента сжатия струи по формуле (17) для случая критического истечения газового потока через отверстие в стенке сосуда, когда параметр τ_2 определяется выражением (18) с вариацией показателя адиабаты в пределах от 1,3 до 1,5.

Как видно (см. рис. 4), данная зависимость хорошо описывается полиномом 3-й степени с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9995$ формулой

$$\varepsilon_0 = -3,0432 \cdot k^3 + 13,362 \cdot k^2 - 19,617 \cdot k + 10,37. \tag{22}$$

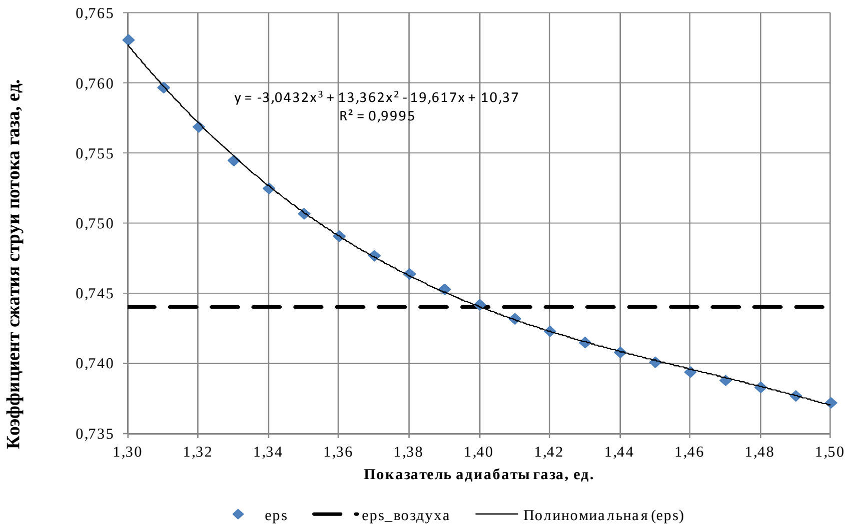

Рис. 4. ***Оценка возможности представления точного решения для коэффициента сжатия струи по выражению (17) в форме функциональной зависимости от показателя адиабаты для углеводородных газовых смесей при критическом истечении***

Далее рассмотрим результат работы С. В. Фальковича [13] по решению газодинамической задачи истечения струи газа из прямоугольного сосуда конечной ширины через щель в стенке такого сосуда. Задача, решенная С. В. Фальковичем, расширила область применения метода С. А. Чаплыгина. Выражение С. В. Фальковича для расчета коэффициента сжатия струи газового потока с учетом обозначений, соответствующих рисунку 1, может быть записано в следующем виде [13]:

$$\frac{1}{\varepsilon}=\frac{d_0}{d_2}=1+\frac{8\tau_2}{\pi}\left[\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n(-1)^{n-1}}{4n^2-1}x_n(\tau_2)-\frac{\tau_1}{\tau_2}\frac{(1-\tau_2)^{\frac{1}{k-1}}}{(1-\tau_1)^{\frac{1}{k-1}}}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n(-1)^{n-1}}{4n^2-1}x_n(\tau_1)\right], \qquad (23)$$

где τ_1 — параметр, который определяется формулой (16), но скорость газа берется в сечении *1* (см. рис. 1), где поток газа остается невозмущенным краевыми эффектами.

Для бесконечно широкого сосуда $\tau_1=0$, и формула (23) переходит в формулу А. С. Чаплыгина (17). Если обозначить d_0/d_2, получающееся из формулы (17), через $1/\varepsilon_0$ то формулу (23) можно записать в виде [13]:

$$\frac{1}{\varepsilon}=\frac{1}{\varepsilon_0}+\frac{8\tau_1}{\pi}\frac{(1-\tau_2)^{\frac{1}{k-1}}}{(1-\tau_1)^{\frac{1}{k-1}}}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n(-1)^{n-1}}{4n^2-1}x_n(\tau_1). \qquad (24)$$

К этому уравнению необходимо присоединить условие равенства расходов газа в бесконечно удаленных сечениях слева и справа (уравнение неразрывности потока (4)), которое с учетом выражения (15) можно записать в виде [13]

$$\omega_1\cdot(1-\tau_1)^{\frac{1}{k-1}}\cdot D^2=\omega_2(1-\tau_2)^{\frac{1}{k-1}}\cdot d_2^2=\omega_2(1-\tau_2)^{\frac{1}{k-1}}\cdot\varepsilon\cdot d_0^2\ . \qquad (25)$$

Учитывая уравнение неразрывности (25), уравнение (24) для искомого коэффициента сжатия струи может быть записано в виде

$$\varepsilon=\varepsilon_0\cdot\left(1-\frac{1}{\beta^2}\sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}}\cdot\frac{8}{\pi}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n\cdot(-1)^{n-1}}{4\cdot n^2-1}x_n(\tau_1)\right), \qquad (26)$$

где ε_0 можно вычислять по формуле С. А. Чаплыгина (17) или воспользоваться предлагаемой нами корреляционной зависимостью (22).

Вид приведенного авторами выражения (26) для расчета коэффициента сжатия струи газового потока, проходящего диафрагму в режиме критического течения, описывает взаимосвязь с теплофизическими свойствами газового потока, его гидродинамическими характеристиками и геометрическими характеристиками прямолинейного участка трубопровода перед диафрагмой и отверстия в ней.

Далее авторами осуществлена работа по оценке возможности практического использования выведенного выражения (26) для расчета коэффициента сжатия струи при определении расхода углеводородной газовой смеси, проходящей диафрагму в режиме критического течения. Для этого рассмотрены отклонения получаемых расчетных значений расхода углеводородной газовой смеси по формуле (12) от значений, полученных для данной системы при измерении расхода с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения. Результаты данной оценки отклонения в значениях расхода приведены на рисунке 5 в зависимости от изменения значения относительного диаметра отверстия диафрагмы (β).

Параметр β выделен на основании информации, приведенной в работе С. А. Чаплыгина [10], в которой сказано, что коэффициент сжатия струи газового потока, проходящий диафрагму в режиме критического течения, должен иметь поправку на изменение относительного диаметра отверстия диафрагмы.

Данные рисунка 5 показывают наличие явной зависимости относительного отклонения расходов среды от значения относительного диаметра отверстия диафрагмы. На основании выявленного факта авторами проведена работа по определению функциональной зависимости для отклонений рассчитанного коэффициента сжатия струи по формуле (26) от значения, которое должно быть для обеспечения сходимости получаемых значений расхода на рисунке 5. Результат данной работы, приведенный на рисунке 6, показывает, что зависимость отклонения коэффициента сжатия струи ($\Delta\varepsilon$) от изменения относительного диаметра отверстия диафрагмы может быть описана полиномом 2-й степени, представленным ниже, с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9626$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon^{эксп}}{\varepsilon^{рассч}} = 1,2214 \cdot \beta^2 - 0,6029 \cdot \beta + 1,0155 . \qquad (27)$$

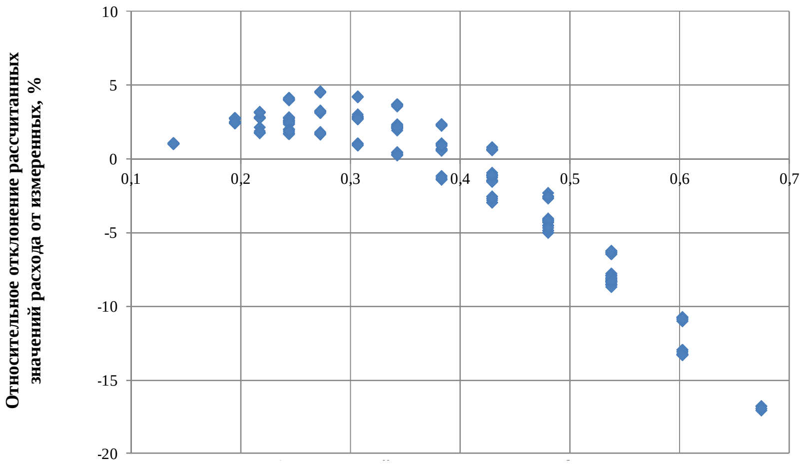

Рис. 5. ***Относительное отклонение расчетных значений расхода углеводородной среды, полученных с использованием выражения (12), где ε рассчитано по формуле (26), от значений расхода, полученных с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения***

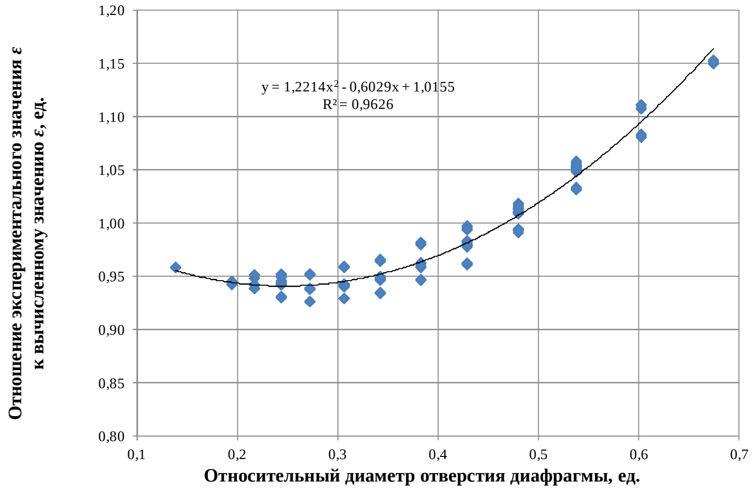

Рис. 6. ***Отношение экспериментально определенного коэффициента сжатия струи к коэффициенту сжатия струи, вычисленному по выражению (26) (сплошная линия — тренд, построенный по данным графика)***

По аналогии с результатами, представленными на рисунке 5, на рисунке 7 приведены результаты оценки значений относительных отклонений расчетных значений расхода углеводородной среды, определенных с использованием выражения (12), где ε рассчитано по формуле (26) с учетом поправки $\Delta\varepsilon$, рассчитанной по формуле (27), от значений расхода, полученных для данной системы с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения.

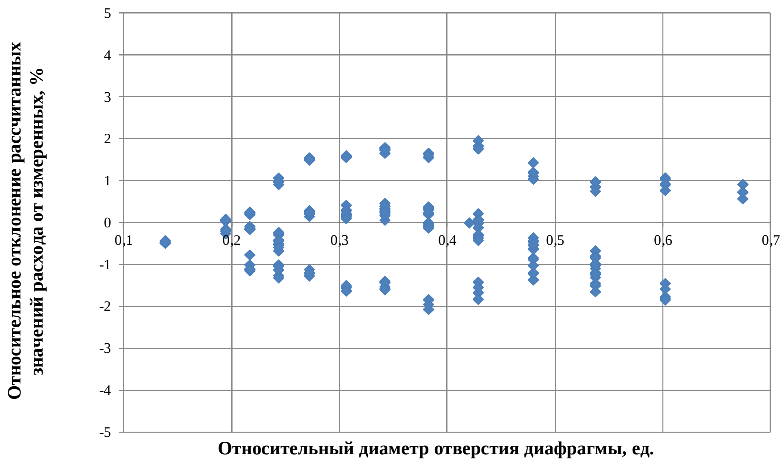

Рис. 7. ***Относительное отклонение расчетных значений расхода углеводородной среды, полученных с использованием выражения (12), где ε рассчитано по формуле (26) с учетом поправки $\Delta\varepsilon$, рассчитанной по формуле (27), от значений расхода, полученных с использованием методики, не базирующейся на режиме критического течения***

Данные (см. рис. 7) показывают, что получаемые значения расхода потока углеводородной газовой смеси, проходящей диафрагму ДИКТа в режиме критического течения, имеют значения относительных отклонений от значений расхода, определенных по методике, не базирующейся на режиме критического течения, которые не превышают ± 2,0 %. Это подтверждает корректность проведенных аналитических исследований при выводе выражения (26) для рассчета коэффициента сжатия струи потока углеводородной газовой смеси, образующегося вследствие прохождения им диафрагмы ДИКТа в режиме критического истечения. Выражение (26) с учетом поправочного коэффициента, рассчитываемого по выражению (27), может быть использовано в практических целях.

Список литературы

1. Rawlins E. L. and Schelhardt M. A. , Back-Pressure Data on Natural-Gas and Their Application to Production Practices, U.S. Bureau of Mines, Monograph 7, 1936.
2. Катц Д. Л. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа. – М.: Недра, 1965. – 677 с.
3. Гриценко А. И., Алиев З. С., Ермилов О. М., Ремизов В. В., Зотов Г. А.. Руководство по исследованию скважин. – М.: Наука, 1995. – 523 с.
4. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
5. Robert C. Johnson Real-Gas Effects in Critical-Flow-Through Nozzles and Tabulated Thermodynamic Properties, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1965, 131 c.
6. D. G. Stewart, J. T. R. Watson, A. M. Vaidya A new correlation for the critical mass flux of natural gas mixtures, Flow Measurement and Instrumentation 11, 2000, p. 265 – 272
7. ISO 9300:2005 Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles
8. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: Гостехиздат, 1947.
9. Жуковский Н. Е. Видоизменение метода Кирхгофа. Математический сборник. Избранные сочинения, т. I, Гостехиздат, 1948.
10. Чаплыгин С. А. О газовых струях. Избранные труды. — М: Наука, 1976. – 496 с.
11. ГОСТ 30319–96. Газ природный. Методы расчета физических свойств.
12. ГОСТ 8.586–2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств.
13. Фалькович С. В. К теории газовых струй. т. XXI, вып. 4. – ПММ, 1957.
14. Rouse H., Abul-Fetouh A.H. Characteristics of irrotational flow through axially symmetric orifices. — J. Appl. Mech. 1950, v. 17, №4.
15. Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. (Главная редакция физико-математической литературы), 1979. – 539 с.

Сведения об авторах

Рогалев Максим Сергеевич, *к. т. н., заместитель директора Тюменского регионального научно-исследовательского центра по изучению керна и пластовых флюидов, ООО «ТюменНИИгипрогаз», тел. 8(3452)286032, e-mail: rogalevms@tngg.ru*

Саранчин Николай Викторович, *к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Тюменского регионального научно-исследовательского центра по изучению керна и пластовых флюидов, «ТюменНИИгипрогаз», тел. 8(3452)286032, e-mail: tu1487@mail.ru*

Маслов Владимир Николаевич, *д. т. н., первый заместитель генерального директора по науке, ООО «ТюменНИИгипрогаз», тел. 8(3452)286027*

Дерендяев Алексей Борисович, *ведущий инженер Тюменского регионального научно-исследовательского центра по изучению керна и пластовых флюидов, «ТюменНИИгипрогаз», тел. 8(3452)286032*

Information about the authors

Rogalev M. S., *Candidate of Science in Engineering, Deputy Director of Tyumen regional research center for core analysis and reservoir fluids study, «TyumenNIIgiprogaz, LLC.», phone: 8(3452)286032, e-mail: rogalevms@tngg.ru*

Saranchin N. V., *Candidate of Science in Physics and Mathematics, leading scientific worker of the Tyumen regional research center for core analysis and reservoir fluids study, «TyumenNIIgiprogaz, LLC.», phone: 8(3452)286032, e-mail: tu1487@mail.ru*

Maslov V. N., *Doctor of Engineering, First Deputy General Director for science of «TyumenNIIgiprogaz, LLC.», phone: 8(3452)286027*

Derendyaev A. B., *leading engineer of the Tyumen regional research center for core analysis and reservoir fluids study, «TyumenNIIgiprogaz, LLC.», phone: 8(3452)286032*