

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КАМЕРЫ ДЛЯ СЖАТИЯ ГАЗОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭФФУЗИОННОГО АНАЛИЗАТОРА ПЛОТНОСТИ ГАЗОВ С УБЫВАЮЩИМ ДАВЛЕНИЕМ ИСТЕЧЕНИЯ

Л.В. ИЛЯСОВ¹, д-р техн. наук, С.Ю. ЖИГУЛИН², инженер,
Н.И. ИВАНОВА¹, канд. техн. наук

¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

²ООО «НПЦ “Система”», 170039, Тверь,
ул. П. Савельевой, д. 64, e-mail: shtazig@mail.ru

© Илясов Л.В., Жигулин С.Ю., Иванова Н.И., 2021

Статья посвящена результатам исследования теплового режима камеры для сжатия газов эффузионного анализатора плотности газов. Приведены математическое описание эффузионного преобразователя плотности газов и принятые при его разработке допущения. Описана экспериментальная установка для исследований теплового режима камеры для сжатия газов эффузионного анализатора плотности газов и ее работа. Представлены результаты измерений температуры в камере анализатора во время экспериментальных исследований, имитирующих процесс работы анализатора, на разработанной установке для ряда газов. Определены максимальное изменение температуры в ходе анализа и продолжительность процесса, сделаны выводы о влиянии изменения температуры на точность измерений плотности газов разработанным анализатором и о необходимости использования системы стабилизации температуры в конструкции эффузионных анализаторов плотности газов.

Ключевые слова: эффузионный анализатор, плотность, газ, математическое описание, температура.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-84-92

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых удобных и экологичных видов топлив является природный газ. Он также находит широкое применение в качестве сырья при производстве удобрений, красок и различных полуфабрикатов. Не в меньшей степени в различных отраслях промышленности используются и другие газы.

При добыче, переработке, транспортировке и производстве различных газов и газовых смесей важным является определение их плотности как на потоках, так и при лабораторном контроле.

Наиболее широко применяемыми принципами контроля плотности газов при лабораторном контроле на сегодняшний день являются пикнометрический [1–3] и хроматографический [3–5], при этом известен и ряд других [6–13]. Измерение плотности газов пикнометрами – приборами, основанными на пикнометрическом методе контроля, занимает довольно большой промежуток времени и требует сложных подготовительных операций. Определение плотности газов путем хроматографического анализа применяется в основном только для контроля плотности природных газов и к тому же требует использования дорогостоящего оборудования.

В ходе многочисленных исследований на кафедре автоматизации технологических процессов Тверского государственного технического университета было выявлено, что приборы для лабораторного контроля плотности газов, основанные на другом принципе контроля – эффузионном, являются более удобными, простыми по сравнению с указанными выше и при этом не менее точными.

В результате исследований эффузионных средств контроля плотности газов был разработан компьютерный эффузионный анализатор плотности газов. Для измерения давления газов в процессе истечения в нем использовался высокоточный пьезорезистивный датчик давления, сигнал которого подвергался компьютерной обработке [14]. В ходе разработки данного анализатора было создано и экспериментально проверено математическое описание эффузионного преобразователя плотности газов [15], которое имеет вид:

$$P = \frac{e^{\frac{\tau\sqrt{T}}{\sqrt{\rho_n}A}} (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0})^2 + 2e^{\frac{\tau\sqrt{T}}{\sqrt{\rho_n}A}} (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0}) P_a + P_a^2}{4e^{\frac{\tau\sqrt{T}}{\sqrt{\rho_n}A}} (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0})} ;$$

$$A = -\frac{Vv_\mu}{R_\mu \alpha F \sqrt{2 \frac{T_n}{P_n}}} ; \quad \tau = -\frac{Vv_\mu \sqrt{\rho_n}}{R_\mu \alpha F \sqrt{2 \frac{T_n T}{P_n}}} \cdot \ln \left| \frac{2P - P_a + 2\sqrt{P^2 - P_a P}}{2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0}} \right| , \quad (1)$$

где τ – время, прошедшее с момента начала истечения; ρ_n – плотность газа в нормальных условиях; P_a – атмосферное давление; F – площадь поперечного сечения диафрагмы; P_0 – абсолютное давления газа в начале истечения; P – абсолютное давления газа через время τ с момента начала истечения; α – коэффициент расхода диафрагмы; T_n и P_n – абсолютные температура и давление газа в нормальных условиях.

При разработке данного математического описания были приняты следующие допущения:

- процесс уменьшения давления в камере для сжатия газов изотермический;
- сжимаемостью газа можно пренебречь;
- вместимость камеры для сжатия газов постоянна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проверки правильности допущения об изотермическом характере истечения газов из анализатора, а также для принятия обоснования решения о наличии или отсутствии необходимости системы стабилизации температуры газа в анализаторе были проведены экспериментальные исследования, которые выполнялись на установке, описанной в работе [8]. Данная экспериментальная установка (рис. 1) содержала камеру для сжатия газов 1, выполненную в виде разделенного перегородками на несколько последовательных сообщающихся камер стального цилиндра с внутренним объемом 350 мл. Выход камеры для сжатия газов через тройник 2 сообщался с входами измерительной камеры датчика давления 3 и микродиафрагмы 4. На выходах измерительной камеры датчика давления и микродиафрагмы, изготовленной из тонкой алюминиевой фольги, располагались пневмотумблеры 5 и 6. К измерительной камере

был подключен пьезорезистивный датчик давления 7, сигнал с которого после усиления усилителем 8 и преобразования аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 9 поступал на компьютер 10. К входу камеры для сжатия газов через пневмотумблер 11 был подключен микрокомпрессор 12, соединенный с линией для подачи газа 13. Дополнительно установка содержала хромель-копелевую термопару 14, помещенную в камеру для сжатия газов и соединенную с потенциометром 15.

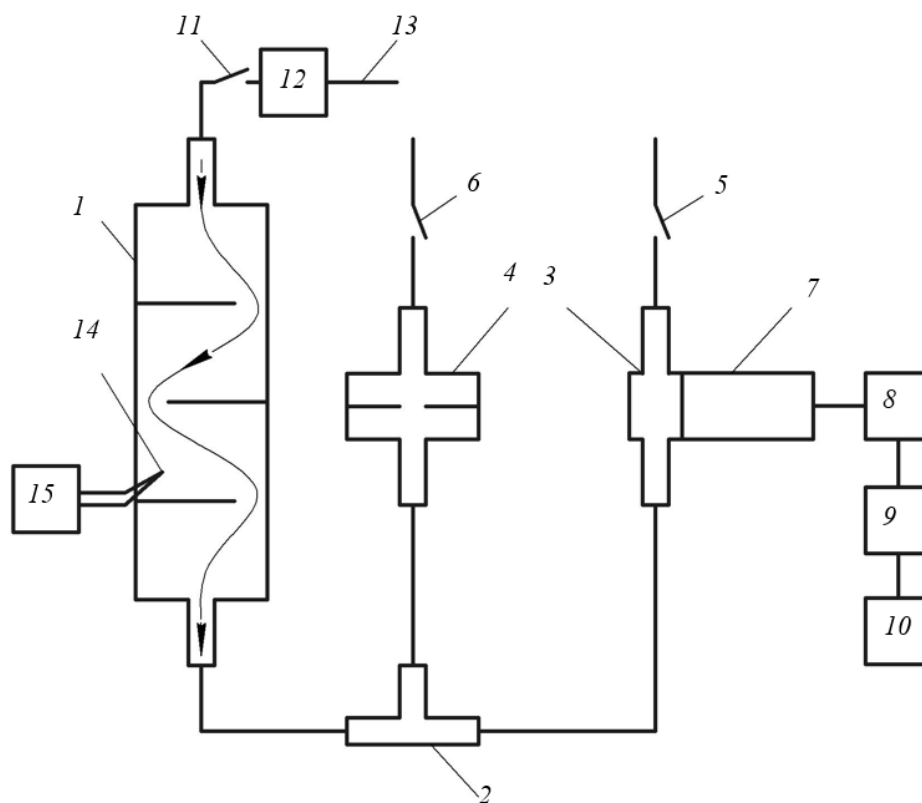


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования теплового режима в камере для сжатия газов эффузионного анализатора плотности газов

Проверка правильности допущения об изотермическом характере истечения газа из анализатора на описанной установке осуществлялось следующим образом. К линии для подачи газа подсоединялась емкость с анализируемым газом. С помощью пневмотумблера 11 микрокомпрессор соединялся с входом камеры для сжатия газов, а с помощью пневмотумблеров 5 и 6 выходы микродиафрагмы и измерительной камеры датчика давления соединялись с атмосферой. Затем включался микрокомпрессор, и анализируемый газ перекачивался из емкости с анализируемым газом через емкость для сжатия газов, микродиафрагму и измерительную камеру в атмосферу и промывал их. По прошествии некоторого промежутка времени, достаточного для промывки, измерительная камера посредством пневмотумблера 6 и микродиафрагма с помощью пневмотумблера 5 отключались от атмосферы. Микрокомпрессор начинал создавать избыточное давление в камере для сжатия газов. При этом одновременно повышалось давление и в измерительной камере датчика давления. Давление непрерывно измерялось пьезорезистивным датчиком давления, сигнал которого усиливался усилителем и после преобразования в АЦП поступал на компьютер, на мониторе которого отображался в виде графика зависимости давления в измерительной камере датчика давления от времени. Одновременно с этим с помощью термопары и

потенциометра непрерывно измерялась и фиксировалась температура в камере для сжатия газов. При достижении в измерительной камере датчика давления заранее принятого значения избыточного давления (25 кПа) вход камеры для сжатия газов с помощью пневмотумблера 11 отключался от микрокомпрессора, после чего микрокомпрессор выключался. После установления в камере для сжатия газов постоянного значения температуры, равного температуре окружающей среды, а следовательно, после возвращения сигнала термопары к начальному уровню с помощью пневмотумблера 5 микродиафрагма соединялась с атмосферой и начиналось истечение газа, при этом давление в измерительной камере датчика давления начинало уменьшаться. В то же время начинала снижаться и температура в камере для сжатия газов. Информация о значении температуры в камере для сжатия газов также фиксировалась с помощью термопары и потенциометра. По окончании истечения газа и возвращении температуры в камере для сжатия газов к начальному значению ее измерение прекращалось.

По описанной методике исследовались процессы сжатия и истечения природного газа, пропан-бутановой смеси, углекислого газа, а также осушенного воздуха. Все исследования проводились в лаборатории при температуре окружающей среды 20 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2–5 в качестве примера показаны полученные в ходе экспериментальных исследований графики зависимости изменения температуры, которая измерялась термопарой, размещенной в камере для сжатия газов, от времени, а в таблице приведены обобщенные результаты исследования.

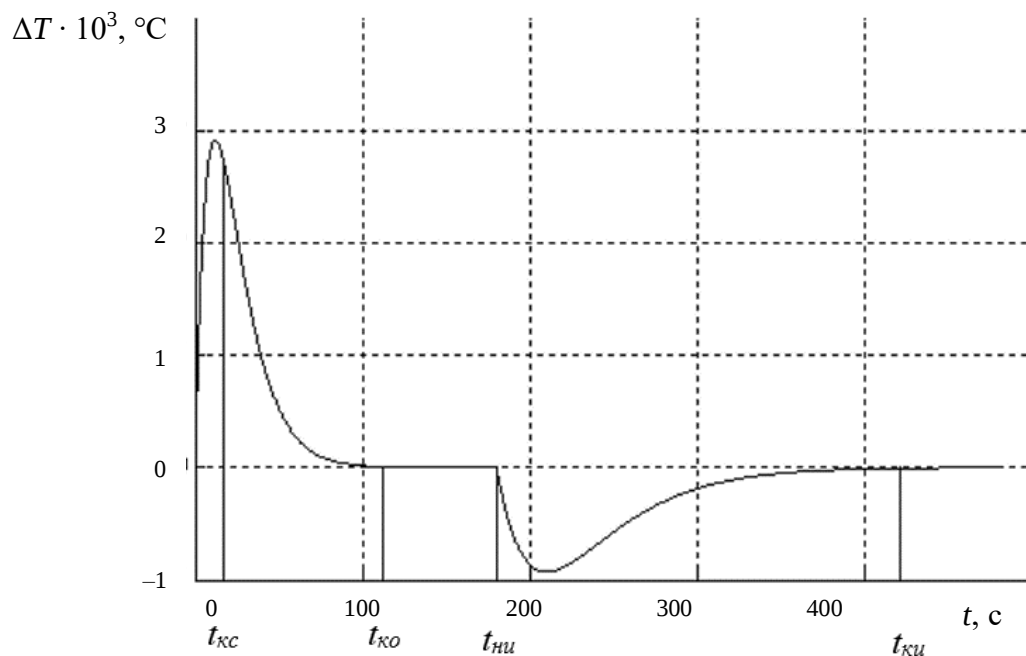


Рис. 2. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения осушенного воздуха

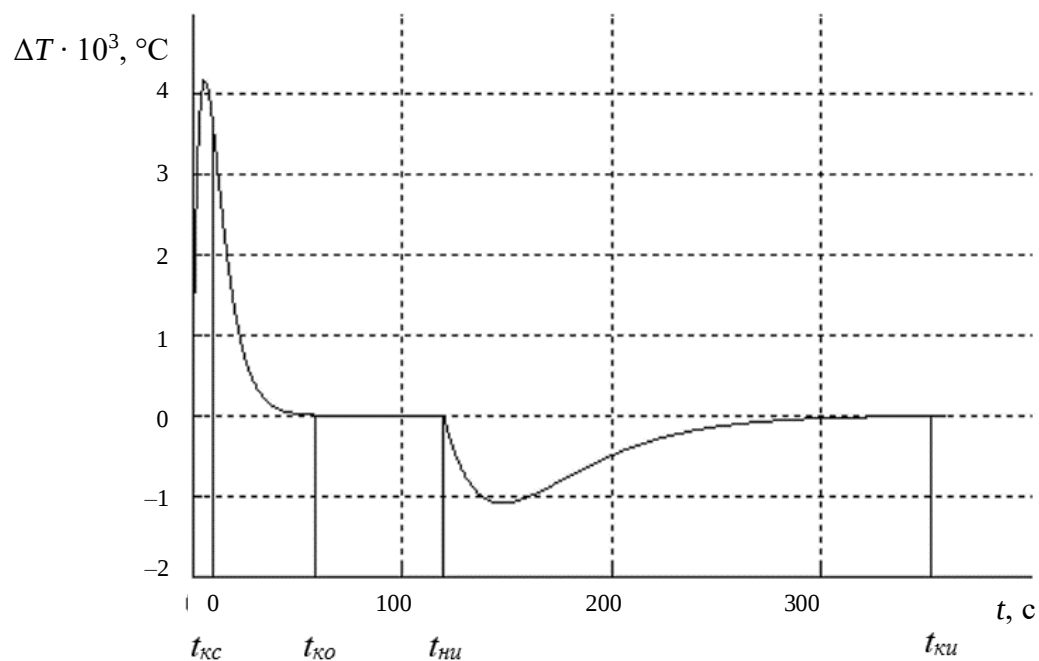


Рис. 3. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения природного газа

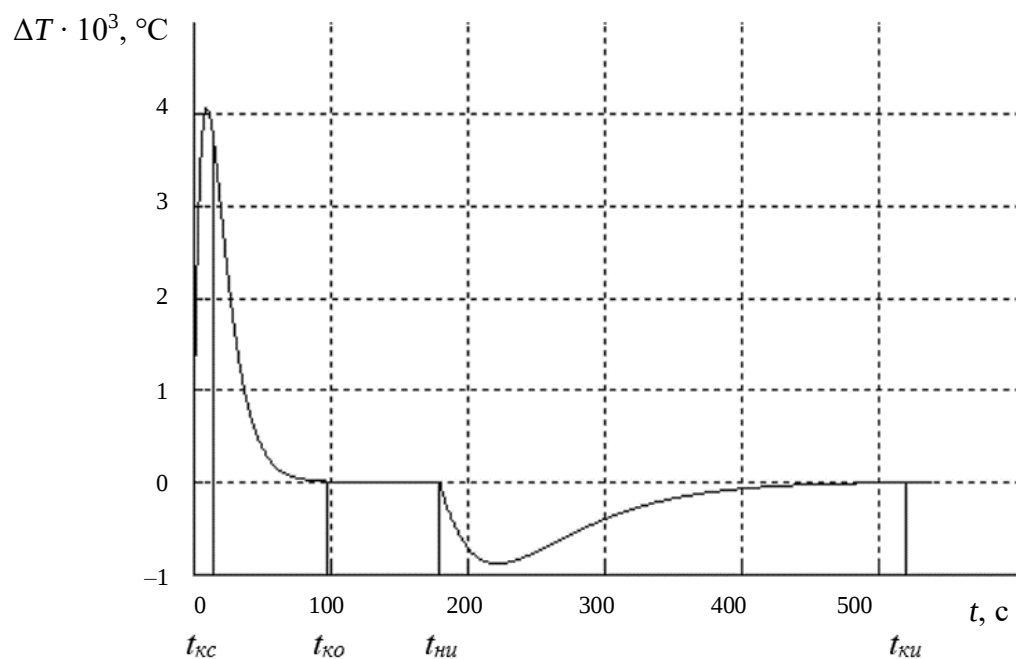


Рис. 4. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения технического углекислого газа

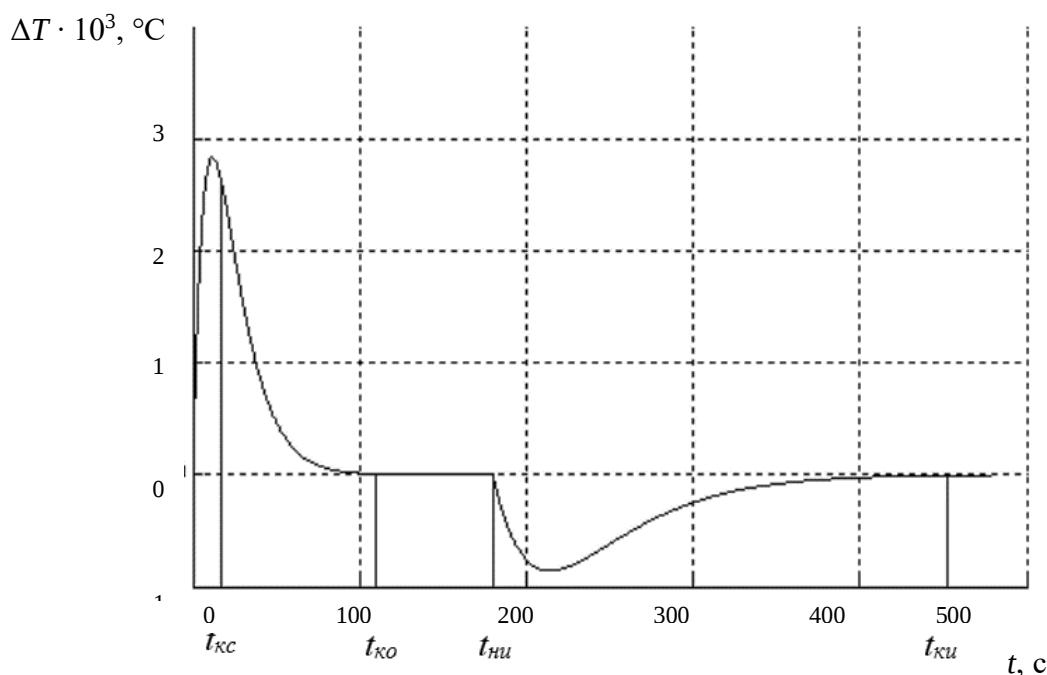


Рис. 5. График зависимости изменения температуры от времени в процессе истечения пропан-бутановой смеси

Результаты исследования

Газ	Время остывания газа до температуры окружающей среды с момента начала сжатия газа, с	Максимальное изменение температуры газа в процессе его истечения, °C
Осушенный воздух	112	0,93
Природный газ	58	1,09
Технический углекислый газ	97	0,88
Пропан-бутановая смесь	109	0,85
Среднее значение для всех исследованных газов	94	0,94

Как видно из графиков и таблицы, газ даже в отсутствии системы стабилизации температуры начинает остывать еще до окончания процесса сжатия (точка $t_{кс}$), а время окончания сжатия (точка $t_{кс}$) до установления постоянной температуры в камере для сжатия газов 1 (точка $t_{ко}$) не превышает 2 мин для всех исследованных газов. Результаты исследования также показывают, что температура в процессе истечения газов изменяется незначительно и практически одинакова для различных газов. Основные изменения температуры происходят в начале процесса истечения, в конце истечения температура газа практически не меняется; следовательно, если для определения плотности не использовать начальный участок кривой истечения, то изменением температуры можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о малом влиянии изменения температуры на точность измерения плотности газов эффузионными анализаторами плотности газов. Это свидетельствует о правильности принятого допущения об изотермическом характере истечения газа из камеры для сжатия газов, а также об отсутствии необходимости в системе стабилизации температуры в анализаторе, что позволяет существенно упростить его конструкцию и уменьшить размеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D. About pycnometric density measurements // *Talanta*. 2002. V. 57. № 3. P. 583–593.
2. Hwang C.A., Simon P.P., Hou H., Hall K.R., Holste J.C., Marsh K.N. Burnett and pycnometric (p, V_m, T) measurements for natural gas mixtures // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1997. V. 29. № 12. P. 1455–1472.
3. Хацкевич Е.А., Снегов В.С. Погрешности результатов измерений плотности природного газа пикнометрическим и расчетным методами // *Газовая промышленность*. 2011. № 5. С. 84–85.
4. Астахов А. Анализ физико-химических свойств природного газа // *Аналитика*. 2013. Т. 8. № 1. С. 40–45.
5. Клепча Р.Р. Методика проведения измерений потоковым хроматографом для ГИС с расширенным диапазоном изменений компонентного состава газа // *Автоматизация в промышленности*. 2013. № 6. С. 34–35.
6. Билинский И.И., Огородник К.В., Яремишена Н.А. Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. 2016. № 2. С. 10–23.
7. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: учебник. М.: Альянс, 2017. 456 с.
8. Сажин С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2012. 431 с.
9. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dashti F. A novel method for calculating natural gas density based on Joule Thomson coefficient // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. V. 26. P. 1018–1029.
10. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A. Measurement and evaluation of the gas density and viscosity of pure gases and mixtures using a micro-cantilever beam // *Sensors*. 2015. V. 15. № 9. P. 24318–24342.
11. Rosario R., Mutharasan R. Piezoelectric excited millimeter sized cantilever sensors for measuring gas density changes // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. V. 192. P. 99–104.
12. Khosravi A., Machado L., Nunes R.O. Estimation of density and compressibility factor of natural gas using artificial intelligence approach // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. V. 168. P. 201–216.
13. Ötügen M.V., Ganguly B. Laser heterodyne method for high-resolution gas-density measurements // *Applied optics*. 2001. V. 40. № 21. P. 3502–3505.
14. Жигулин С.Ю., Илясов Л.В. Экспериментальная установка для исследования компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. № 1 (33). С. 22–25.

15. Жигулин С.Ю., Илясов Л.В. Экспериментальная проверка математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения // *Измерительная техника*. 2020. № 3. С. 57–63.

Для цитирования: Илясов Л.В., Жигулин С.Ю., Иванова Н.И. Экспериментальное исследование теплового режима камеры для сжатия газов компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 84–92.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE GAS COMPRESSION CHAMBER THERMAL REGIME OF THE COMPUTER EFFUSION DECREASING DISCHARGE PRESSURE GAS DENSITY ANALYZER

L.V. ILYASOV¹, Dr. Sc., S.Yu. ZHIGULIN², engineer,
N.I. IVANOVA¹, Cand. Sc.

¹ Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: lvi450714@mail.ru

² Sistema Scientific and Production Center LLC, 170039, Tver,
st. P. Savelyeva, 64, e-mail: shtazig@mail.ru

The article is devoted to the results of the research of the gas compression chamber thermal regime of the computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer. The mathematical description of the effusion gas density transducer and its assumptions are given. An experimental setup for studying of the gas compression chamber thermal regime of the computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer and its operation is described. The results of temperature measurements in the analyzer chamber during experimental studies simulating the process of the analyzer operation on the developed installation for a number of gases are presented. The maximum temperature changes during the analysis process and its duration are determined, conclusions are drawn about the influence of temperature changes on the accuracy of gas density measurements by the developed analyzer and about the necessity to use a temperature stabilization system in the design of effusion gas density analyzers.

Keywords: effusion, analyzer, density, gas, computer, mathematical description, temperature.

REFERENCES

1. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D. About pycnometric density measurements. *Talanta*. 2002. No 57, pp. 583–593.
2. Hwang C.A., Simon P.P., Hou H., Hall K.R., Holste J.C., Marsh K.N. Burnett and pycnometric (p, V_m, T) measurements for natural gas mixtures. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1997. V. 29. No 12, pp. 1455–1472.
3. Khatskevich E.A., Snegov V.S. Errors of measurements of natural gas density using pycnometric and computational methods. *Gazovaia promyshlennost*. 2011. No 5, pp. 84–85. (In Russian).

4. Astakhov A. Analysis of the physico-chemical properties of natural gas. *Analitika*. 2013. V. 8. No 1, pp. 40–45. (In Russian).
5. Klepcha R.R. Measurement technique for flow chromatograph for GIS with an extended range of changes in the composition of the gas. *Avtomatizatsia v promyshlennosti*. 2013. No 6, pp. 34–35. (In Russian).
6. Bilinskii I.I., Ogorodnik K.V., Iaremishena N.A. Analysis of methods and means of measuring the density of petroleum products. *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No 2, pp. 10–23. (In Russian).
7. Farzane N.G. Ilyasov L.V., Azim-zade A.Yu. Tekhnologicheskiye izmereniya i pribory: uchebnik [Technological measurements and devices: textbook]. Moscow: Alyans, 2017. 456 p.
8. Sazhin S.G. Pribory kontrolya sostava i kachestva tekhnologicheskikh sred: uchebnoye posobiye [Instruments for controlling the composition and quality of technological media: a tutorial]. SPb.: Lan', 2012. 431 p.
9. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dashti F. A novel method for calculating natural gas density based on Joule Thomson coefficient. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. V. 26, pp. 1018–1029.
10. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A. Measurement and evaluation of the gas density and viscosity of pure gases and mixtures using a micro-cantilever beam. *Sensors*. 2015. V. 15. No 9, pp. 24318–24342.
11. Rosario R., Mutharasan R. Piezoelectric excited millimeter sized cantilever sensors for measuring gas density changes. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. V. 192, pp. 99–104.
12. Khosravi A., Machado L., Nunes R.O. Estimation of density and compressibility factor of natural gas using artificial intelligence approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. V. 168, pp. 201–216.
13. Ötügen M.V., Ganguly B. Laser heterodyne method for high-resolution gas-density measurements. *Applied optics*. 2001. V. 40. No 21, pp. 3502–3505.
14. Zhigulin S.Yu., Ilyasov L.V. Experimental installation for the investigation of the computer effusion gas density analyzer with decreasing exhaust pressure. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No. 1(33), pp. 22–25. (In Russian).
15. Zhigulin S.Yu., Ilyasov L.V. Experimental verification of a mathematical model of a computerized decreasing discharge pressure effusion gas density analyzer. *Izmeritelnaya tekhnika*. 2020. No 3, pp. 57–63. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 19.02.2021; после рецензирования/revised: 05.04.2021;
принята/accepted: 08.04.2021