

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.12

DOI 10.22213/2410-9304-2023-4-4-10

Методика определения коэффициента сжимаемости природного газа

Д. Ю. Кутовой, ООО «Газпром межрегионгаз», Казань, Россия

Р. И. Ганиев, кандидат технических наук, ООО «ЦМ «СТП», Казань, Россия

В. А. Фафурин, доктор технических наук, профессор,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

М. Л. Шустрова, кандидат технических наук,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

В. Б. Явкин, кандидат технических наук, доцент,
Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Россия

Работа посвящена вопросу разработки экспериментального стенда и методики экспериментального определения коэффициента сжимаемости газообразных сред для обеспечения возможности получения достоверных сведений о значениях коэффициента сжимаемости природного газа в диапазоне температур от 223 до 250 К. Приведен обзор методов экспериментального исследования значения коэффициента сжимаемости газовых сред и подходов, применяемых для организации их аппаратного оформления. Предложена методика проведения эксперимента и, обработки результатов измерений для определения коэффициента сжимаемости и приведено описание экспериментального стенда, разработанного для проведения эксперимента. Представлена характеристика измерительного оборудования, входящего в состав стенда. Проведена оценка погрешности предлагаемой методики посредством ее апробации на средах, для которых значения коэффициента сжимаемости известны в широком диапазоне температур и давлений: воздухе, азоте, аргоне, метане. Результаты апробации представлены в виде отклонений экспериментально полученных данных от значений коэффициента сжимаемости, опубликованных в литературных источниках. Результаты тестирования методики на воздухе продемонстрировали неопределенность Z в пределах $(0,025 \pm 0,045) \%$, при тестировании методики на азоте, аргоне, метане неопределенность результатов составила $(-0,02 \pm 0,04) \%$, $(0 \pm 0,04) \%$ и $(-0,01 \pm 0,07) \%$ соответственно. Полученные в ходе экспериментов значения коэффициента сжимаемости имеют удовлетворительное согласование со сведениями, приведенными в литературных источниках. Хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными, полученное для чистых газов и воздуха, показывает, что разработанная методика экспериментального определения коэффициента сжимаемости надежна, обладает необходимой точностью и, следовательно, может быть использована для экспериментального исследования значений Z природного газа различного компонентного состава в диапазоне температур от 223 до 250 К.

Ключевые слова: коэффициент сжимаемости, методика, экспериментальный стенд, отрицательные температуры, достоверность результатов измерений.

Введение

Вопросы учета природного газа в настоящее время характеризуются высокой актуальностью. Определение количества поставляемого природного газа производится на основании уравнения состояния, в состав которого входит коэффициент сжимаемости. На определение коэффициента сжимаемости было направлено большое количество исследований, благодаря которым в настоящее время известны высокоточные значения данного параметра в диапазоне изменения давления от 0,1 до 5,0 МПа и температур от 250 К [1, 2]. Достигнутая в настоящее время погрешность определения коэффициента сжимаемости для указанного диапазона условий оценивается в интервале от 0,1 до 0,4 %. Однако активная разработка северных месторождений и широкое использование сжиженного природного газа обуславливают целесообразность проведения исследований для более низких температур. Согласно данным, приведенным в СП 131.13330.2012, температура в ряде регио-

нов Российской Федерации в зимний период может достигать значений минус 50 °С. Поэтому задача определения коэффициента сжимаемости в диапазоне изменения температур от 223 до 250 К представляет большой практический и научный интерес. Вопрос подбора или разработки методического и аппаратного оформления эксперимента является первым этапом решения данной задачи.

Целью настоящей работы является разработка методического и аппаратного обеспечения эксперимента по определению коэффициента сжимаемости газовых сред.

Используемые подходы, материалы и методы

Ключевыми методами исследования, представленного в настоящей статье, является сопоставительный анализ, разработка и физическая реализация прототипа экспериментальной установки, тестирование установки посредством проведения эксперимента по определению коэффициента сжимаемости сред с известными значениями Z .

Средства экспериментального определения коэффициента сжимаемости

Наиболее распространенные подходы к организации экспериментального исследования коэффициента сжимаемости могут быть разделены на группы (рис. 1), включающие разнообразные модификации пьезометров постоянного и переменного объема, а также методов гидростатического взвешивания.

Принцип метода измерения сжимаемости пьезометрами постоянного объема сводится к измерению давления в помещенном в термостат с известной температурой пьезометре известной емкости, содержащем известное количество газа. Вариации касаются фиксируемого параметра: при постоянном количестве вещества варьируют температуру термостата [3, 4], при постоянной температуре выпускают часть газа в измерительную систему [5, 6]. Во всех случаях определяющим является точное измерение давления, температуры, количества вещества и поддержание температуры в термостате. При гравиметрическом методе [7] информацию о количестве газа получают

в результате непосредственного взвешивания. Пьезометры постоянной емкости с электромагнитной мешалкой часто применяют в установках для одновременного изучения фазового и объемного поведения растворов [8, 9].

Суть методов, реализованных на основе пьезометров переменной емкости, заключается в сжатии газа в сосуде посредством изменения объема последнего. Объем изменяют различными способами: нагнетанием в сосуд ртути, введением поршня и т. д. Методы могут быть подразделены на методы с постоянным [10–13] и изменяющимся количеством исследуемого вещества [14, 15]. К методам определения сжимаемости в пьезометрах переменной емкости можно отнести и всю группу методов, применяемых для определения параметров пластовой нефти [16], а также метод измерения соотношений $P-V-T$ при помощи установок адиабатического сжатия, применяемых для определения сжимаемости газа при очень высоких давлениях и температурах [17, 18].



Рис. 1. Методы экспериментального определения коэффициента сжимаемости газа

Fig. 1. Gas compressibility coefficient empirical determination methods

Методы гидростатического взвешивания основаны на определении изменения веса поплавка, погруженного в исследуемую среду, при вариации ее

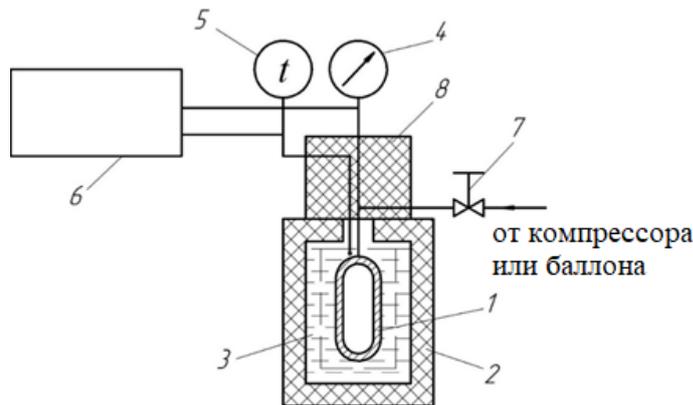
плотности. Расчет коэффициента сжимаемости реализуется на основе известных объема и веса поплавка при давлении и температуре опыта [19, 20].

Основное различие при реализации данного метода заключается в устройстве для взвешивания поплавка. В [21] приведена методика определения непрерывного определения коэффициента сжимаемости газов, характеризующая, тем не менее, достаточно высокой результата измерений в диапазоне от 0,7 до 2,6 %. Анализ представленных в литературных источниках методов показывает, что для исследования коэффициента сжимаемости природного газа целесообразно разработать собственное решение, характеризую-

щее простотой конструкции, надежностью и обеспечивающее необходимую точность измерения.

Описание экспериментального стенда

В основе конструкции экспериментального стенда лежит пьезометр постоянной емкости (рис. 2), располагаемый в цилиндрическом термостате переливном прецизионном ТПП-1.3 объемом 8 л с нестабильностью поддержания температуры в пределах $\pm 0,01$ °С, рабочей жидкостью которого является этиловый спирт.



- 1 – пьезометр, 2 – термостат,
3 – спирт, заполняющий термостат
4 – датчик давления
5 – датчик температуры
6 – компьютер с устройством сопряжения
7 – игольчатый вентиль
8 – теплоизоляция

Рис. 2. Схема экспериментального стенда

Fig. 2. Experimental bench diagram

Принудительная циркуляция спирта в термостате обеспечивает неравномерность распределения температуры в рабочей области в пределах $\pm 0,01$ °С. Отношение объемов соединительных капилляров и вентилей к объему пьезометра находится в пределах 0,03 %. Для минимизации неопределенности результата в конструкции стенда предусмотрена теплоизоляция термостата, элементов подвода газа к пьезометру и датчику давления, а также произведена калибровка термометра и датчика давления с помощью эталонных средств, в результате которой основная допускаемая приведенная погрешность применяемых средств измерения давления установилась в пределах $\pm 0,025$ %, а абсолютная погрешность температуры – в пределах $\pm 0,025$ °С.

Методика измерения

Поскольку экспериментальный стенд основан на методе постоянного объема, процесс измерений включает определение температуры и давления, связанных выражением

$$pV = ZmRT, \quad (1)$$

где p – абсолютное давление газа; V – объем пьезометра; Z – коэффициент сжимаемости; m – масса газа, заключенного в пьезометре; R – индивидуальная газовая постоянная; $R = R_0/M$, $R_0 = 8.3144598$ Дж/Моль·К – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; M – молярная масса.

Согласно (1), при наличии известного значения коэффициента сжимаемости при каких-либо услови-

ях становится возможным его вычисление при других условиях без непосредственного измерения массы и объема газа:

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{pV}{mRT} \left(\frac{mRT}{pV} \right)_0. \quad (2)$$

В уравнении (2) индекс «0» соответствует условиям, при которых коэффициент сжимаемости известен. Приведем уравнение (2) к виду

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{pT_0}{p_0T} \frac{(mR)_0}{mR} \frac{V}{V_0}$$

или

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{pT_0}{p_0T} k_w k_{pT}, \quad (3)$$

где k_w , k_{pT} – поправки на изменение массы и состава газа и на изменение объема пьезометра, вызванное изменением температуры и давления относительно опорных условий соответственно:

$$k_w = \frac{(mR)_0}{mR}.$$

Поправка на тепловое изменение объема:

$$k_T = \frac{V}{V_0} = 1 + 3\alpha(T_0 - T),$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения.

Из (3) следует, что расчетная зависимость для определения коэффициента сжимаемости газа может быть представлена в виде

$$Z = Z_0 \frac{pT_0}{p_0T} k_w k_{pT}. \tag{4}$$

Таким образом, для определения Z газа при текущих условиях необходимо провести непосредственное измерение только двух параметров – температуры и давления в реальных условиях – и учесть поправку на изменение массы и состава газа, которое может быть связано с конденсацией влаги, а также поправку на изменение объема пьезометра, обусловленное тепловой и механической деформацией.

Процесс измерения подразумевает измерение температуры жидкости термостата и давления газа в пьезометре, производимые после выдержки заполненного газом пьезометра в термостате в течение достаточного времени с учетом тепловой инерционности системы. Поскольку неравномерность распределения поля температур в термостате незначительна (в пределах $\pm 0,01$ °C), а выдержка пьезометра в термостате производилась с учетом тепловой инерционности системы, вынос точки отбора в данном случае оправдан, а создаваемая дополнительная погрешность составляет 0,004 %.

Оценка тепловой инерционности проведена решением уравнения теплового баланса:

$$C_p \rho V \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{\Delta T}{r}, \tag{5}$$

где C_p – теплоемкость; λ – теплопроводность; T_c – температура стенок пьезометра; V – объем пьезометра.

Для цилиндрического пьезометра радиуса r и длины l постоянная времени τ :

$$\tau = \frac{\lambda}{\rho C_p r^2}.$$

Постоянная времени зависит от значения давления и в рамках представляемых исследований составляет 500–1500 с, при этом длительность выхода на стационарный режим составляет не менее 3 τ . На каждой заправке пьезометра проводи-

лась серия измерений, при этом анализировался тренд изменения давления. Постоянный тренд в изменении давления в пьезометре свидетельствовал о необходимости увеличения длительности выдержки до стабилизации давления.

Оценка погрешности метода

Относительная неопределенность при применении зависимости (3) может быть выражена в виде

$$u_\zeta = \sqrt{(2\theta_p^2 + \theta_{kp}^2)u_p^2 + (2\theta_T^2 + \theta_{kT}^2)u_T^2},$$

где u_p, u_T – неопределенности измерения давления и температуры соответственно; $\theta_p, \theta_T, \theta_{kp}, \theta_{kT}$ – коэффициенты влияния.

Ввиду большого количества экспериментальных данных для каждой точки (регистрация от 1500 до 2000 комплектов значений p - T) случайной составляющей неопределенности в данном случае можно пренебречь. В этом случае расширенная неопределенность u_{z/z_0} при уровне доверительной вероятности 0,95 составляет 0,04 %.

Апробация методики

Для подтверждения применимости предлагаемой методики было проведено ее тестирование на средах, для которых значение коэффициента сжимаемости известно в широком диапазоне условий – азоте, аргоне, метане, воздухе (рис. 3). В соответствии с уравнением (3) по результатам измерения давления и температуры в двух точках можно определить отношение коэффициентов сжимаемости Z/Z_0 . Величина относительной погрешности измерений

$$\delta_{Z/Z_0} = \left[1 - \frac{(Z/Z_0)_{\text{эксп}}}{(Z/Z_0)_{\text{теор}}} \right] \cdot 100\%,$$

где индекс «эксп» относится к величинам, полученным с применением предлагаемой методики, «теор» – к опубликованным ранее данным.

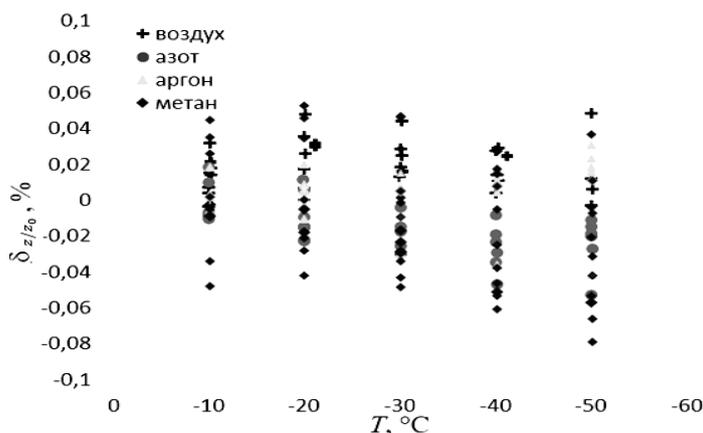


Рис. 3. Результаты апробации на чистых средах и воздухе

Fig. 3. Results of testing on clean media and air

Результаты тестирования методики на воздухе продемонстрировали неопределенность Z в пределах $(0,025 \pm 0,045)$ %, при тестировании методики на азоте,

аргоне, метане неопределенность результатов составила $(-0,02 \pm 0,04)$ %, $(0 \pm 0,04)$ % и $(-0,01 \pm 0,07)$ % соответственно. Полученные в ходе экспериментов значе-

ния коэффициента сжимаемости имеют удовлетворительное согласование со сведениями, приведенными в литературных источниках [22–26], что подтверждает возможность ее применения для экспериментального исследования Z природного газа.

Заключение

Основным результатом настоящей работы является комплексное решение, включающее экспериментальный стенд и методику косвенного расчета значений коэффициента сжимаемости газа. Преимуществами предлагаемого решения является простота реализации как аппаратной, так и расчетной составляющей экспериментов, а также высокая точность получаемых значений коэффициента сжимаемости. Результаты апробации методики демонстрируют ее применимость для газовых сред различных составов, а следовательно, возможность ее использования для получения достоверных сведений о значениях коэффициента сжимаемости природного газа, в том числе в диапазоне значений температур ниже 250 К. Дополнение современной справочной документации данными о значениях Z природного газа, в свою очередь, имеет высокую значимость для практики в области расходомерии, а также вычислительной газовой динамики, теплоэнергетики, компрессоростроения и ряда других областей науки и техники.

Библиографические ссылки

1. Коэффициент сжимаемости природного газа расчетного состава / Д. Н. Китаев, Д. О. Недобезжкин, В. М. Богданов, Т. Бейманов // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 1 (14). С. 29–33.
2. Kunz O., Wagner W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004 // Journal of Chemical & Engineering Data. 2012. № 57. P. 3032–3091.
3. Головский Е. А., Цымарный В. А., Яковлев Г. Д. Пьезометр для измерения объема химически активных веществ // Приборы и техника эксперимента. 1967. № 5. С. 249–250.
4. Цымарный В. А. Экспериментальное исследование P - V - T зависимости четырехоксида азота // Физика высоких температур. 1967. № 3. С. 541–543.
5. Malbrunot V. V. Appareillage pour la mesure des paramètres d'état des gaz a hautes pressions et hautes temperatures // High Temperature – High Pressure. 1971. Vol. 3, № 2. P. 225–236.
6. Вукалович М. П., Алтунин В. В. Экспериментальное исследование зависимости P - V - T -углекислоты // Теплоэнергетика. 1959. № 11. С. 58–65.
7. Билевич А. В., Верещагин Л. Ф., Калашников Я. А. Пьезометр для определения плотности газов при высоких температурах // Приборы и техника эксперимента. 1961. № 3. С. 146–151.
8. Циклис Д. С., Поляков Е. В. Измерение сжимаемости газов методом вытеснения. Сжимаемость азота при давлениях до 10000 ат и температурах до 400° // Доклады академии наук СССР. 1967. Т. 176, № 2. С. 308–341.
9. Ходеева С. М., Лебедева Е. С., Белоусова З. С. Аппарат для исследования P - V - T соотношений газов и их смесей // Журнал физической химии. 1966. Т. 40. № 12. С. 3107–3110.
10. Сидоров И. П., Казарновская Д. Б. Определение сжимаемости газов при высоких температурах и давлениях // Труды ГИАП. Вып. 3. М.: Госхимиздат, 1954. С. 200–208.
11. Михайлова С. А., Сидоров И. П., Казарновская Д. Б. Термодинамические свойства газообразного метанола при высоких температурах и давлениях // Журнал химической промышленности. 1965. № 7. С. 506–508.
12. Basset J. J. Phys. et la rad. suppl., 1954. Vol. 15. № 1. P. 47A.
13. Michels A., Wassenaar T., Zwietering T. N. The experimental determination of the equation of state data of gases at temperatures between 0 °C and –180 °C // Physica. 1952. Vol. 18. P. 67–73.
14. Трибус Н. А., Виноградов Н. Исследование нефти и газа в пластовых условиях. Баку: Азнефтиздат, 1955. 288 с.
15. Циклис Д. С., Родина М. Д. Электромагнитный метод измерения скорости движения поршня в адиабатической установке // Приборы и техника эксперимента. 1968. № 1. С. 190–191.
16. Циклис, Д. С., Линищ Л. Р., Родкина И. Б. Измерение молярных объемов газов и газовых смесей при высоких давлениях // Журнал физической химии. 1966. Т. 40, № 11. С. 2823–2828.
17. Babb S. E., Scott G. J., Robertson S. L. Apparatus for PVT measurements of gases to 10 kilobars // Review of Scientific Instruments. 1969. Vol. 40, № 50. P. 670–675.
18. Сорина Г. А., Ефремова Г. Д. Установка с визуальным наблюдением для исследования P - V - T -соотношений в критической области // Журнал физической химии. 1966. Т. 40, № 1. С. 264–266.
19. Ехлаков А. Д., Родионов И. Л. Гидростатический метод измерения сжимаемости жидкости под высоким давлением // Физика металлов и металловедение. 1960. Т. 9. С. 932–943.
20. Разумихин В. Н. Гидростатический метод определения плотности жидкостей при давлениях до 5000 кгс/см² // Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. 1960. Т. 46 (106). С. 96–106.
21. Метод и техника непрерывного определения коэффициента сжимаемости газов / Д. В. Гришин, Г. С. Голод, И. Н. Москалев, Г. А. Деревягин, Д. А. Хапов, В. В. Кочнев // Средства измерения, автоматизации, телемеханизации и связи. 2016. № 1. С. 11–20.
22. Лапшин В. И., Волков А. Н., Шафиев И. М. Коэффициент сжимаемости газов и газоконденсатных смесей: экспериментальное определение и расчеты. ООО «Газпром ВНИИГАЗ». URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-szhimaemosti-gazov-i-gazokondensatnyh-smesey-eksperimentalnoe-opredelenie-i-raschety>.
23. Термодинамические свойства азота / В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный. М.: Изд-во стандартов, 1977. 352 с.
24. Термодинамические свойства воздуха / В. В. Сычев, А. А. Вассерман, А. Д. Козлов, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный // ГСССД. Серия монографии. М.: Изд-во стандартов, 1978. 276 с.
25. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
26. Термодинамические свойства метана: ГСССД. Серия монографий / В. В. Сычев, А. А. Вассерман, В. А. Загорученко, А. Д. Козлов, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный. М.: Изд-во стандартов, 1979. 348 с.

References

1. Kitaev D.N., Nedobezhkin D.O., Bogdanov V.M., Bejmanov T., Kitaev D.N. [Compressibility coefficient of natural gas of calculated composition] *Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii*, 2019, no 1, pp. 29–33 (in Russ.).
2. Kunz, O., Wagner, W. [The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An ex-

pansion of GERG-2004]. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012. No. 57. Pp. 3032-3091.

3. Golovskij E.A., Cymarnyj V.A., YAKovlev G.D. [Piezometer for measuring the volume of chemically active substances]. *Pribory I tekhnika eksperimenta*, 1967. no 5. P. 249-250 (in Russ.).

4. Cymarnyj V.A. [Experimental study of the P-V-T relationship of nitrogen tetroxide]. *Fizika vysokih temperature*, 1967. No 3. Pp. 541-543 (in Russ.).

5. Malbrunot V.B. [Appareillage pour la mesure des paramètres d'état des gaz a hautes pressions et hautes temperatures]. *High Temperature – High Pressure*. 1971. Vol. 3, no 2. Pp. 225-236.

6. Vukalovich M.P., Altunin V.V. Eksperimental'noe issledovanie zavisimosti P-V-T-uglekisloty // *Teploenergetika*. 1959. No. 11. Pp. 58-65 (in Russ.).

7. Bilevich A.V., Vereshchagin L.F., Kalashnikov YA.A. [Piezometer for determining the density of gases at high temperatures]. *Pribory I tekhnika eksperimenta*. 1961. № 3. P. 146-151(in Russ.).

8. Ciklis, D. S., Polyakov E. V. [Measuring the compressibility of gases using the displacement method. Compressibility of nitrogen at pressures up to 10,000 atm and temperatures up to 400°]. *Doklady akademii nauk SSSR*, 1967. Vol. 176, no 2. Pp. 308-341 (in Russ.).

9. Hodeeva S.M., Lebedeva E.S., Belousova S. [Apparatus for studying P-V-T ratios of gases and their mixtures]. *ZHurnal fizicheskoy himii*, 1966. Vol. 40, no 12. Pp. 3107-3110 (in Russ.).

10. Sidorov I.P., Kazarnovskaya D.B. [Determination of gas compressibility at high temperatures and pressures]. *Trudy GIAP*, 1954. Vol. 3. Pp. 200-208 (in Russ.).

11. Mihajlova S.A., Sidorov I.P., Kazarnovskaya D.B. [Thermodynamic properties of gaseous methanol at high temperatures and pressures]. *ZHurnal himicheskoy promyshlennosti*, 1965. No 7. Pp. 506-508 (in Russ.).

12. Basset J.J. *Phys. et la rad. suppl.*, 1954. Vol. 15. no 1. P.47A.

13. Michels A., Wassenaar T., Zwietering T. N. [The experimental determination of the equation of state data of gases at temperatures between 0 °C and –180 °C]. *Physica*, 1952. Vol. 18. Pp. 67-73.

14. Trivus N.A., Vinogradov N. *Issledovanie nefi I gaza v plastovyh usloviyah* [Research of oil and gas in reservoir conditions]. Baku: Azneftizdat, 1955. 288 p. (in Russ.).

15. Ciklis D.S., Rodina M.D. [Electromagnetic method for measuring the speed of piston movement in an adiabatic installation]. *Pribory I tekhnika eksperimenta*. 1968. No 1. Pp. 190-191 (in Russ.).

16. Ciklis D.S., Linshic L.R., Rodkina I.B. [Measurement of molar volumes of gases and gas mixtures at high pressures]. *ZHurnal fizicheskoy himii*, 1966. Vol. 40, no 11. Pp. 2823-2828 (in Russ.).

17. Babb S.E., Scott G.J., Robertson S.L. [Apparatus for PVT measurements of gases to 10 kilobars]. *Review of Scientific Instruments*. 1969. Vol. 40, no 50. Pp. 670-675.

18. Sorina G.A., Efremova G.D. [Installation with visual observation for studying P-V-T relationships in the critical region]. *ZHurnal fizicheskoy himii*. 1966. Vol. 40, no 1. Pp. 264-266 (in Russ.).

19. Ekhlakov A.D., Rodionov I.L. [Hydrostatic method for measuring the compressibility of liquids under high pressure]. *Fizika metallov I metallovedenie*. 1960. Vol. 9. Pp. 932-943.

20. Razumihin V.N. [Hydrostatic method for determining the density of liquids at pressures up to 5000 kgf/cm²]. *Trudy instituta Komiteta standartov, mer i izmeritel'nyh priborov*. 1960. Vol. 46. Pp. 96-106 (in Russ.).

21. Grishin D.V., Golod G.S., Moskalev I.N., Derevyagin G.A., Hapov D.A., Kochnev V.V. [Method and technique for continuous determination of the compressibility coefficient of gases]. *Avtomatizaciya, telemekhanizaciya I svyaz' v nefyanoj promyshlennosti*, 2016, no 1, pp. 11-20 (in Russ.).

22. Lapshin V.I., Volkov A.N., SHafiev I.M. *Koeffitsient szhimaemosti gazov I gazokondensatnyh smesey: eksperimental'noe opredelenie I raschety* [Compressibility coefficient of gases and gas-condensate mixtures: experimental determination and calculations. Gazprom VNIIGAZ LLC.]. OOO «Gazprom VNIIGAZ». Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-szhimaemosti-gazov-i-gazokondensatnyh-smesey-eksperimentalnoe-opredelenie-i-raschety> (in Russ.).

23. Sychev V.V. etc. *Termodinamicheskie svojstva azota* [Thermodynamic properties of nitrogen]. GSSSD. *Seriyamono-grafii*. M.: Izd. Standartov, 1977. 352 p. (in Russ.).

24. Sychev V.V. etc. *Termodinamicheskie svojstva vozduha* [Thermodynamic properties of air]. GSSSD. *Seriyamono-grafii*. M.: Izd. Standartov, 1978. 276 p. (in Russ.).

25. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej* [Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids]. M.: Nauka Publ., 1972. 720 p. (in Russ.).

26. Sychev V. V. *Termodinamicheskie svojstva metana: GSSSD. Seriya monografii* [Thermodynamic properties of methane: GSSSD. Series of monographs]. M.: Izdatel'stvo standartov, 1979. 348 p. (in Russ.).

* * *

Procedure for Natural Gas Compressibility Factor Determination

R. I. Ganiev, PhD in Engineering, Head of Advanced Development Department Metrological Center STP, Associate Professor, Department of Automation and Process Control Systems, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

D. Yu. Kutovoy, Deputy Head of the Department for Implementation and Operation of ASKUG and Metrology, Gazprom Mezhregiongaz LLC, Kazan, Russia

V. A. Fafurin, DSc. in Engineering, Professor, Department of Automated Information Collection and Processing Systems, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

M. L. Shustrova, PhD in Engineering., Associate Professor, Department of Automated Information Collection and Processing Systems, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

V. B. Yavkin, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Reactive Engines and Power Plants, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

The article is devoted to the development of an experimental stand and a methodology for experimental determination of the gas compressibility factors, to ensure the possibility of obtaining reliable information about the values of natural gas compressibility factor within the temperature range 223 - 250 K. An overview of empirical assessment methods of the compressibility factor values of gas media and approaches used to organize the hardware design of experimental studies is given. The method of compressi-

bility factor determination is proposed and the description of the developed experimental stand is given. The error of the proposed method was assessed by testing in media with known compressibility factors in a wide range of temperatures and pressures: air, nitrogen, argon, methane. The test results are presented in the form of experimentally obtained data deviations from the compressibility factor values published in literature. The air compressibility factor uncertain values obtained as a result of the study are in the range (-0.02 - 0.07%), for nitrogen – (-0.06 - 0.02%), for argon – (- 0.04 - 0.04%), for methane – (-0.08 - 0.06%). The obtained empirical values are taken satisfactory with the information given in literary sources. The good agreement of the experimental and design data obtained for pure gases and air shows that the developed method of compressibility factor experimental determination is reliable, has the required accuracy and can be used to determine the natural gas compressibility factor of various component composition.

Keywords: compressibility factor, methodology, experimental stand, negative temperatures, reliability of measurement results.

Получено: 18.07.23

Образец цитирования

Методика определения коэффициента сжимаемости природного газа / Д. Ю. Кутовой, Р. И. Ганиев, В. А. Фафурин, М. Л. Шустрова, В. Б. Явкин // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-4-10.

For Citation

Ganiev R.I., Kutovoy D. Yu., Fafurin V. A., Shustrova M. L., Yavkin V. B. [Procedure for Natural Gas Compressibility Factor Determination]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 4-10 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-4-10.