ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ЗВУКА ОТ ДАВЛЕНИЯ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

УДК 622.691.4

М.В. Лурье, профессор, ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (Москва, РФ), lurie254@gubkin.ru

И.Т. Мусаилов, аспирант, ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», imusailov@gmail.com

В статье представлены результаты исследования зависимости скорости звука в транспортируемом природном газе от давления. Показано, что зависимость имеет немонотонный характер. При увеличении давления скорость звука в газе сначала уменьшается, достигая своего минимума, затем при больших значениях монотонно увеличивается, при определенных условиях достигая 700 м/с. Величина скорости звука в природном газе зависит не только от давления и температуры, но и от состава, свойств транспортируемого газа. В статье рассматривается международная методика определения коэффициента сжимаемости газа, основанная на уравнении состояния Пенг-Робинсона, которая требует знаний компонентного состава газа и молекулярных свойств каждого из компонентов. Проводится сравнение с методикой СТО Газпром. Полученные расчетные значения сравниваются с экспериментальными данными. Используется теория расчета адиабатной скорости звука в реальном газе. Показывается, что скорость звука в реальном газе, в отличие от совершенного газа, зависит не только от температуры, но и от давления. На основе приведенной теории выполнены расчеты, построены графики, сделаны выводы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СКОРОСТЬ ЗВУКА, ПЕНГ-РОБИНСОН, УРАВНЕНИЕ АДИАБАТЫ, УРАВНЕНИЕ ЛАПЛАСА, КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ, ФАКТОР АЦЕНТРИЧНОСТИ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае под скоростью звука $V_{кр}$ понимают местную скорость распространения малых возмущений относительно движущегося газа в данной точке потока. В реальном газе скорость распространения малых возмущений зависит как от давления, так и от температуры. Протяженные газопроводы высокого и сверхвысокого давления отличаются от обычных тем, что газ в них находится в сверхсжатом состоянии под высоким давлением (до 35 МПа). Газ, транспортируемый в таких газопроводах, может иметь плотность 200–250 кг/м^3, а переходные процессы – длиться часами. Один из важных факторов при расчете скорости звука в магистральных газопроводах – коэффициент сжимаемости газа, который не является постоянной величиной в различных сечениях газопровода. В большинстве расчетов при моделировании нестационарных процессов применяются классические формулы, которые некорректно применять к газопроводам, транспортирующим газ под высоким давлением. Задачей проведенного исследования является выбор методики расчета коэффициента сжимаемости газа, дающей его наилучшую аппроксимацию, и проведение исследования зависимости скорости звука от рабочих давлений на основании выбранной методики. Построение корректной расчетной методики необходимо для моделирования переходных процессов, возникающих в газопроводах, а также для прогнозирования величин скачков давления при изменении режимных характеристик.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СЖИМАЕМОСТИ ГАЗА В ГАЗОПРОВОДАХ СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В отечественной практике для определения коэффициента сжимаемости широко используются уравнения, аппроксимирующие коэффициент сжимаемости газа в различных диапазонах давлений и температур, причем выход за рамки этих диапазонов ведет к существенным погрешностям. В международной практике для расчета коэффициента сжимаемости используются кубические уравнения состояния, в основе которых лежат различные модификации уравнения состояния Ван-дер-Ваальса 1873 г. Среди них можно выделить два уравнения, которые часто используются в расчетах параметров транспортировки газа по газопроводам. Это уравнения состояния

M.V. Lurye, Doctor of Science, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russian Federation), lurie254@gubkin.ru

I.T. Musailov, post-graduate student (Engineering), Gubkin Russian State University of Oil and Gas, i.musailov@gmail.com

Research of the dependence of sound velocity from the pressure in the main high and ultra-high pressure gas pipelines

The results of the studies concerning the dependence of the sound velocity in the transported natural gas from the pressure are presented in this article. It is demonstrated that the dependence is non-monotonic: when the pressure increases, the speed of sound in the gas first decreases, reaching its minimum, then monotonously increases at large values, reaching 700 m/s under certain conditions. It is demonstrated that the magnitude of the speed of sound in natural gas depends not only on pressure and temperature, but also on the composition and properties of the transported gas. The international method for determining the compressibility factor of a gas (based on the Peng-Robinson equation of state) is discussed in the article. It requires the knowledge of the gas composition and the molecular properties of each of the components. The comparison with the methodology is given in The Gazprom Corporate Standard method. The obtained calculated values are compared with experimental data. The theory of calculating the adiabatic velocity of sound in a real gas is provided. It is shown that the speed of sound in a real gas, in contrast to an ideal gas, depends not only on temperature, but also on pressure. On the basis of the above theory, calculations are carried out, a graph is constructed, and appropriate conclusions are drawn.

KEYWORDS: SOUND VELOCITY, PENG-ROBINSON, ADIABATIC EQUATION, LAPLACE EQUATION, COMPRESSIBILITY FACTOR, ACENTRIC FACTOR, METHOD COMPARISON.

Таблица 1. Сравнение расчетных коэффициентов сжимаемости газа *Z* с экспериментальными значениями
Table 1. The comparison of estimated gas deviation factor *Z* to the test values

Давление, МПа Pressure, MPa	Коэффициент сжимаемости экспериментальный Deviation factor, test	Расхождение экспериментальных и расчетных значений коэффициента сжимаемости газа, % The divergence of test values and estimated gas deviation factor, %	
		По методу Пенг-Робинсона The Peng-Robinson method	По методике СТО Газпром The Gazprom Corporate Standard method
5	0,82	–1,4	–2,2
10	0,66	–2,2	–1,4
15	0,59	–2,2	–2,7
20	0,62	–2,5	–9,0
25	0,70	–2,8	–13,3
30	0,77	–3,1	–12,6
35	0,85	–3,3	–5,0

Пенг-Робинсона и Соаве-Редлиха-Квонга. Оба эти двухпараметрические уравнения требуют знания покомпонентного состава газа (критических параметров каждого из компонентов, а также фактора ацентричности). Наиболее удачным, по мнению авторов, является уравнение Пенг-Робинсона, которое одинаково хорошо подходит как для сухих газов, так и для газоконденсатных и парогазовых смесей.

Базовое уравнение состояния Пенг-Робинсона имеет следующий вид:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V(V + b) + b(V - b)}, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная; T, p, V – температура, давление и молярный объем газа, соответственно; a и b – константы, характеризующие молекулярные свойства отдельных компонентов газа; α – безразмерный коэффициент, вводящий поправку на температуру газа.

Коэффициент a считается мерой межмолекулярных сил притяжения между молекулами, а параметр b – объемом, занимаемым молекулами. Параметры a и b определяются через давление и температуру в критической точке [4].

Для того чтобы из данного уравнения состояния перейти к уравнению для определения коэффициента сжимаемости, необходимо воспользоваться уравнением Менделеева-Клапейрона и произвести замену: $Z = pV/RT$. Тогда путем некоторых преобразований уравнение состояния Пенг-Робинсона может быть представлено в виде полинома третьей степени

$$Z^3 + (B - 1)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0, \quad (2)$$

Таблица 2. Значения коэффициента D_* (p, T) Джоуля-Томсона, К/МПа
Table 2. The value of the Joule-Thomson coefficient D_* (p, T), K/MPa

Давление p, МПа Pressure p, MPa	Температура T, К Temperature T, K					
	270	280	290	300	320	340
1	6,10	5,68	5,28	4,92	4,26	3,61
3	5,71	5,30	4,93	4,58	3,96	3,43
5	5,28	4,91	4,56	4,24	3,67	3,18
9	4,08	3,86	3,64	3,43	3,02	2,65
12	3,11	3,03	2,93	2,80	2,53	2,26
16	2,11	2,13	2,12	2,08	1,95	1,79
20	1,48	1,53	1,55	1,55	1,49	1,40
24	1,05	1,10	1,14	1,15	1,14	1,10
30	0,62	0,68	0,72	0,75	0,77	0,75

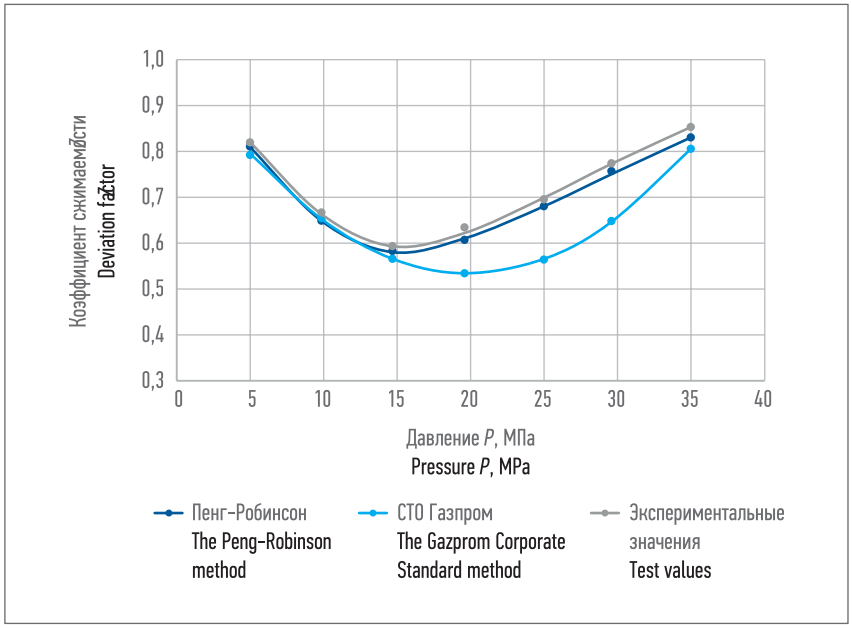


Рис. 1. Сравнение расчетных коэффициентов сжимаемости газа Z с экспериментальными значениями
Fig. 1. The comparison of estimated gas deviation factor Z to the test values

где коэффициенты A и B для многокомпонентного газа могут быть найдены из следующих соотношений:

$$A = \frac{(a\alpha)_m p}{(RT)^2},\ B = \frac{b_m p}{RT}. \qquad (3)$$

В кубических уравнениях состояния ван-дер-ваальсового типа для определения значений $(a\alpha)_m$ и b_m из уравнения (3) используют квадратичные правила смешения.

Сравнение коэффициентов сжимаемости газа, рассчитанных при помощи кубического уравнения состояния Пенг-Робинсона и по методике, изложенной в СТО Газпром [3], приведено в табл. 1. Состав газа и результаты экспериментального определения коэффициента сжимаемости изложены в [5].

В диапазоне давлений до 15 МПа различия значений коэффициентов сжимаемости газа, рассчитанных по обеим методикам, незначительны. Далее с ростом давления газа разница между расчетными и экспериментальными значениями увеличивается. В диапазоне давлений до 35,0 МПа с наименьшей погрешностью коэффициент сжимаемости газа рассчитывается по уравнению состояния Пенг-Робинсона.

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ (СКОРОСТЬ ЗВУКА) В ГАЗОПРОВОДЕ

Для дозвуковых течений газа изменения давления и расхода регулируются быстрыми волнами, скорость которых определяется скоростью звука и рассчитывается по формуле

$$V_{кр} = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}, \qquad (4)$$

где $(\partial p/\partial \rho)_s$ – производная от давления по плотности при постоянной энтропии s, т. е. в адиабатическом процессе сжатия.

Согласно [1], уравнение адиабаты реального газа имеет вид

$$\frac{dT}{dp} = D_* + \frac{1}{\rho C_p}. \qquad (5)$$

Это уравнение отличается от классического уравнения адиабаты Пуассона для совершенного газа наличием в правой части дополнительного слагаемого – коэффициента D_* Джоуля-Томсона. Этот коэффициент отражает зависимость энтальпии J (p, T) реального газа не только от температуры, но и от давления.

Если использовать уравнение состояния реального газа в виде $p = Z\rho RT$, то коэффициент Джоуля-

Томсона определяется выражением

$$D_* = \frac{1}{\rho C_p}\cdot\frac{T}{Z}\cdot\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p, \quad (6)$$

где $Z(p, T)$ – коэффициент сжимаемости газа, являющийся известной функцией своих аргументов; $C_p(p, T)$ – теплоемкость газа при постоянном давлении (изобарная теплоемкость). Естественно, если $Z \equiv 1$ (совершенный газ), то $D_* \equiv 0$, т. е. эффект Джоуля–Томсона в совершенном газе отсутствует.

Коэффициент $D_*(p, T)$, как и теплоемкость, имеет различное значение в диапазоне рабочих давлений. Значения D_*, рассчитанные на основе уравнения состояния Пенг–Робинсона, приведены в табл. 2.

Уравнение (5) адиабатического процесса в реальном газе можно представить в виде

$$\frac{dT}{dp} = \frac{ZR}{C_p}\left[1 + \frac{T}{Z}\cdot\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right]\frac{T}{p}, \quad (7)$$

где полная производная $dT/dp \equiv (\partial T/\partial p)_s$ вычисляется при условии $s = const$.

Если записать уравнение состояния в виде

$$p = Z(p, T(p))\cdot\rho RT(p), \quad (8)$$

где $T(p)$ удовлетворяет уравнению (7), то получим тождество. Дифференцируя обе части этого тождества по ρ при постоянной энтропии s и используя (7), найдем выражение для скорости $V_{кр}$

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{C_p}{C_v}\cdot\frac{ZRT}{1 - \frac{p}{Z}\left(\frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T}}. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Как и следовало ожидать, скорость $V_{кр}$ звука в реальном газе зависит не только от температуры, но и от давления, причем зависимость от давления носит немонотонный характер. На рис. 2 изображена зависимость скорости звука от давления при различных температурах газа.

При относительно невысоких давлениях (до 10 МПа) скорость звука в газе при увеличении давления изменяется незначительно – в среднем на 3–4 м/с на 1 МПа. Однако при уменьшении температуры изменение становится более выраженным. При давлениях до 5 МПа скорость звука уменьшается, достигая своего минимума, затем с увеличением давления монотонно возрастает, достигая значений 650–700 м/с. Такие значения характерны для газопроводов, работающих под сверхвысоким давлением, например, для газопроводов, проложенных по дну глубоководных морей. Большие значения скорости звука при высоких давлениях обусловливаются большей плотностью газа. Чем выше плотность среды, тем выше скорость распространения в ней волн давления (табл. 3).



Таблица 3. Зависимость скорости звука в природном газе от давления (R = 504 Дж/(кг·К), T = 290 К)
Table 3. The dependence of the speed of sound in natural gas on pressure (R = 504 J/(kg·K), T = 290 K)

P, МПа P, MPa	0,1	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
$V_{кр}$, м/с $V_{critical}$, m/s	436	425	436	465	511	563	619	672

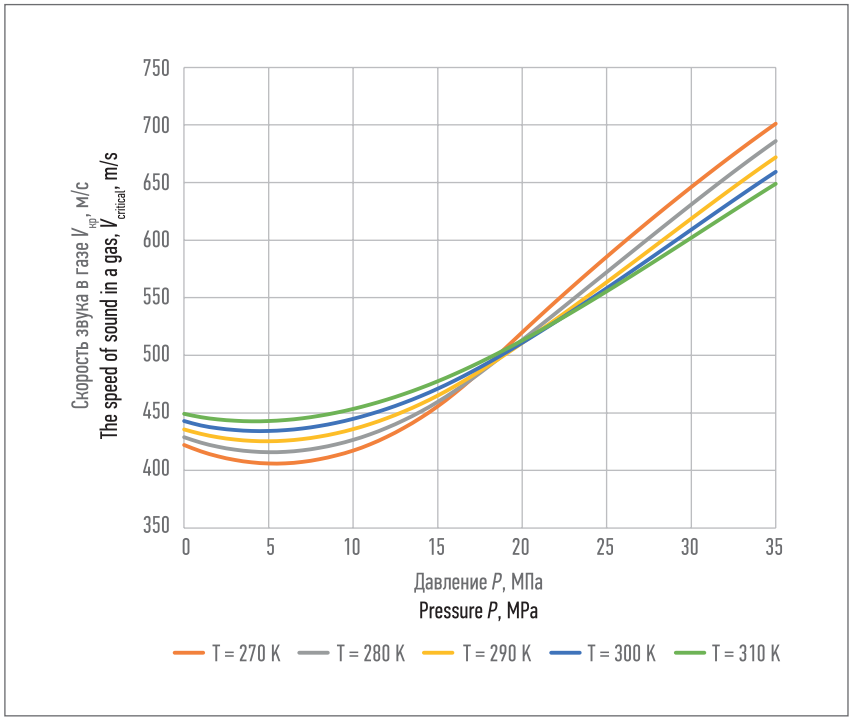


Рис. 2. Зависимость скорости звука в природном газе от давления
Fig. 2. The dependence of the speed of sound in natural gas on pressure

Если скорость v течения газа стремится к местной скорости $V_{кр}$ звука, то в таких сечениях газопровода производная $dp/dx \to \infty$, что соответствует скачку давления и следовательно – скачку температуры и плотности, порождающему ударные волны. Чтобы оценить величину Δp скачка повышения давления в результате уменьшения скорости потока на Δv, воспользуемся формулой Н.Е. Жуковского $\Delta p = \rho V_{кр} \Delta v$. Например, при p = 30 МПа, Δv = 5 м/с, ρ = 230 кг/м³ и $V_{кр}$ = 620 м/с получим $\Delta p \cong$ 0,72 МПа. Это означает, что при уменьшении скорости потока на 5 м/с скачок давления на фронте ударной волны составит 0,72 МПа, т.е. примерно 7,3 атм.

ВЫВОДЫ

Для получения расчетных значений, приближенных к реальным данным, необходимо использовать расчетные методики, дающие адекватные значения во всех диапазонах давлений и температур. Правильное представление о скорости распространения волн давления и других параметров в том или ином сечении газопровода необходимо для корректного моделирования нестационарных процессов, возникающих в газопроводе вследствие изменения режимных характеристик или возникновения нештатных ситуаций.

Выполненные исследования показывают, что скорость звука в реальном газе зависит не только от температуры, но и от давления и имеет немонотонный характер: существуют интервалы убывания и возрастания скорости звука при увеличении рабочего давления.

Торможение потока газа, транспортируемого при высоких давлениях, приводит к значительному повышению давления, что необходимо учитывать при эксплуатации газопроводов, работающих под высоким давлением. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Лурье М.В. Теоретические основы трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М: ООО «Изд. дом «Недра», 2017. 478 с.
2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., перераб. и доп. М: Наука, 1972. 721 с.
3. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. Введ. 2006-07-03. М: ЗАО «Изд. дом Полиграфия», 2006. 196 с.
4. Ahmed T. *Equations of State and PVT Analysis: Applications for Improved Reservoir Modeling*. Gulf Publishing Company; 2007.
5. Гуревич Г.Р. Коэффициенты сжимаемости природных газов с высоким содержанием сероводорода и двуокиси углеводорода/Г.Р. Гуревич, В.И. Лапшин, А.И. Брусиловский, А.П. Желтов // Изв. вузов. Сер. Нефть и газ. 1989. №7. С. 61–64.

REFERENCES

(1) Lurie M. *The Theoretical Basis of Pipeline Transmission of Oil, Petrochemicals, and Gas*. M.: Publishing House «Nedra»; 2017. (In Russian)
(2) Vargaftik N. *A Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. 2nd ed., M.: Nauka; 1972. (In Russian)
(3) Gazprom Corporate Standard 2-3.5-051-2006. *The Standards of Gas Pipeline Technological Design*. M.: Publishing House Polygraphia; 2016. (In Russian)
(4) Ahmed T. *Equations of State and PVT Analysis: Applications for Improved Reservoir Modeling*. Gulf Publishing Company; 2007.
(5) Gurevich G. Gas deviation factor coefficients of gases with high content of hydrogen sulfide and hydrocarbon dioxide. In: Gurevich G, Lapshin V, Brusilovsky A, Zheltov A. *High Educational Institutions Oil and Gas Magazine*. 1989; No. 7: 61–64. (In Russian)