

Р. А. ШТЫКОВ

**ПРОЦЕСС ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СВЕРХСЖИМАЕМОСТИ
ГАЗА НА УЧАСТКАХ ГАЗОПРОВОДА**

R. A. Shtykov

**THE PROCESS OF CHANGING THE SUPERCOMPRESSIBILITY
COEFFICIENT OF A GAS ON SECTIONS OF THE GAS PIPELINE**

Аннотация. *Аннотация и цели.* Одной из проблем, возникающих при решении задач анализа функционирования элементарных участков магистрального газопровода (МГ), является определение значения коэффициента сверхсжимаемости газа, который входит в математические модели трубопроводного транспорта газа для расчета основных характеристик газопровода. *Материалы и методы.* Существуют различные эмпирические формулы для определения коэффициента сверхсжимаемости. Однако в приведенных формулах не в полном объеме учитываются факторы. В одних учитывается изменение коэффициента сверхсжимаемости в зависимости от давления, в других – от температуры, а иногда и от химического состава газовой смеси. Развивая исследования в этом направлении, в статье предложены новые численно-аналитические методы расчета при решении трех различных задач для одно- и многониточного МГ при группировании газопровода по гидравлическим показателям. *Результаты.* Получены простые аналитические формулы для определения массового расхода, давления и коэффициента сверхсжимаемости. Но распределение массового расхода газа между параллельными нитями при переменном коэффициенте сверхсжимаемости газа происходит так, как это было в случае постоянного значения коэффициента сверхсжимаемости газа. Разница заключается в определении входного и выходного значений давлений, т.е. при решении трансцендентных уравнений. *Выводы.* Как показывают результаты в проведенных вычислительных экспериментов, точность расчетов увеличивается до трех и более процентов.

Ключевые слова: газопровод, газ, параметры, труба, расход.

Abstract. *Background.* One of the problems that arise when solving the problems of analyzing the functioning of elementary sections of the main gas pipeline (MG) is to determine the value of the gas supercompressibility coefficient, which is included in the mathematical models of pipeline gas transport for calculating the main characteristics of the gas pipeline. *Materials and methods.* There are various empirical formulas for determining the coefficient of supercompressibility. However, the above formulas do not take full account of the factors. In some, the change in the coefficient of supercompressibility as a function of pressure is taken into account, in others, on the temperature, and sometimes also on the chemical composition of the gas mixture. Developing research in this direction, the article proposes new numerical-analytical calculation methods for solving three different problems for single- and multi-threaded MH when the pipeline is grouped according to hydraulic parameters. *Results.* Simple analytical formulas for determination of mass flow, pressure and coefficient of supercompressibility coefficient are obtained. But the distribution of the mass flow of gas between parallel threads with a variable coefficient of gas supercompressibility occurs as it was in the case of a constant value of the gas supercompressibility coefficient. The difference is in determining the input and output pressure values, i.e. when solving transcendental equations. *Conclusions.* As the results in computational experiments show, the accuracy of calculations increases to three percent or more.

Key words: gas pipeline, gas, parameters, pipe, flow.

Введение

В зависимости от изменения значений давления и температуры газа по направлению потока изменяются и значения сверхсжимаемости газа.

Процесс изменения коэффициента сверхсжимаемости газа представлен в обобщенной эмпирической форме [1–3]

$$Z = (1 + bP^n)^{-1}, \quad (1)$$

которая реализована при проведении примерных расчетов перепада давления при трубопроводном транспорте сухого и отбензиненного газов.

Рассмотрим численно-аналитические методы расчета при решении трех разных задач для одно- и многониточного магистрального газопровода (МГ) при группировании трубопровода (ТП) по гидравлическим показателям.

Первая из этих задач ставится следующим образом.

Заданы значения давления P и массового расхода M газа во входе на участок и требуется найти значение давления газа на конце участка в зависимости от его длины.

При малом изменении профиля трассы МГ сокращенное уравнение Бернулли используется в дифференциальной форме

$$\frac{dP}{\rho g} + dh_{\tau} = \frac{dP}{\rho g} + \frac{\lambda}{D} \frac{w^2}{2g} dx = 0, \quad (2)$$

где P – давление газа в фиксированном сечении x ; ρ – плотность газа в процессе транспортирования; h_{τ} – потеря напора за счет трения газа; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; w – среднее значение скорости потока по сечению, D – диаметр ГП.

В виде дополнения пользуемся следующими уравнениями:

– уравнение состояния реального газа с учетом переменности коэффициента сверхсжимаемости Z согласно формуле (1):

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT_0}{1 + bP^n}; \quad (3)$$

– уравнение непрерывности среды в установившемся режиме течения (массовый расход газа постоянен по времени):

$$M = \frac{\pi D^2}{4} w \rho = \text{const}. \quad (4)$$

Принимая постоянным, равным T_0 , значение температуры газа по длине газопровода из совокупности зависимостей (2)–(4), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение с разделенными переменными

$$\int_{P_H}^P \frac{(1 + bP^n)}{RT_0} P dP = \frac{\lambda}{2D} \left(\frac{4M}{\pi D^2} \right)^2 \int_0^x dx.$$

Интегрируя по заданным границам, получаем следующую формулу для определения массового расхода газа по участку:

$$M = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{\left[P_H^2 - P_K^2 + \frac{2b}{n+2} (P_H^{n+2} - P_K^{n+2}) \right] D}{\lambda R T_0 L}}. \quad (5)$$

Известно, что при заданных значениях давления P_H , P_K для участка с длиной L при допущении о постоянстве значения коэффициента сверхсжимаемости газа пропускная способность (производительность) составляет

$$G_* = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_K^2) D}{\lambda Z'_{cp} R T_0 L}}. \quad (6)$$

Здесь постоянное значение коэффициента сверхсжимаемости Z'_{cp} через среднее значение

$P_{cp} = \frac{P_H + P_K}{2}$ подсчитано по формуле ВНИИИ газа

$$Z'_{cp} = \frac{1}{1 + b \left(\frac{P_H + P_K}{2} \right)^n}.$$

Результаты расчетов показали, что при использовании значения переменного Z пропускная способность участка оказалась больше, чем при использовании среднего значения Z'_{cp} , т.е. $M > G_*$.

Почленным разделением формулы (5) на формулу (6) получаем

$$\frac{M}{G_*} = \sqrt{\left[1 + \frac{2b}{n+2} \frac{P_H^{n+2} - P_K^{n+2}}{P_H^2 - P_K^2} \right] Z'_{cp}}. \tag{7}$$

Так как здесь постоянные b и n имеют положительные значения, то использование среднего значения коэффициента сверхсжимаемости Z'_{cp} приводит к уменьшению массового расхода газа (рис. 1).

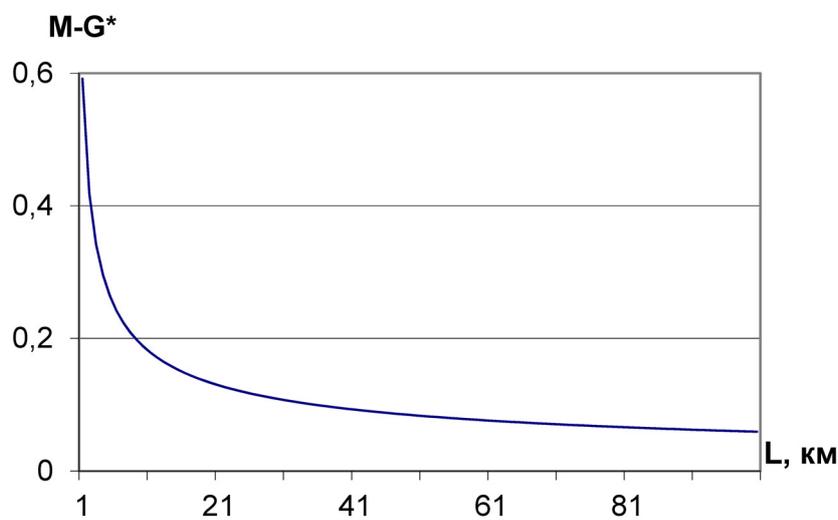


Рис. 1. Изменение разности $M-G^*$ при $P_H = 30$ ат, $P_K = 25$ ат, $L = 100$ км, $D = 990$ мм, $\lambda = 0,026$, $T_H = 303,15$ К

Из формулы (5) составим уравнение для перепада давления на участке с длиной L

$$P_H^2 - P_K^2 + \frac{2b}{n+2} (P_H^{n+2} - P_K^{n+2}) = \frac{\lambda R T M^2}{D F^2} L. \tag{8}$$

Положим, что на входе заданы значения P_H и M . Необходимо определить значение давления P_K на конце участка. Тогда в уравнении (8) образуется постоянная часть

$$f_{const} = P_H^2 + \frac{2b}{n+2} P_H^{n+2} - \frac{\lambda R T M^2}{D F^2} L.$$

Если переменную часть обозначим через

$$f_k = P_K^2 + \frac{2b}{n+2} P_K^{n+2},$$

то из (8) следует уравнение

$$f_k = f_{const}.$$

Так как здесь $n+2 > 0$ – рациональное число, то это уравнение будет трансцендентным. Как видно из выражения, f_{const} представляет собою возрастающую функцию от аргумента P_K , значение которого ограничено снизу

$$P_{K*} = \sqrt{P_H^2 - \frac{\lambda Z_0 R T_0 L}{D F^2} M^2}$$

при $Z_0 = \frac{1}{1 + b P_H^n}$.

Кроме того, значение давления на участке начинает уменьшаться от P_H , т.е. P_H может служить верхней границей решения уравнения относительно P_K .

Поскольку границы искомого определены, можно приступить к решению трансцендентного уравнения, для чего привлекается метод разделения отрезка пополам. Условно обозначим переменные нижних и верхних границ искомого через $P_{\text{л}}$ и $P_{\text{п}}$. Тогда для первого шага они составляют $P_{\text{л}} = P_K$ и $P_{\text{п}} = P_H$.

Определим середину отрезка $P = \frac{P_{\text{л}} + P_{\text{п}}}{2}$ и вычислим соответствующее ей значение

$$f_k = P^2 + \frac{2b}{n+2} P^{n+2}.$$

Если выполняется условие $f_k > f_{\text{const}}$, то значение P следует уменьшить, для чего в качестве новой верхней границы принимается $P: P_{\text{п}} = P$. А нижняя граница оставляется без изменения. Если же выполняется условие $f_k < f_{\text{const}}$, то P принимается как новая нижняя граница отрезка: $P_{\text{л}} = P$, а верхняя граница отрезка оставляется по-старому.

Процесс обновления границ продолжается до выполнения одного из условий:

$$|f_k - f_{\text{const}}| < \epsilon_f \quad (\epsilon_f = 10^{-5}),$$

$$|P_{\text{п}} - P_{\text{л}}| < \epsilon_p \quad (\epsilon_p = 10^{-3}).$$

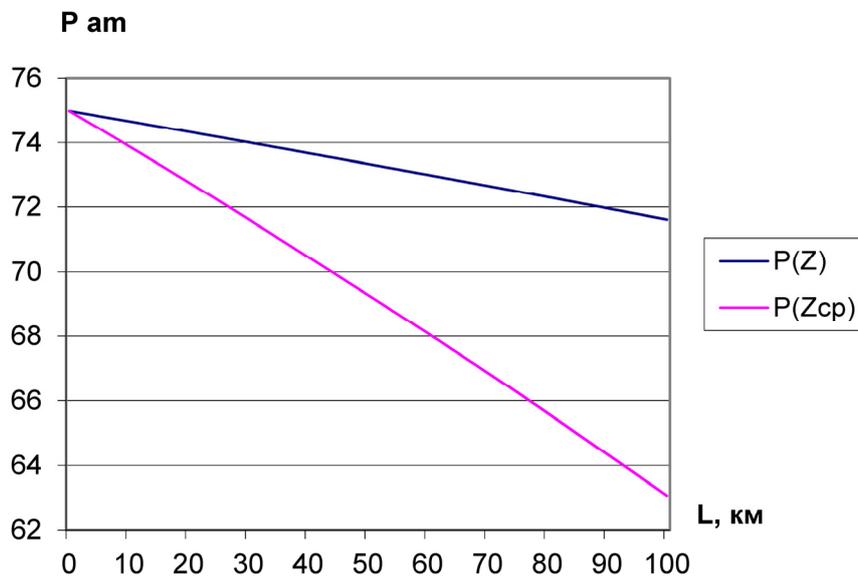


Рис. 2. Изменение давления согласно значениям коэффициента сверхсжимаемости при $P_H = 75$ атм, $M = 150$ кг/с, $L = 100$ км, $D = 990$ мм, $\lambda = 0,026$, $T_H = 303,15$ К

На рис. 2 показаны изменения давления по длине участка, рассчитанные по двум вариантам значения коэффициента сверхсжимаемости.

Вторая задача ставится следующим образом. Заданы значения массового расхода газа M и давления газа P_K на конце участка, длина которой составляет L . Требуется восстановить значение давления газа P_H в начале участка.

Тогда из формулы (8) постоянная часть представляется как

$$f_{\text{const}} = P_{\text{к}}^2 + \frac{2b}{n+2} P_{\text{к}}^{n+2} - \frac{\lambda RT M^2}{D F^2} L,$$

а переменная часть –

$$f_{\text{н}} = P_{\text{н}}^2 + \frac{2b}{n+2} P_{\text{н}}^{n+2}.$$

Полученное уравнение

$$f_{\text{н}} = f_{\text{const}}$$

также можно решить методом деления отрезка пополам.

В отличие от первой задачи здесь верхняя граница допустимого решения не известна. Чтобы определить эту границу, предпринимается последовательное пошаговое увеличение $P_{\text{н}}$ на 1 атм до достижения условия $f_{\text{н}} > f_{\text{const}}$. После выполнения этого условия считается, что определено значение $P_{\text{н}}$. Тогда нижней границей области решения является $P_{\text{л}} = P_{\text{н}} - 1$ атм. Далее в зависимости от выполнения условий $f_{\text{н}} > f_{\text{const}}$ или $f_{\text{н}} < f_{\text{const}}$ методом деления отрезка пополам выбирается нижняя или верхняя граница искомого.

Процесс уточнения решения продолжается до выполнения одного из приведенных выше условий по давлению и уравнению.

Третья задача включает определение пропускной способности участка при заданных значениях давления $P_{\text{н}}$ и $P_{\text{к}}$ на концах участка. Она единственная из серии трех задач, которая решается точно по формуле

$$M = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{\left[P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2 + \frac{2b}{n+2} (P_{\text{н}}^{n+2} - P_{\text{к}}^{n+2}) \right] D}{\lambda R T_0 L}}.$$

Приведенные выше задачи также были решены для сгруппированных по гидравлическим показателям параллельных газопроводов. Ниже описываются особенности алгоритмов численного решения данных задач.

При наличии n **параллельных газопроводов с одинаковой гидравлической характеристикой** общий поток газа распределяется между каналами одинаково и по каждой из нитей проходит расход с интенсивностью M/n . При этом в приведенных выше формулах отражается только это изменение, т.е. больших изменений в процессе расчета и в алгоритме не наблюдается.

При наличии n параллельных газопроводов с **двумя группами** гидравлических показателей общий расход газа распределяется по нитям согласно формуле

$$M = n_1 M_1 + n_2 M_2.$$

Здесь первая группа состоит из n_1 нитей с диаметрами D_1 и эквивалентной шероховатостью k_1 , вторая группа – из n_2 нитей с соответствующими показателями D_2 и k_2 . Каждая из нитей первой группы при заданном наборе значений давления и длины участка пропускает газ с интенсивностью M_1 , а из второй группы – M_2 .

Прибегая к аналогии законам Кирхгофа имеют место условия

$$P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2 + \frac{2b}{n+2} (P_{\text{н}}^{n+2} - P_{\text{к}}^{n+2}) = \frac{\lambda_1 R T M_1^2}{D_1 F_1^2} L,$$

$$P_{\text{н}}^2 - P_{\text{к}}^2 + \frac{2b}{n+2} (P_{\text{н}}^{n+2} - P_{\text{к}}^{n+2}) = \frac{\lambda_2 R T M_2^2}{D_2 F_2^2} L.$$

Отсюда в силу равенств значений левых сторон следует, что между расходами нитей первой и второй группы соблюдается взаимосвязь в виде

$$\frac{\lambda_1 R T M_1^2}{D_1 F_1^2} L = \frac{\lambda_2 R T M_2^2}{D_2 F_2^2} L$$

или с учетом выражения коэффициента сопротивления

$$\frac{k_1^{1/8}}{D_1^{21/8}} M_1 = \frac{k_2^{1/8}}{D_2^{21/8}} M_2. \quad (9)$$

Учитывая $M_2 = \frac{M - n_1 M_1}{n_2}$, уравнение представим в виде

$$\frac{k_1^{1/8}}{D_1^{21/8}} M_1 = \frac{k_2^{1/8}}{D_2^{21/8}} \frac{M - n_1 M_1}{n_2}.$$

Отсюда для расхода газа по каждой нити из первой группы получаем формулу

$$M_1 = \frac{M}{n_1 + n_2 \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^{1/8} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{21/8}}. \quad (10)$$

При заданных значениях давления на входе P_H и общего расхода M определяем значение давления P_K на конце участка.

Сначала по формуле (10) вычисляется значение M_1 и вставляется в уравнение

$$P_H^2 - P_K^2 + \frac{2b}{n+2} (P_H^{n+2} - P_K^{n+2}) = \frac{\lambda_1 R T M_1^2}{D_1 F_1^2} L.$$

В этой формуле постоянная часть имеет вид

$$f_{\text{const}} = P_H^2 + \frac{2b}{n+2} P_H^{n+2} - \frac{\lambda_1 R T M_1^2}{D_1 F_1^2} L,$$

а переменная часть –

$$f_k = P_K^2 + \frac{2b}{n+2} P_K^{n+2}.$$

Записав уравнение в виде $f_k = f_{\text{const}}$, применим метод деления отрезка пополам.

Аналогично решается задача при известных значениях выходного P_K и общего расхода M , но с предварительным поиском верхней границы допустимых решений.

При известных значениях P_H и P_K массовые расходы по нитям определяются по формуле (5)

$$M_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \sqrt{\frac{\left[P_H^2 - P_K^2 + \frac{2b}{n+2} (P_H^{n+2} - P_K^{n+2}) \right] D_1}{\lambda_1 R T_0 L}}.$$

Значение массового расхода по нитям второй группы вычисляются по формуле

$$M_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{\frac{\left[P_H^2 - P_K^2 + \frac{2b}{n+2} (P_H^{n+2} - P_K^{n+2}) \right] D_2}{\lambda_2 R T_0 L}}$$

либо по формуле (9).

При наличии m групп параллельных нитей, согласно приведенным выше обозначениям, распределение массового расхода между нитями групп подчиняется зависимости

$$M = \sum_{i=1}^m n_i M_i. \quad (11)$$

Так как по каждой из нитей из m групп падение давления одинаковое, то выполняются условия

$$\frac{k_1^{1/4}}{D_1^{21/4}} M_1^2 = \frac{k_2^{1/4}}{D_2^{21/4}} M_2^2 = \frac{k_3^{1/4}}{D_3^{21/4}} M_3^2 = \dots = \frac{k_m^{1/4}}{D_m^{21/4}} M_m^2.$$

Отсюда определяются значения расходов нитей через расход нити первой группы

$$M_i = \left(\frac{k_1}{k_i} \right)^{1/8} \left(\frac{D_i}{D_1} \right)^{21/8} M_1.$$

Так как суммарный расход известен, то из (11) следует

$$M = M_1 \sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{k_1}{k_i} \right)^{1/8} \left(\frac{D_i}{D_1} \right)^{21/8}.$$

Из этой зависимости определяется значение расхода газа по нитям первой группы

$$M_1 = \frac{M}{\sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{k_1}{k_i} \right)^{1/8} \left(\frac{D_i}{D_1} \right)^{21/8}}.$$

После того, как определен расход по нитям первой группы, можно решить первую, вторую и третью задачи для m групп параллельных нитей.

Таким образом, процесс распределения массового расхода газа между параллельными нитями при переменном коэффициенте сверхсжимаемости газа происходит так, как это было в случае постоянного значения коэффициента сверхсжимаемости газа. Разница заключается в определении входного и выходного значений давлений, т.е. при решении трансцендентных уравнений.

Выводы

По представленному материалу в данном параграфе сделаем следующие выводы.

1. Чтобы увеличить точность гидравлического расчета элементарного участка или горизонтального МГ в целом, необходимо учитывать путевое изменение значения коэффициента сверхсжимаемости газа Z .
2. Установлено, что с увеличением длины участка разность между перепадами давления, которые рассчитаны при постоянных и переменных значениях коэффициента сверхсжимаемости газа, увеличивается.
3. Разработаны численно-аналитические методы процесса распределения газа между параллельными газопроводами при различных постановках: по определению входного и выходного давления, а также производительности участка.

Библиографический список

1. Юрков, Н. К. Уточненный алгоритм расчета гидродинамических параметров инженерных газовых сетей / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Промышленная энергетика. – 2017. – № 2. – С. 44–48.
2. Кортаев, Ю. П. Добыча, транспорт и подземное хранение газа / Ю. П. Кортаев, А. И. Ширковский. – М., 1997. – 487 с.
3. Штыков, Р. А. Разработка численного алгоритма определения гидравлических параметров двух групп параллельных нитей / Р. А. Штыков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 270–273.
4. Штыков, Р. А. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа / Р. А. Штыков, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – № 1. – С. 163–165.

5. *Штыков, Р. А.* Методика решения задач горения многокомпонентного газа / Р. А. Штыков, Г. П. Разживина, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 264–266.
6. *Штыков, Р. А.* Программа расчета газопроводной сети с отводами по показателям в конечных точках / Р. А. Штыков, Н. К. Юрков // Технические науки. Теория и практика : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : Изд-во ЦПМ «Академия Бизнеса», 2017. – С. 73–78.

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики и прикладной математики,
Муромский институт
Владимирского государственного университета
(602264, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Shtykov Roman Aleksandrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(602264, 23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

УДК 681.324

Штыков, Р. А.

Процесс изменения коэффициента сверхсжимаемости газа на участках газопровода /
Р. А. Штыков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 56–63.
DOI: 10.21685/2307-4205-2018-1-7.