

Экспериментальная проверка математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения

С. Ю. Жигулин, Л. В. Илясов

Тверской государственный технический университет, Тверь, Российская Федерация,
e-mail: shtazig@mail.ru, lvi450714@mail.ru

Разработан компьютерный эффузионный анализатор плотности газов с убывающим давлением истечения. Описана обобщённая схема данного анализатора и его работа. Показано, что принцип действия созданного прибора основан на измерении времени истечения определённого объёма анализируемого газа через микродиафрагму. На основании исходных уравнений газовой динамики разработана математическая модель эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения. Создана экспериментальная установка для проверки разработанной математической модели компьютерного эффузионного анализатора плотности газов. Представлены результаты проверки математической модели, полученные при экспериментальных исследованиях на разработанной установке для ряда газов. Выполнены исследования, направленные на оценку влияния температуры на результат измерений. Рассчитанные на основании математической модели результаты сопоставлены с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. Определена погрешность разработанной математической модели эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения. Сделаны выводы о её адекватности и возможности дальнейшего использования для проектирования и расчётов эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения.

Ключевые слова: эффузионный анализатор, эффузиометр, плотность газов, математическая модель, микродиафрагма, пьезорезистивный датчик давления, природный газ.

Введение. В последние годы мировая добыча природных, сланцевых и попутных газов непрерывно растёт, так как они являются одними из самых чистых, удобных и доступных источников энергии. На предприятиях различных отраслей промышленности, а также при добыче и транспортировке сырья осуществляется контроль состава и различных показателей качества газов: низшей объёмной теплоты сгорания, индекса Воббе и плотности.

Одним из наиболее значимых свойств газов является плотность. Знание точных значений плотности газов важно при проведении научных исследований в химии, различных областях физики и метрологии, а также в других областях науки [1]. В газовой промышленности системы автоматического контроля массового расхода газовых потоков повсеместно базируются на обязательном измерении плотности газов, поскольку используемый на газопроводах дроссельный принцип измерения расхода не может дать корректную информацию о массовом расходе без измерения плотности газа. Плотность газов традиционно определяют пикнометрическим методом в ходе дорогостоящих, трудоёмких и весьма продолжительных экспериментов. Для применения пикнометрического метода требуется специальная подготовка персонала и значительные временные затраты – до 1,5 ч на одно измерение.

При этом погрешность измерений составляет $\pm 0,5$ % [2–5]. В ряде случаев, например для природного газа, также используют расчётный метод определения плотности газов на основе хроматографического анализа их состава [6, 7].

Анализ современной научно-технической и патентной литературы позволил выявить ряд других принципов [8–13], позволяющих измерять плотность газов: ареометрический, аэростатический [14], вибрационный [15–18], ультразвуковой, звуковой [19], радиационный, термохимический и эффузионный [20]. Последний принцип определения плотности газов, как показало детальное изучение всех перечисленных методов, в настоящее время является наиболее удобным и простым. Эффузионные анализаторы (эффузиометры) применяют как для измерения плотности газов в потоке [21], так и в лабораторных исследованиях. Принцип действия эффузионных лабораторных анализаторов основан на измерении времени истечения определённого объёма анализируемого газа через микродиафрагму. При этом истечение может происходить как при постоянном, так и при убывающем давлении. Более просты и удобны с точки зрения автоматизации эффузионные анализаторы плотности газов с убывающим давлением истечения.

Эффузионный анализатор плотности газов с убывающим давлением истечения. На кафедре Автоматизации технологических процессов Тверского государственного технического университета был разработан и испытан новый тип эффузионных анализаторов – компьютерный эффузионный анализатор плотности газов с убывающим давлением истечения. Его обобщённая схема представлена на рис. 1. Измерение плотности газов эффузионным анализатором происходит следующим образом. Измерительная камера 3 при открытых вентилях 2 промывается анализируемым газом, а затем вентили закрываются. С помощью устройства 1 создания избыточного давления в измерительной камере газ сжимается, а затем открывается вентиль, соединяющий измерительную камеру с атмосферой. Начинается истечение анализируемого газа через микродиафрагму 5, которое происходит при изменяющемся (убывающем) давлении в измерительной камере, регистрируемом датчиком давления 4. Для определения плотности анализируемого газа с помощью устройства 6 измеряется время τ_a его истечения, т. е. время, за которое давление в измерительной камере уменьшается от некоторого максимального до минимального значений. Обычно для достижения высокой точности измерения плотности предварительно измеряют эталонное время τ_0 истечения газа при идентичных условиях осушенного воздуха. По результатам проведённых измерений вычисляют плотность анализируемого газа.

Математическая модель эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения. Анализ технической литературы показал, что

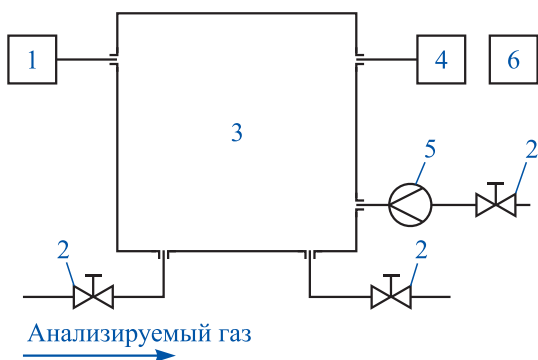


Рис. 1. Обобщённая схема эффузионного анализатора с убывающим давлением истечения:

1 – устройство для создания избыточного давления; 2 – вентили; 3 – измерительная камера; 4 – датчик давления; 5 – микродиафрагма; 6 – устройство отсчёта времени

Fig. 1. Generalized decreasing discharge pressure effusion analyzer circuit:

1 – device for creating excessive pressure; 2 – valves; 3 – measuring chamber; 4 – pressure sensor; 5 – miniature diaphragm; 6 – timing device

работы, посвящённые математическому описанию сигнала эффузионных анализаторов, отсутствуют. Приведённую ниже математическую модель эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения авторы настоящей статьи разработали на основании трёх уравнений газовой динамики, а именно частного случая уравнения движения, уравнение неразрывности и уравнения состояния газа. При этом для истечения газа через сужающее устройство использовали формулу зависимости массового расхода G от разности давлений на микродиафрагме [2]:

$$G = \alpha \varepsilon F \sqrt{2 \rho_n \frac{P T_n}{P_n T} (P - P_a)},$$

где α – коэффициент расхода диафрагмы; ε – коэффициент сжатия струи (при малых разностях давления равен 1); F – площадь сечения микродиафрагмы; ρ_n – плотность газа в нормальных условиях; P – абсолютное давление газа на входе перед диафрагмой; T – абсолютная температура газа; P_n , T_n – абсолютные давление и температура, соответствующие нормальным условиям; P_a – атмосферное давление.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: вместимость камеры для сжатия газов постоянна; сжимаемостью газа, ввиду малого сжатия, можно пренебречь [22]; скорость истечения газа через отверстие диаметром 0,1 мм в микродиафрагме достаточно велика, поэтому теплообменом между микродиафрагмой и газом можно также пренебречь, а процесс истечения, ввиду низкой скорости падения давления в камере для сжатия газов, можно считать изотермическим.

Полученная математическая модель эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения представляет собой зависимость давления в камере для сжатия газов от времени:

$$P = [(QH)^2 + 2QHP_a + P_a^2] / 4QH, \quad (1)$$

где

$$Q = \exp[\tau \sqrt{T} / (\sqrt{\rho_n} A)];$$

$$H = (2P_0 - P_a + 2\sqrt{P_0^2 - P_a P_0});$$

τ – время, прошедшее с момента начала истечения газа; $A = -V v_\mu / (R_\mu \alpha F \sqrt{2 T_n / P_n})$ – постоянная величина для каждого конкретного анализатора; P_0 – абсолютное давление газа в начале истечения; V – объём камеры для сжатия газов; v_μ – объём одного моля газа; R_μ – универсальная газовая постоянная.

Также авторы вывели выражение, описывающее зависимость времени τ_n истечения газа через микродиафрагму от

уменьшения давления газа в камере. Выражение выведено для сжатия газа при его истечении от некоторого начального значения P_1 до конечного значения P_2 :

$$\tau_{\text{и}} = A \sqrt{\rho_{\text{н}} / T} \ln \left| \frac{2P_2 - P_{\text{а}} + 2\sqrt{P_2^2 - P_{\text{а}}P_2}}{2P_1 - P_{\text{а}} + 2\sqrt{P_1^2 - P_{\text{а}}P_1}} \right|. \quad (2)$$

Применив формулу (2) для анализируемого газа и газа с известной плотностью, получили выражение для определения плотности анализируемого газа:

$$\rho_{\text{а.н}} = \rho_{\text{э.н}} (\tau_{\text{а}} / \tau_{\text{э}})^2, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{а}}$, $\tau_{\text{э}}$ – время истечения анализируемого газа и эталонного газа с известной плотностью соответственно; $\rho_{\text{а.н}}$, $\rho_{\text{э.н}}$ – плотность анализируемого газа и газа с известной плотностью в нормальных условиях соответственно.

Формула (3) справедлива при условии постоянства и равенства коэффициента истечения α для анализируемого газа и газа с известной плотностью, что достигается путём подбора параметров микродиафрагмы и режимов истечения газов через неё [23].

Приведённая выше математическая модель содержит все основные конструктивные и режимные параметры, что позволяет провести её экспериментальную проверку.

Экспериментальная часть. Для проверки математической модели эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения авторы статьи разработали экспериментальную установку, схема которой представлена на рис. 2. Данная установка является модификацией установки, используемой при проверке математической модели эффузионного анализатора вязкости газов [24]. Созданная авторами экспериментальная установка состоит из камеры для сжатия газов 3, выполненной в виде разделённого перегородками на несколько последовательных сообщающихся камер стального цилиндра, внутренний объём которого 400 мл. Выход камеры для сжатия газов через тройник 9 параллельно соединён со входами измерительной камеры 11 и микродиафрагмы 8. На выходе измерительной камеры расположен пневмотумблер 10, а на выходе микродиафрагмы, изготовленной из тонкой алюминиевой фольги – пневмотумблер 7. К измерительной камере подключён пьезорезистивный датчик давления 12 типа ПИ-51 (МИДА, Россия), сигнал с которого после усиления усилителем 13 и преобразования аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 14 поступает на компьютер 15. Через пневмотумблер 4 ко входу камеры для сжатия газов подключён микрокомпрессор 5, соединённый с линией для подачи газов 6.

Для исключения потери давления в пневмотрактах они выполнены в виде трубок, внутренний диаметр которых 3 мм, что обуславливает отсутствие какой-либо погрешности

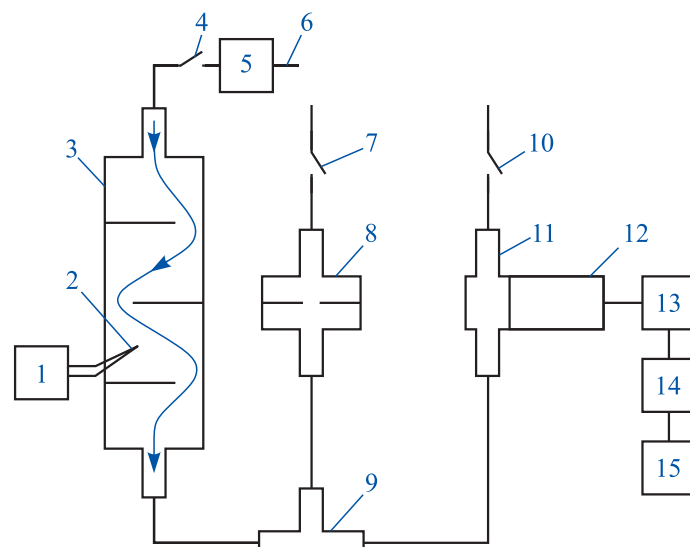


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проверки математического описания эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения:

1 – потенциометр; 2 – термопара; 3 – камера для сжатия газов; 4 – пневмотумблер; 5 – микрокомпрессор; 6 – линия для подачи газов; 7 – пневмотумблер; 8 – микродиафрагма; 9 – тройник; 10 – пневмотумблер; 11 – измерительная камера; 12 – датчик давления; 13 – усилитель; 14 – АЦП; 15 – компьютер

Fig. 2. Experimental setup for testing the mathematical model of an effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer:

1 – potentiometer; 2 – thermocouple; 3 – gas compression chamber; 4 – pneumatic toggle switch; 5 – микрокомпрессор; 6 – gas supply line; 7 – pneumatic toggle switch; 8 – miniature diaphragm; 9 – wye fitting; 10 – pneumatic toggle switch; 11 – measuring chamber; 12 – pressure sensor; 13 – amplifier; 14 – ADC; 15 – computer

измерений разности давлений на микродиафрагме. Для измерения температуры газов в процессе анализа в камеру для сжатия газов разместили хромель-копелевую термопару 2, соединённую с потенциометром 1.

Экспериментальные исследования для природного и углекислого газов, а также азота и аргона проводили следующим образом. Ёмкость с анализируемым газом подсоединяли к линии для подачи газов. Микрокомпрессор с помощью пневмотумблера 4 сообщался со входом камеры для сжатия газов, а выходы измерительной камеры и микродиафрагмы посредством пневмотумблеров 7, 10 соединяли с атмосферой. Микрокомпрессор включался, и анализируемый газ прокачивался в атмосферу через ёмкость для сжатия газов, измерительную камеру и микродиафрагму, промывая их. По истечении достаточного для промывки промежутка времени (для данной установки оно составляло 5 мин) микродиафрагму и измерительную камеру отключали пневмотумблерами от атмосферы, при этом в камере для сжатия газов и измерительной камере

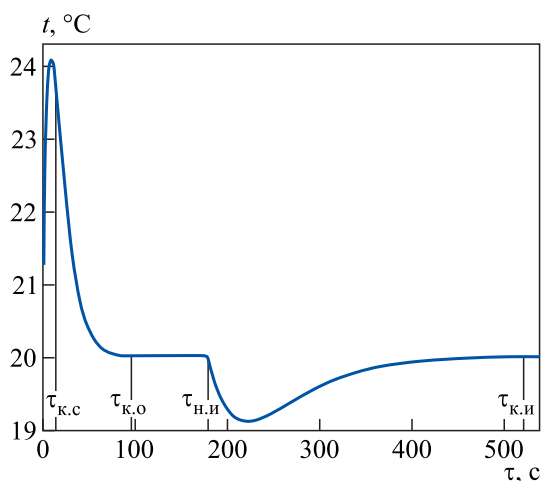


Рис. 3. График зависимости изменения температуры, измеренной термопарой, размещённой в камере для сжатия газов, от времени в процессе истечения технического углекислого газа:

$\tau_{к.с}$ – время окончания сжатия; $\tau_{к.о}$ – время окончания остывания;
 $\tau_{н.и}$ – время начала истечения; $\tau_{к.и}$ – время окончания истечения

Fig. 3. Graph of temperature change, measured by a thermocouple placed in the chamber for gas compression, versus time during the flow of technical carbon dioxide:

$\tau_{е.р}$ – time of the end of pressing; $\tau_{е.с}$ – is the end time of cooling;
 $\tau_{с.е}$ – the start time of the expiration; $\tau_{е.е}$ – the end time of the expiration

посредством микрокомпрессора начинало создаваться избыточное давление. Давление в измерительной камере непрерывно измеряли пьезорезистивным датчиком давления, сигнал с которого после прохождения усилителя и преобразования АЦП поступал на компьютер и отображался на мониторе в виде графика зависимости давления от времени. При достижении в измерительной камере давления 25 кПа с помощью пневмотумблера 4 вход камеры для сжатия газов отключали от микрокомпрессора. Микрокомпрессор тоже выключался, и на этом подготовка к измерениям завершалась.

По окончании отрезка времени, за которое в камере для сжатия газов устанавливалась постоянная температура анализируемого газа, начинали непосредственные измерения. Микродиафрагму с помощью пневмотумблера 7 соединяли с атмосферой, после чего через неё происходило истечение газа. Давление в измерительной камере при этом постепенно уменьшалось. Информация о давлении в камере для сжатия газов, измеренная с помощью пьезорезистивного датчика, непрерывно поступала в компьютер, где сохранялась и обрабатывалась.

Во время описанных выше операций с помощью хромель-копелевой термопары диаметром электродов 0,3 мм и потенциометра типа КСП-4 (НПО «Автоматика», Россия), имеющим диапазон измерений 0–1 мВ, непрерывно фиксировалась и измерялась температура газов в камере для сжатия газов.

Результаты и их обсуждение. Проведённые исследования измерения температуры газа в камере для сжатия газов в процессе истечения через микродиафрагму показали, что оно было совсем незначительным. Основные изменения температуры происходили в начале истечения в момент времени $\tau_{н.и}$. В конце же истечения, в момент $\tau_{к.и}$, температура газа практически не менялась. Данные наблюдения позволяют считать процесс истечения газов в анализаторе изотермическим, что соответствует принятому при разработке математической модели допущению. В качестве примера на рис. 3 представлен график зависимости изменения температуры, измеренной термопарой, которая размещена в камере для сжатия газов, от времени в процессе истечения технического углекислого газа. Из графика следует, что в начале сжатия газа в камере для сжатия его температура резко возрастает, но уже к моменту окончания сжатия $\tau_{к.с}$ она, достигнув своего пика, начинает постепенно снижаться и к моменту окончания охлаждения газа $\tau_{к.о}$ принимает постоянное значение, равное температуре окружающей среды. С момента начала истечения газа $\tau_{н.и}$ происходит некоторое снижение температуры, со временем сменяющееся её плавным ростом. К моменту окончания $\tau_{к.и}$ истечения газа через микродиафрагму температура оставшегося в камере для сжатия газов газа снова принимает изначальное значение.

Экспериментальная проверка математической модели эффузионного анализатора плотности газов с убывающим давлением истечения заключалась в следующем. Рассчитанное по зависимости (1) давление в определённые моменты времени сравнивали с полученными в ходе экспериментальных исследований значениями. При этом предварительно по критерию Фишера была подтверждена адекватность математической модели.

Из математической модели (1) следует, что для определения давления в камере для сжатия газов в процессе истечения необходимо знать коэффициент истечения микродиафрагмы, площадь её отверстия, а также вместимость всех внутренних камер анализатора и соединяющих их линий. Коэффициент α истечения микродиафрагмы и условия его постоянства для исследуемых газов нашли в ходе предварительных исследований. Также были оценены площадь поперечного сечения отверстия микродиафрагмы и объём камеры для сжатия газов. Таким образом, для оценки коэффициента A приняли следующие значения: $T_n = 273,15$ К; $P_n = 101325$ Па; $v_{\mu} = 2241 \cdot 10^{-3}$ м³/моль; $R_{\mu} = 8,31$ Дж/(моль·К); $V = 450 \cdot 10^{-6}$ м³; $\alpha = 0,9$; $d = 0,09 \cdot 10^{-3}$ м. На основании данных значений вычислили коэффициент $A = 2885,5$.

Поскольку точное определение полной вместимости всех внутренних ёмкостей и соединительных линий анализатора не представляется возможным, а нахождение действительной площади отверстия микродиафрагмы ввиду малого размера также является довольно сложной технической задачей, то в ходе экспериментальных исследований значение коэффициента A для исследуемого анализатора было уточнено и составило $A = 2813,8 \pm 182,4$.

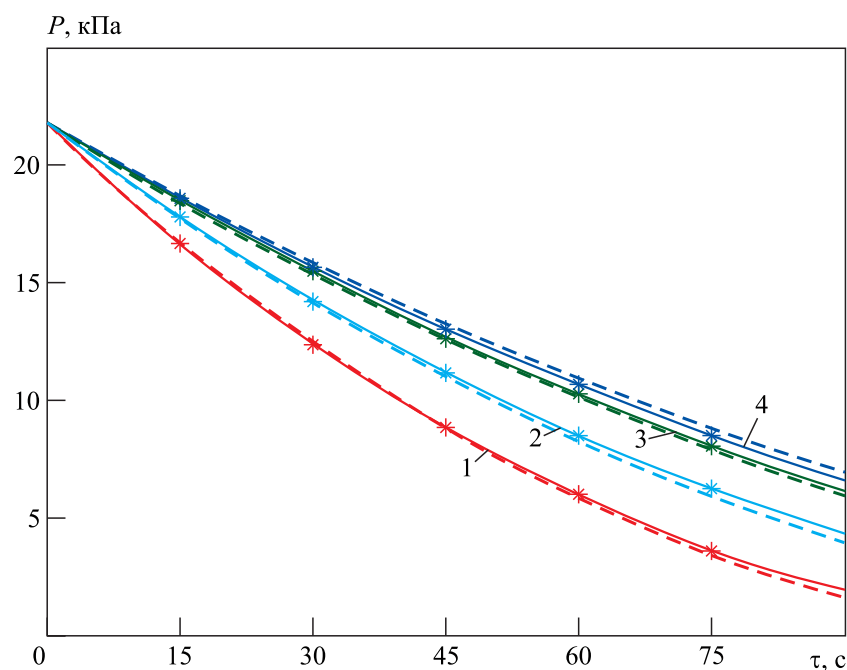


Рис. 4. Графики зависимости давления в камере для сжатия газов от времени для исследованных газов:

1 – природный газ; 2 – азот; 3 – углекислый газ; 4 – аргон

Fig. 4. Plots of pressure in the chamber for gas compression from time for the studied gases:

1 – natural gas; 2 – nitrogen; 3 – carbon dioxide; 4 – argon

Таким образом, полученное при экспериментальных исследованиях значение коэффициента A вполне согласуется с его расчётной оценкой, приведённой выше.

На основании разработанной авторами математической модели для ряда газов были получены расчётные значения давления в различные моменты времени в процессе их истечения. Расчётные значения сравнивали с найденными в ходе экспериментальной проверки математической модели значениями давления. На основании этих значений определили относительную погрешность Λ математической модели эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения:

$$\Lambda = (P_p - \bar{P}_i) / \bar{P}_i \cdot 100,$$

где P_p – расчётное давление в камере для сжатия газов; $\bar{P}_i$ – среднее арифметическое значение измеренного давления в камере для сжатия газов по результатам трёх экспериментов.

На рис. 4 представлены полученные в ходе экспериментальных исследований графики зависимости среднего арифметического значения давления в измерительной камере анализатора по результатам трёх измерений от времени в процессе истечения исследованных газов

Расчётные и измеренные значения давления природного газа в камере для сжатия газов

τ , с	P_p , кПа	$\bar{P}_i$, кПа	$S_{\bar{P}_i}$, кПа	ΔP_i , кПа	Λ , %
15	16,63	16,72	0,57	2,47	–0,5
30	12,37	12,46	0,66	2,85	–0,7
45	8,79	8,81	0,62	2,67	–0,2
60	5,87	5,82	0,78	3,37	0,9
75	3,56	3,42	0,55	2,36	4,0

(пунктирные линии), и графики, построенные по рассчитанным на основании математического описания значениям (сплошные линии). В таблице приведены расчётные и экспериментальные значения давлений в различные моменты истечения природного газа для ряда точек, где $S_{\bar{P}_i}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения измеренного давления по результатам трёх измерений; ΔP_i – абсолютная погрешность при доверительной вероятности 0,95; Λ – относительная погрешность математической модели.

Из приведённых в таблице данных следует, что относительная погрешность математической модели на большей части кривой истечения природного газа не превышала ± 2 %. Аналогичные данные были получены для других газов.

Заключение. Полученные в ходе экспериментальных исследований данные подтверждают адекватность разработанной математической модели, что говорит о возможности его использования для проектирования и расчёта эффузионных анализаторов плотности газов с убывающим давлением истечения, а также для оценки погрешностей этих анализаторов.

Список литературы

1. Мордасов Д. М., Савенков А. П. Влияние плотности газа на силовое действие турбулентной струи // Журнал технической физики. 2016. № 86. №. 8. С. 83–86.
2. Фарзани Н. Г., Ильясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Технологические измерения и приборы. М.: Альянс, 2017. 456 с.
3. Кивилис С. С. Плотномеры. М.: Энергия, 1980. 280 с.
4. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D., Talanta, 2002, vol. 57, no. 3, pp. 583–593. DOI: 10.1016/S0039-9140(02)00058-9
5. Хацкевич Е. А., Снегов В. С. Погрешности результатов измерений плотности природного газа пикнометрическим и расчётным методами // Газовая промышленность. 2011. № 5. С. 84–85.
6. 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.

7. Астахов А. Анализ физико-химических свойств природного газа. Оборудование и материалы // Аналитика. 2013. № 8. С. 40–44.

8. Билинский И. И., Огородник К. В., Яремишина Н. А. Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // Научные труды винницкого национального технического университета. 2016. № 2. С. 10–23.

9. Тарик Ю. Волноводные акустические детекторы газов и паров: дис. канд. техн. наук (ТвГТУ, Тверь, 2003).

10. Сажин С. Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред, СПб.: Лань, 2012. 431 с.

11. Пат. № 2350925 РФ / В. А. Сухов, В. Н. Сухова // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 9.

12. Пат. № 2393456 РФ / Э. Донзье, А. Пермуй // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 18.

13. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A., *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 9, pp. 24318–24342. DOI: 10.3390/s150924318

14. *Effusion method of determining gas density: Technologic Papers of Bureau Standarts*, T. 90, Washington government Printing office, 1917. DOI: 10.6028/nbst.3093

15. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dasht F., *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 1018–1029. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.07.029

16. Do H., Carterb C., Liu Q., Ombrello T., Hammack S., Lee T., Hsu K., *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 2155–2162. DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.043

17. Boudjiet M. T., Bertrand J., Mathieu F., Nicu L., Mazenq L., Leïchlé T., Heinrich S. M., Pellet C., Dufour I., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 208, pp. 600–607. DOI: 10.1016/j.snb.2014.11.067

18. Sell. J. K., Niedermayer A. O., Jakoby B., *Procedia Engineering*, 2011, vol. 25, pp. 1297–1300. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.320

19. Igarashi K., Kawashima K., Kagawab T., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 140, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.017

20. Patil P., Ejaz S., Atilhan M., Cristancho D., Holste J. C., Hall K. R., *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, vol. 39, no. 8, pp. 1157–1163. DOI: 10.1016/j.jct.2007.01.002

21. Otügen M. V., Ganguly B., *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 21, pp. 3502–3505. DOI: 10.1364/ao.40.003502

22. Khosravi A., Machado L., Nunes R. O., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 201–216. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.05.023

23. Мордасов Д. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е. Определение коэффициента расхода при истечении газа из отверстий малого диаметра // Инженерная физика. 2014. № 1. С. 13–18.

24. Жигулин С. Ю., Ильясов Л. В., Экспериментальная проверка математической модели эффузионного анализатора вязкости газов с убывающим давлением истечения //

Известия вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 12. С. 1053–1059. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1053-1059

References

1. Mordasov M. M., Savenkov A. P., *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 8, pp. 1202–1205.

2. Farzane N. G., Ilyasov L. V., Azim-zade A. Yu. *Tekhnologicheskie izmereniya i pribory*, Moscow, Al'yans publ., 2017, 456 p. (in Russian).

3. Kivilis S. S. *Plotnometry*, Moscow, Energiia publ., 1980, 280 p. (in Russian).

4. Viana M., Jouannin P., Pontier C., Chulia D., *Talanta*, 2002, vol. 57, no. 3, pp. 583–593. DOI: 10.1016/S0039-9140(02)00058-9

5. Khatskevich E. A., Snegov V. S., *Gas Industry Magazine*, 2011, no. 5, pp. 84–85 (in Russian).

6. Klepcha R. R., *Journal automation in industry*, 2013, no. 6, pp. 34–35 (in Russian).

7. Astakhov A., *Analitika*, 2013, no. 8, pp. 40–44 (in Russian).

8. Bilinskii I. I., Ogorodnik K. V., Yaremishina N. A., *Scientific works of Vinnitsa National Technical University*, 2016, no. 2, pp. 10–23.

9. Iu. Tarik, Candidate's dissertation Technical Sciences (TvSTU, Tver, 2003).

10. Sazhin S. G. *Pribory kontrolya sostava i kachestva tekhnologicheskikh sred*, Saint Petersburg, Lan' Publ., 2012, 431 p. (in Russian).

11. Sukhov V. A., Sukhova V. N., RF Patent no. 2350925, *Byull. Izobret.*, no. 9 (2009).

12. Donz'e E., Permyui A., RF Patent no. 2393456, *Byull. Izobret.*, no. 18 (2010).

13. Badarlis A., Pfau A., Kalfas A., *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 9, pp. 24318–24342. DOI: 10.3390/s150924318

14. *Effusion method of determining gas density: Technologic Papers of Bureau Standarts*, T. 90, Washington government Printing office, 1917. DOI: 10.6028/nbst.3093

15. Farzaneh-Gord M., Farsiani M., Khosravi A., Arabkoohsar A., Dasht F., *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, vol. 26, pp. 1018–1029. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.07.029

16. Do H., Carterb C., Liu Q., Ombrello T., Hammack S., Lee T., Hsu K., *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 2155–2162. DOI: 10.1016/j.proci.2014.07.043

17. Boudjiet M. T., Bertrand J., Mathieu F., Nicu L., Mazenq L., Leïchlé T., Heinrich S. M., Pellet C., Dufour I., *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 208, pp. 600–607. DOI: 10.1016/j.snb.2014.11.067

18. Sell. J. K., Niedermayer A. O., Jakoby B., *Procedia Engineering*, 2011, vol. 25, pp. 1297–1300. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.320

19. Igarashi K., Kawashima K., Kagawab T., *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 140, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.017

20. Patil P., Ejaz S., Atilhan M., Cristancho D., Holste J. C., Hall K.R., *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007, vol. 39, no. 8, pp. 1157–1163. DOI: 10.1016/j.jct.2007.01.002

21. Otügen M. V., Ganguly B., *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 21, pp. 3502–3505. DOI: 10.1364/ao.40.003502

22. Khosravi A., Machado L., Nunes R. O., *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 168, pp. 201–216. DOI: doi.org/10.1016/j.petrol.2018.05.023

23. Mordasov D. M., Savenkov A. P., Chechetov K. E., *Engineering Physics*, 2014, no. 1, pp. 13–18 (in Russian).

24. Zhigulin S. Yu., Ilyasov L. V., *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 621, no. 12, pp. 1053–1059. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1053–1059

Дата поступления: 28.09.2019.

Дата принятия: 05.11.2019.

Experimental verification of a mathematical model of a computer effusion decreasing discharge pressure gas density analyzer

Stanislav Yu. Zhigulin, Leonid V. Ilyasov

Tver State Technical University, Tver, Russia Federation, e-mail: shtazig@mail.ru, lvi450714@mail.ru

The article presents the results of checking mathematical model of the created decreasing pressure effusion computer gas density analyzer. Operating principle of a decreasing pressure effusion gas density analyzers is based on measuring the outflow time of the analyzed gas certain volume through a microdiaphragm. A generalized scheme of such analyzers and their operation are described in article. Initial equations of the mathematical model, the assumptions and the results of the development of the mathematical model are presented. The created experimental setup for testing the developed mathematical model and its operation also are described. The mathematical model was tested in the course of numerous experiments on this facility for a number of gases. Studies have also been performed to assess the effect of temperature on the measurement result. The results of the mathematical model test are presented in the article. The results of experimental studies were compared with the calculated data obtained on the basis of a mathematical model. As a result, the error of the mathematical model of the decreasing pressure effusion gas density analyzers was determined and conclusions were made about its adequacy and possible further use for designing and calculating decreasing pressure effusion gas density analyzers.

Key words: effusion analyzer; effusimeter; gas density; mathematical model; microdiaphragm; piezoresistive pressure sensor; natural gas.