

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК

УДК 681.5:622.276; 622.279

EDN: FFRKDA

© И. Н. Москалев, Ю. А. Горбунов, А. В. Семенов, С. А. Кузнецов, Д. А. Хапов

ОПЕРАТИВНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА СЖИМАЕМОСТИ ГАЗОВ И ИХ СМЕСЕЙ

При определении расходов природного газа сужающими устройствами, а также при пересчете объемов газа, добытого или переданного при рабочих условиях, к стандартным кубометрам требуется знание его коэффициента сжимаемости (k). В настоящее время его определяют расчетным путем. При этом в зависимости от состава газа, а также величин рабочих давлений и температур возможные величины погрешностей расчетной величины k относительно реальной достигают 2–5%, что при больших объемах потребления газа и его высокой стоимости составляет десятки и сотни миллионов рублей, которые переплачивает одна из сторон — продавец или покупатель — при покупке газа. Рассматривается экспериментальный метод определения величины k , основанный на определении плотности газа по его диэлектрической проницаемости, обладающий более высокой оперативностью и существенно более низкой погрешностью. Приводятся экспериментальные данные определения величины k , полученные с помощью СВЧ- и КВЧ-резонаторов при использовании углекислого газа в диапазоне давлений ~20–40 атм при температуре ~30 °С и ~18 °С. Полученные данные сравниваются с контрольными $k_{\text{контр}}$ (взятыми из литературы). Разница между $k_{\text{контр}}$ и экспериментальными значениями $k_{\text{эсп}}$ в большинстве случаев не превышает ~0.5%.

Ключевые слова: природный газ, приведение к стандартным метрам кубическим, коэффициент сжимаемости, диэлектрическая проницаемость, объемный резонатор, миллиметровые волны

ВВЕДЕНИЕ

При проведении различных технологических операций — добыче газа, его осушке, транспортировке, при поступлении его на газораспределительные станции, продаже потребителям — газ находится при различных давлениях и температурах (при рабочих условиях). Однако все взаимные расчеты при передаче газа от одного предприятия к другому производятся в стандартных кубометрах (ст. м³). При этом необходимо вводить поправки, связанные с отличием давления, температуры и фактора сжимаемости в рабочих условиях (P_p , T_p , Z_p) от одноименных параметров в стандартных условиях (P_c , T_c , Z_c), которые, в свою очередь, содержат погрешности, связанные с классом измеряющего их прибора [1]. Если предприятие добыло или передало V_p кубометров газа при давлении P_p и температуре T_p , то пересчет к стандартным м³ проводят по соотношению

$$V_c = V_p \cdot \frac{T_c}{T_p} \cdot \frac{P_p}{P_c} \cdot \frac{Z_c}{Z_p}. \quad (1)$$

Здесь $T_c = 293$ К, $P_c = 760$ мм рт. ст. (1 атм.), Z_c и Z_p — факторы сжимаемости газа при стандартных и рабочих условиях.

Отношение $k = Z_p / Z_c$ называется коэффициентом сжимаемости. Величины Z_c , Z_p и, соответственно, k являются функциями сорта газа (а для

смесей — функциями состава газа), рабочего давления и рабочей температуры.

Пересчет V_p в V_c осуществляется в настоящее время автоматически с помощью специальных устройств-корректоров, в которые поступают данные о термобарических параметрах газа (P_p , T_p) и факторах сжимаемости Z_p , Z_c [2, 3]. Хотя современные измерители рабочих давлений и температур могут достигать высоких уровней точности, фактор сжимаемости в настоящее время рассчитывается.

При этом в зависимости от диапазонов давлений и температур, а также от состава газа относительная величина погрешности коэффициента сжимаемости может доходить до 2–3% и является определяющей при приведении рабочих объемов газа к стандартным м³ по соотношению (1). Ниже рассматривается другой подход к определению величины k , а именно — экспериментальный. Показано, что как по оперативности, так и по величине погрешности этот метод существенно лучше расчетного.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СЖИМАЕМОСТИ И ИХ НЕДОСТАТКИ

Коэффициенты сжимаемости могут быть измерены экспериментально на специальном физическом оборудовании (на так называемых бомбах

PVT). Техника определения зависимости $Z(P, T)$ достаточно сложна и не может быть на сегодня воспроизведена в лаборатории газового предприятия. Кроме того, такие измерения требуют значительного труда и времени. Поэтому на практике используют аналитические методы расчета (с использованием целого ряда промежуточных коэффициентов). Они подробно изложены в ГОСТах (см. ГОСТ 30319.2-96; ГОСТ 30319.2-2015; ГОСТ Р 70927-2023; ГОСТ Р 8.769-2011; ГОСТ Р 8.914-2016 [4–8]). Погрешность вычисления величины Z зависит от того, какой метод используется, а также от точности вводимых исходных данных и лежит в диапазоне 1.1–2.1%, а отклонение от экспериментальных данных доходит до 3.1% (ГОСТ 30319.2-96, метод УС GERG-91 мод.) [4].

На уровне измерений давлений, температур и перепада давления ΔP , лежащих в диапазоне 0.1–0.5%, такие большие погрешности являются определяющими, т.к. погрешность в определении количества проданного (или приобретенного) газа при его больших объемах и нынешних ценах на газ обходится одной из сторон в десятки и сотни миллионов долларов (!)*.

Заметим также, что расчетная величина Z выступает как средняя за период между измерениями величин, входящих в исходные расчетные данные при подсчете расхода газа, и при изменении компонентного состава в течение этого промежутка времени неконтролируемая погрешность может выходить за границы погрешности расчетной величины Z . Отсюда требования обеспечить постоянный контроль фактора сжимаемости Z , т.е. его мониторинг является насущной задачей расходомерии газа и в настоящее время не выполняемой единственно в силу отсутствия приемлемой технической возможности.

* В 2020 г. в Удмуртской Республике, по сведениям, взятым из Интернета, израсходовали $5 \cdot 10^9$ ст. м³ природного газа. При коммерческих расчетах использовалось соотношение (1). Пусть удмуртские предприятия, рассчитываясь за газ с ПАО "Газпром", выбрали соотношение для расчета коэффициента сжимаемости $k = Z_p / Z_c$, заниженное против истинного всего на 1%. Цены на газ сейчас — от 1000 до 2000 долларов за 1000 ст. м³. Примем 1500 долларов, 1% от $5 \cdot 10^9$ ст. м³ это — $5 \cdot 10^7$ ст. м³. Тогда стоимость $5 \cdot 10^7$ ст. м³ составит $(5 \cdot 10^7 \text{ ст. м}^3 / 1000 \text{ ст. м}^3) \cdot 1500 \text{ долл.} = 7.5 \cdot 10^7 \text{ долл.}$ То есть, если при передаче газа Удмуртской Республике при расчетах за газ при определении коэффициента сжимаемости была допущена ошибка всего в 1% (в сторону завышения расчетного объема переданного газа), то за это Республике пришлось переплатить "Газпрому" 75 млн долларов! (То обстоятельство, что внутри РФ реальная цена на газ несколько ниже мировой, не играет принципиальной роли.)

ОСНОВНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ИДЕЯ

Определение коэффициента сжимаемости основано на связи диэлектрической проницаемости газа ε с его плотностью ρ и сдвигом собственной частоты резонатора [9].

Сначала воспользуемся уравнением состояния реального газа в форме Менделеева – Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{M} RTZ. \quad (2)$$

Оно верно как для стандартных условий (индекс "с"), так и для рабочих (индекс "р"). Запишем уравнение (2) через плотность газ $\rho = \frac{m}{V}$:

$$\rho_c = \frac{m}{V_c} \frac{R}{M} T_c Z_c, \quad (3)$$

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \frac{R}{M} T_p Z_p. \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) найдем:

$$k = \frac{Z_p}{Z_c} = \frac{\rho_c P_p T_c}{\rho_p P_c T_p}. \quad (5)$$

Основная идея определения коэффициента сжимаемости k основывается на соотношении (5) (рабочее давление P_p и температуру T_p считаем известными).

При заполнении объема СВЧ резонатора газом, скорость распространения радиоволн падает, при этом частота резонатора f_0 сдвигается вниз и принимает новое значение f_1 . При этом относительное смещение частоты определяется диэлектрической проницаемостью газа [10, 11]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2}(\varepsilon - 1), \quad (6)$$

где $\Delta f = f_0 - f_1$.

Далее величину плотности газа ρ находим из измерения диэлектрической проницаемости газа ε . Предлагается определять плотности газа ρ_p и ρ_c с помощью резонаторов, измеряющих диэлектрическую проницаемость ε в рабочих (ε_p) и стандартных (ε_c) условиях по сдвигу собственной частоты (т.е. вакуумированного) резонатора f_0 .

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

Обсудим метод измерения плотности газа ρ путем определения его диэлектрической проницаемости ε [12–16].

В основу метода положено уравнение Клаузиуса – Мосотти, которое связывает микроскопические параметры вещества газа — его поляризуемость α и молярную массу M , с макроскопическими, измеряемыми параметрами — плотностью вещества ρ и его относительной диэлектрической проницаемостью (ДП) ε :

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{3\varepsilon_0}, \quad (7)$$

где N_A — число Авогадро; $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Правая часть уравнения (7) состоит из фундаментальной константы ε_0 и двух молекулярных констант — N_A и α , и называется молярной поляризацией:

$$\frac{N_A \alpha}{3\varepsilon_0} = \Pi. \quad (8)$$

Отсюда — и это является центральным моментом метода — *поляризация также является константой и не зависит от температуры, давления и частоты внешнего поля.*

Разрешив (7) относительно ρ , получим:

$$\rho = \frac{3\varepsilon_0 M (\varepsilon - 1)}{N_A \alpha (\varepsilon + 2)}. \quad (9)$$

Поскольку величина ε для небольших давлений ($P \leq 10$ – 20 атм) не сильно отличается от 1 (например, для метана $\varepsilon = 1 + 0.0008 \cdot P$, для воздуха $\varepsilon = 1 + 0.0006 \cdot P$), то можно в первом приближении пренебречь зависимостью ε от давления и положить $\varepsilon + 2 = 3$. (При $P \sim 100$ атм зависимость $\varepsilon(P)$ надо учитывать.)

Тогда (9) можно переписать, как

$$\rho = \frac{\varepsilon_0 M}{N_A \alpha} (\varepsilon - 1) = A(\varepsilon - 1). \quad (10)$$

Коэффициент пропорциональности A , как видно из (10), может быть вычислен по известным для данного газа значениям M и α :

$$A = \frac{\varepsilon_0 M}{N_A \alpha}. \quad (11)$$

Теперь, комбинируя (6) и (10), найдем уравнение, непосредственно выражающее плотность через измеряемый сдвиг частоты:

$$\rho = 3A \frac{2\Delta f / f_0}{\left(2\Delta f / f_0\right) + 3}. \quad (12)$$

При этом для определения плотности в рабочих условиях ρ_p надо брать сдвиг частоты в этих ус-

ловиях $\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_p$, а для нахождения плотности

в стандартных условиях ρ_c сдвиг в этих условиях

$\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_c$. Измерение плотности по соотношению

(12) предполагает следующую процедуру. В резонатор плотномера впускают газ, фиксируют его термобарические параметры P и T , измеряют смещение собственной частоты резонатора Δf при заполнении его газом и по формуле (12) рассчитывают величину ρ . Начальную частоту резонатора f_0 определяют заранее, измеряя частоту резонатора при нескольких значениях давления P_i и экстраполируя прямую $f = f(P_i)$ в точку, где $P_i = 0$.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НЕФТЯНЫХ И ПРИРОДНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Природный газ является смесью углеводородных газов, в основном метанового ряда, а также балластных газов азота, двуокиси углерода, водяных паров, сероводорода и др. Поэтому важным является вопрос о распространении уравнения (7) на такую смесь.

Пусть компонентный состав газа задан следующим рядом (объемные доли в процентах): $v_1(\text{CH}_4)$, $v_2(\text{C}_2\text{H}_6)$, $v_3(\text{C}_3\text{H}_8)$ и т.д. Вернемся к формуле Клаузиуса – Мосотти (7). Если мы имеем дело с газовой смесью, включающей i сортов чистых газов, то дипольный момент единицы объема при этом будет включать моменты всех поляризованных молекул. Тогда соотношение (7) можно записать в виде:

$$\frac{M_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}} \cdot \frac{(\varepsilon_{\text{см}} - 1)}{(\varepsilon_{\text{см}} + 2)} = \frac{N_A \alpha_{\text{см}}}{3\varepsilon_0}. \quad (13)$$

Здесь $M_{\text{см}}$, $\rho_{\text{см}}$, $\alpha_{\text{см}}$ — соответственно молярная масса смеси, ее плотность и поляризуемость "молекул" смеси (хотя никаких "молекул" смеси реально, разумеется, не существует). При известном объемном содержании они вычисляются по соотношениям:

$$M_{\text{см}} = \sum v_i M_i, \quad \rho_{\text{см}} = \sum v_i \rho_i, \quad \alpha_{\text{см}} = \sum v_i \alpha_i, \quad (14)$$

где M_i , ρ_i , α_i — молярная масса, плотность и поляризуемость i -го компонента смеси;

$v_i = V_i / \sum V_i$, V_i — парциальный объем i -го компонента.

Из уравнения Клаузиуса – Мосотти для смеси (13) найдем выражение для ее плотности, зависящей от $\varepsilon_{\text{см}}$:

$$\rho_{\text{см}} = K_{k-m} \cdot \frac{(\varepsilon_{\text{см}} - 1)}{(\varepsilon_{\text{см}} + 2)}, \quad (15)$$

где

$$K_{k-m} = \frac{3\varepsilon_0}{N_A} \frac{M_{\text{см}}}{\alpha_{\text{см}}} = \frac{3\varepsilon_0}{N_A} \frac{\sum v_i M_i}{\sum v_i \alpha_i} —$$

коэффициент, зависящий от молярной массы компонентов смеси газа M_i и их поляризуемостей α_i .

С принципиальной стороны формула Клаузиуса – Мосотти для смеси газов (13) ничем не отличается от той же формулы для чистого газа (7): она просто оперирует со значениями M , α , ρ , усредненными по составу газовой смеси. Однако здесь есть один "подводный камень": при вычислении плотности в реальном масштабе времени с ее использованием для природных газов, транспортируемых по трубопроводам, он заключается в том, что состав этих газов не является постоянным: он меняется от месторождения к месторождению и, что особенно важно, даже на одном месторождении изменяется во времени.

Это приводит к неконтролируемой вариации коэффициента K_{k-m} и отсюда к появлению дополнительных погрешностей, связанных с вариацией состава. Это является принципиальным моментом при измерении плотностей природных и нефтяных газов. Однако, как будет показано ниже, этот недостаток полностью исключается при измерениях коэффициента сжимаемости.

ОСНОВНОЕ РАСЧЕТНОЕ СООТНОШЕНИЕ

Выведем соотношение, по которому практически можно рассчитывать коэффициент сжимаемости k . Из соотношений (5) и (12) найдем

$$a_i = \frac{V_i}{\sum V_i} k = \frac{T_c P_p}{T_p P_c} \cdot \frac{\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_c}{\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_p} \cdot \frac{\left[\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_p + 3\right]}{\left[\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_c + 3\right]}. \quad (16)$$

Замечательная особенность выражения (16) заключается в следующем. Несмотря на то, что в выражение для плотности, определяемой диэлектрическим методом (12), входит коэффициент

Клаузиуса – Мосотти K_{k-m} , зависящий от состава смеси и, в принципе, подверженный вариации при изменении состава газа, в выражение (16) этот коэффициент не входит. Это позволяет оперативно определять величину k с низкой погрешностью (определяемой только погрешностью величин T , P и $\Delta f/f_0$).

Действительно, поскольку частота относится к наиболее точно измеряемым параметрам (нетрудно осуществить ее измерение с относительной погрешностью $\delta f/f_0 = 10^{-6} - 10^{-7}$), то можно надеяться, что измерение относительных сдвигов $(\Delta f/f_0)_c$ и $(\Delta f/f_0)_p$ можно провести с погрешностью $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$, т.е. не более 0.1–0.01% (это зависит от выбора схемы измерения и добротности резонатора).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная проверка правильности алгоритма определения коэффициента сжимаемости была проведена в работе [9] и повторена в более поздней работе [1]. Из соображений безопасности использовался углекислый газ, имеющий величину k , близкую к метану. Кроме того важным моментом было наличие в литературе контрольных данных по этому газу [17]. Различие между работами [9] и [1] заключалось в основном в использовании различных частотных диапазонов: в [9] это был диапазон длин волн $\lambda \sim 3$ см ($f \sim 10$ ГГц), а в [1] — миллиметровый ($\lambda \sim 0.8$ см, $f \sim 35$ ГГц). Поскольку результаты измерений оказались по существу близкими, то далее мы будем ссылаться на работу [1].

Для проведения измерений был использован резонатор типа Фабри - Перо (РФП) миллиметрового диапазона с вогнутыми зеркалами, в качестве которых использовались донья пивных банок. Резонатор размещался в силовом корпусе, выдерживающем давление 10 МПа (рис. 1).

В качестве источника миллиметровых волн использовался твердотельный генератор на диоде Ганна с ферритовым вентилем, защищающим генератор от отраженных волн. По частоте генератор управлялся с помощью пилообразного напряжения, подаваемого на варактор. В качестве детектора использовалась детекторная головка с диодом Д607. Уровень сигнала с резонатора при этом составлял несколько десятков милливольт. Пример резонансного пика, полученного с использованием этой техники, показан на рис. 2.

На рис. 3 приводится сигнал с резонатора при использовании другой электронной схемы регистрации — с использованием персонального компьютера и платы IN PXI 7831R.

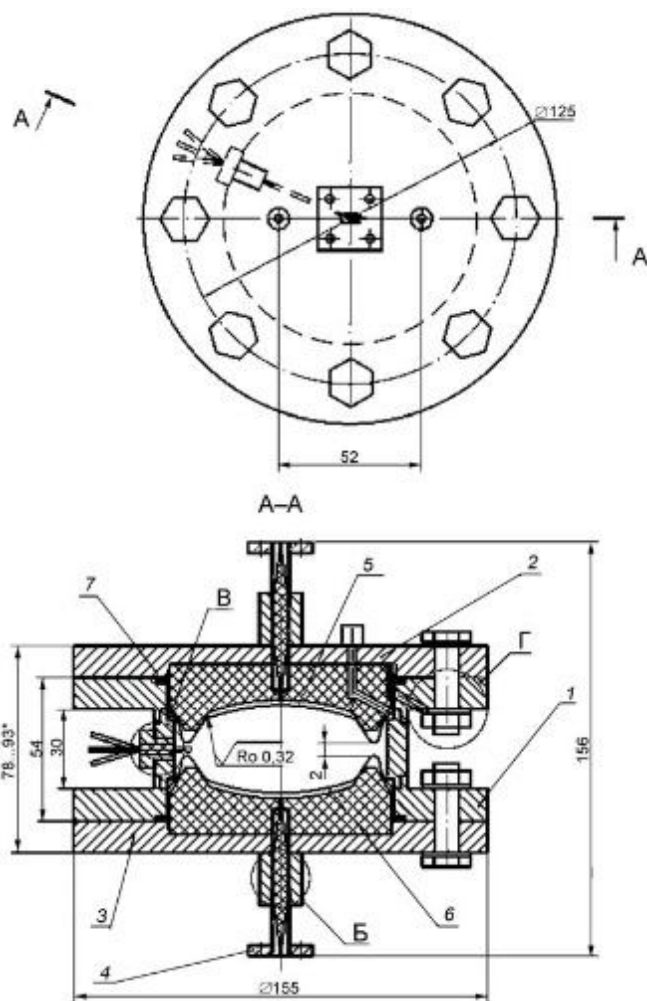


Рис. 1. Сборочный чертеж датчика коэффициента сжимаемости для опытного образца прибора "Арзамас-1". 1 — силовой корпус; 2, 3 — фланцы для размещения верхнего и нижнего зеркал РФП; 4 — волноводный фланец; 5, 6 — зеркала РФП; 7 — уплотнение; Б — радиопрозрачное окно; В — термодатчик

В работе [9] измерения величины k , проводились в небольшом диапазоне давлений газа $23 \leq P \leq 33$ атм. Относительная погрешность (отклонение от контрольных значений k , взятых из [17]) составила от 0.25 до 1.3%. В работе [1] диапазон давлений был шире — от 26 до 41 атм, а относительная погрешность лежала в интервале от 0.12 до 1% в 10 случаях и до 3.9% в трех случаях (точки "выскочили"). Погрешность обусловлена различными причинами — прежде всего уходом температуры газа от принятой в расчете (разница всего в 1°C приводит к ошибке в 0.3%), погрешностью измерения давления и сдвига частоты Δf , погрешностью экстраполяции контрольных вели-

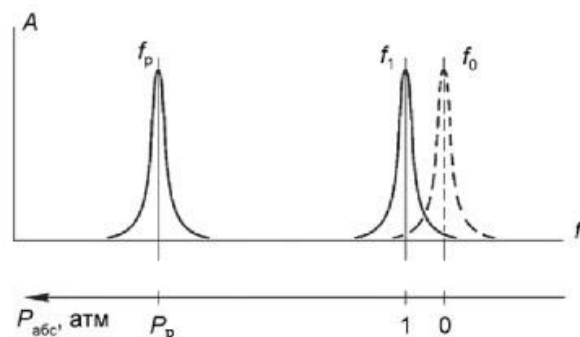


Рис. 2. Положение резонансных пиков на шкале частот при различных абсолютных давлениях газа в силовом корпусе. $P = 0$, $P = P_c = 1$ атм. и $P = P_p$

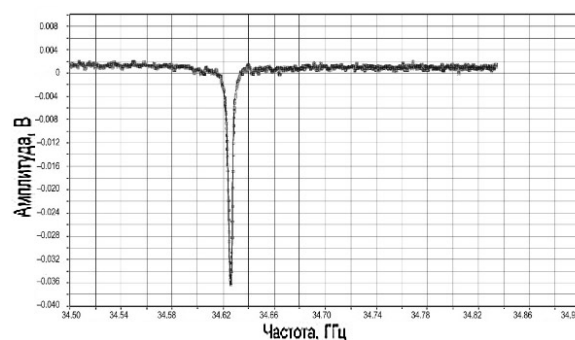


Рис. 3. Резонанс при давлении $P = 23.4$ атм., $t = 18^\circ\text{C}$. Собственная частота $f_p = 34626$ МГц, полуширина $\Delta F \approx 5.3$ МГц, добротность $Q = 6530$

чин $k_{\text{контр}}$ (приведены в [17]) и рядом других причин.

Без сомнения, она может быть снижена при принятии жестких мер стабилизации температуры и давления, а также более аккуратном подсчете факторов сжимаемости Z_p и Z_c .

КОММЕРЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Перечислим основные моменты, позволяющие предположить, что предлагаемый "Оперативный измеритель коэффициента сжимаемости газов и их

смесей" может найти самое широкое распространение у крупных потребителей газа: ТЭЦ; котельных, обслуживающих заводы и жилые комплексы.

1. Область применения "Измерителя" не ограничена ни составом газа, ни давлением, ни температурой, в то время как расчетные методы работают в ограниченных областях этих параметров (см. ГОСТы, приводимые в 1-м разделе "Современные методы определения...").

2. Прибор позволяет оперативно (непрерывно) определять величину k , в то время как расчетные методы не позволяют этого сделать.

3. Уровень достоверности величины k , определяемый "Измерителем", существенно выше того, какой дается расчетными методами, за счет того, что k — измеряемый и относится к газу, протекающему по газопроводу в момент осуществления измерений, в то время как расчетный относится к составу, определенному когда-то ранее.

4. Погрешность определения величины k "Измерителем" составит $\sim 0.5\%$ или менее, в то время как у расчетных методов только погрешность расчета в отдельных диапазонах совокупности параметров P_p , T_p и состава смеси доходит до 3.1% .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая все вышеизложенное, а также высокие цены на газ, при больших масштабах его потребления работающие на газе предприятия предпочтут прибор, дающий точное значение величины k , чтобы не переплачивать миллионы рублей при его покупке (см. пример с Удмуртией в 1-м разделе). А поскольку ни одно предприятие в мире в настоящее время не выпускает прибора с определением k , то можно рассчитывать и на продажу его и за рубежом.

Обратим также внимание на то, что, помимо утилитарного применения в газовой промышленности, "Измеритель" может быть востребован как лабораторный прибор во многих других областях физики и техники, имеющих дело с газами.

Добавим также, что на способ определения коэффициента сжимаемости был взят Патент РФ [18], оформленный на НИИИС (г. Нижний Новгород). Однако в настоящее время он не поддерживается, и в случае, если какое-либо предприятие решит такой "Измеритель" выпускать, нужно будет переоформлять его на это предприятие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гришин Д.В., Голод Г.С., Москалев И.Н., Деревягин Г.А., Хапов Д.А., Кочнев В.В. Метод и техника непрерывного определения коэффициента сжимаемости газов // Научно-технический журнал "Автоматизация,

телемеханизация и связь в нефтяной промышленности". М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2016. № 1. С. 11–20. URL:

http://www.vniioeng.ru/_user_files/file/ants/at/Automation_Telemechanization_2016-01_rus.htm#Bookmark02

2. Электронный корректор количества (объема) газа СПГ 741.01. URL: <http://www.vdgu.ru/catalog/el-korr/spg74101.html>
3. Электронные корректоры. URL: <http://www.vdgu.ru/catalog/el-korr/el-korr.html>
4. ГОСТ 30319.2-96. Межгосударственный стандарт. "Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости". URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a26/4294847474.pdf>
5. ГОСТ 30319.2-2015. Межгосударственный стандарт. "Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода". URL: <https://www.vlrg.ru/uploads/Doc17.pdf>
6. ГОСТ Р 70927-2023. Национальный стандарт РФ. "Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление коэффициента сжимаемости в области низких температур". URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/811/81194.pdf>
7. ГОСТ Р 8.769-2011. Национальный стандарт РФ. "Газ природный. Фактор сжимаемости газовой фазы". URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/469/4293792499.pdf>
8. ГОСТ Р 8.914-2016. Национальный стандарт РФ. "Калориметры газовые. Методика поверки". URL: <http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4293752/4293752524.pdf>
9. Москалев И.Н., Костюков В.Е. Микроволновые методы оперативного анализа природного газа и конденсата. В 3 томах. Т III. Саров, ФГУП "РЯФЦ-ВНИИЭФ", 2014. 282 с.
10. Голант В.Е. СВЧ методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 326 с.
11. Москалев И.Н., Стефановский А.М. Диагностика плазмы с помощью открытых осесимметричных резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 145 с.
12. Вышиваный И.Г., Москалев И.Н., Костюков В.Е. и др. Плотнометрия попутных нефтяных и природных газов на основе измерения их диэлектрической проницаемости: анализ проблемы // "Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности". М.: ВНИИОЭНГ, 2008. № 10. С. 8–12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11672737>
13. Вышиваный И.Г., Москалев И.Н., Костюков В.Е. и др. Диэлькометрическая плотнометрия нефтяных и природных газов: принципиальные трудности. // "Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности". М.: ВНИИОЭНГ, 2008. № 11. С. 7–11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11672745>
14. Вышиваный И.Г., Москалев И.Н., Костюков В.Е. и др. Экспериментальное определение плотности природного газа на основе измерения его диэлектрической проницаемости. // "Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности". М.: ВНИИОЭНГ, 2008. № 12. С. 6–11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12798204>

15. *Потапов А.А.* Диэлектрический метод исследования вещества. Иркутск, Издание Иркутского университета, 1990. 258 с.
 16. *Кобелев В.П., Чечейбаев М.С.* Современное состояние теории и методов определения плотности жидкостей и газов по диэлектрическим величинам. Обзорная информация ГК СССР по стандартам ВНИЦ ГСССД. МЭИ. М.: Изд. стандартов, 1979. 75 с.
 17. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.-М.: Наука, 1972. 220 с.
 18. *Москалев И.Н., Костюков В.Е., Волков В.В., и др.* Способ определения коэффициента сжимаемости и их смесей. Патент РФ 2.478 195, МПК 9/00 (2006.01) // "Изобретения. Полезные модели". 2013. № 9.
- ООО "Глобус", г. Белгород (Москалев И.Н.)*
- АО "ММЗ "АВАНГАРД", Москва (Горбунов Ю.А.)*
- Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва (Семенов А.В.)*
- ООО "Научно-исследовательский институт технологий органической, неорганической химии и биотехнологий" (ООО "НИИТОНХ и БТ"), г. Саратов (Кузнецов С.А.)*
- АО "Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина", г. Арзамас (Хапов Д.А.)*

Контакты: *Хапов Дмитрий Александрович*,
khda@mail.ru

Материал поступил в редакцию 2.06.2026

OPERATIONAL METER FOR THE COMPRESSIBILITY FACTOR OF GASES AND THEIR MIXTURES

I. N. Moskalev¹, Y. A. Gorbunov², A. V. Semenov³, S. A. Kuznetsov⁴, D. A. Khapov⁵

¹LLC "Globus", Belgorod, Russia

²JSC "MMZ AVANGARD", Moscow, Russia

³Moscow Witte University, Moscow, Russia

⁴LLC "Research Institute of Organic and Inorganic Chemistry Technologies and Biotechnology", Saratov, Russia

⁵Arzamas Instrument-Building Plant, Arzamas, Russia

When determining natural gas consumption using throttling devices, as well as when converting the volumes of gas produced or transferred under operating conditions to standard cubic meters, it is necessary to know its compressibility factor (k). Currently, it is determined by calculation. Possible errors of the calculated k value from the real one can reach 2–3% depending on the gas composition, as well as the magnitudes of operating pressures and temperatures. Due to the large volumes of gas consumption and its high cost, this amounts to tens or hundreds of millions of rubles for one of the parties — the seller or the buyer — when purchasing gas. An experimental method for determining the k value is being considered, based on determining the gas density through its dielectric permittivity, which provides higher responsiveness and significantly lower error. Experimental data for determining the value of k , obtained using microwave (MW) and centimeter-wave (CW) resonators for carbon dioxide at pressures of approximately 20–40 atm and temperatures of about 30 °C and 18 °C, are presented. The obtained data is compared with reference k values (taken from the literature). In most cases, the difference between the reference $k_{\text{КОИТР}}$ and the experimental $k_{\text{ЭКП}}$ values does not exceed approximately 0.5%.

Keywords: natural gas, conversion to standard m³, compressibility factor, dielectric permittivity, volumetric resonator, millimeter waves

REFERENCES

1. Grishin D.V., Golod G.S., Moskalev I.N., Derevyagin G.A., Khapov D.A., Kochnev V.V. [Method and technique of continuous determination of gases compressibility factor]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry], 2016, no. 1, pp. 11–20. (In Russ.). URL: http://www.vniioeng.ru/_user_files/file/ants/at/Automation_Telemechanization_2016-01_rus.htm#Bookmark02
2. Vodogazuchet. *Ehlektronnyi korrektor kolichestva (objema) gaza SPG741.01* [SPG741.01 Electronic Gas Volume Corrector]. URL: <http://www.vdgu.ru/catalog/el-korr/spg74101.html> (In Russ.).
3. Vodogazuchet. *Ehlektronnye korrektoory* [Electronic correctors]. (In Russ.). URL: <http://www.vdgu.ru/catalog/el-korr/el-korr.html>
4. GOST 30319.2-96. *Interstate Standard. "Natural gas. Methods for calculating physical properties. Determination of the compressibility factor"*. (In Russ.). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a26/4294847474.pdf>
5. GOST 30319.2-2015. *Interstate Standard. "Natural gas. Methods for calculating physical properties. Calculation of physical properties based on density data at standard conditions and the content of nitrogen and carbon dioxide"*. (In Russ.). URL: <https://www.vlrg.ru/uploads/Doc17.pdf>
6. GOST R 70927-2023. *Russian Federation National Standard. "Natural Gas. Methods for Calculating Physical Properties. Calculation of the Compressibility Coefficient at Low Temperatures"*. (In Russ.). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/811/81194.pdf>
7. GOST R 8.769-2011. *Russian Federation National Standard. "Natural Gas. Gas-Phase Compressibility Factor"*. (In Russ.). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/469/4293792499.pdf>
8. GOST R 8.914-2016. *Russian Federation National Standard. "Gas Calorimeters. Verification Procedures"*. (In Russ.). URL: <http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4293752/4293752524.pdf>
9. Moskalev I.N., Kostyukov V.E. *Mikrovolnovye metody operativnogo analiza prirodnogo gaza i kondensata. V 3 tomakh. T III* [Microwave Methods for the Rapid Analysis of Natural Gas and Condensate. In 3 volumes. Vol. III]. Sarov: FGUP "RYAFTS-VNIIEHF" Publ., 2014. 282 p. (In Russ.).
10. Golant V.E. *SVCh metody issledovaniya plazmy* [Microwave Methods for Plasma Analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1968. 326 p. (In Russ.).
11. Moskalev I.N., Stefanovskii A.M. *Diagnostika plazmy s pomoshch'yu otkrytykh osesimmetrichnykh rezonatorov*

- [Plasma Diagnostics Using Open Axially Symmetric Resonators]. Moscow: Ehnergoatomizdat Publ., 1985. 145 p. (In Russ.).
12. Vyshivany I.G., Moskaev I.N., Kostyukov V.E., et al. [Density measurement of associated oil and natural gas based on measurements of their dielectric permittivity: an analysis of the problem]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry], 2008, no. 10, pp. 8–12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11672737>
 13. Vyshivany I.G., Moskaev I.N., Kostyukov V.E., et al. [Dielectric Density Measurement of Crude Oil and Natural Gas: Fundamental Challenges]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry], 2008, no. 11, pp. 7–11. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11672745>
 14. Vyshivany I.G., Moskaev I.N., Kostyukov V.E., et al. [Experimental Determination of the Density of Natural Gas Based on Measurements of Its Dielectric Permeability]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in oil industry], 2008, no. 12, pp. 6–11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12798204> (In Russ.).
 15. Potapov A.A. *Dielektricheskii metod issledovaniya veshchestva* [The Dielectric Method of Studying Matter]. Irkutsk: Izdanie Irkutskogo universiteta, 1990. 258 p. (In Russ.).
 16. Kobelev V.P., Checheibaev M.S. *Sovremennoe sostoyanie teorii i metodov opredeleniya plotnosti zhidkosti i gazov po dielektricheskim velichinam. Obzornaya informatsiya GK SSSR po standartam VNITs GSSSD. MEHI* [Current Status of the Theory and Methods for Determining the Density of Liquids and Gases Based on Dielectric Properties. Overview by the State Committee of the USSR on Standards of the All-Union Scientific Research Institute of State Standards and Metrology. Moscow Power Engineering Institute]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1979. 75 p. (In Russ.).
 17. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* [Handbook of the Thermophysical Properties of Gases and Liquids]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 220 p. (In Russ.).
 18. Moskaev I.N., Kostyukov V.E., Volkov V.V. et al. [Method for determining the compressibility coefficient of materials and their mixtures. Russian Federation Patent No. 2,478,195, IPC 9/00 (2006.01)]. *Izobreteniya. Poleznye modeli* [Inventions. Utility Models], 2013, no. 9. (In Russ.).

Contacts: Khapov Dmitriy Aleksandrovich,
khda@mail.ru

The article was received by the editorial office on 2.06.2026

INTRODUCTION

During various technological operations—gas production, drying, transportation, delivery to gas distribution stations, and sale to consumers—gas is at various pressures and temperatures (under operating conditions). However, all mutual settlements during gas transfer from one enterprise to another are made in standard cubic meters (SCM). In this case, it is necessary to introduce corrections related to the difference between the pressure, temperature, and compressibility factor under operating conditions (P_p , T_p , Z_p) and the same parameters under standard conditions (P_c , T_c , Z_c), which, in turn, contain errors associated with the class of the measuring device [1]. If an enterprise has produced or transferred V_p of gas at pressure P_p and temperature T_p , then conversion to SCM is carried out using the relationship

$$V_c = V_p \cdot \frac{T_c}{T_p} \cdot \frac{P_p}{P_c} \cdot \frac{Z_c}{Z_p} \quad (1)$$

Here $T_c = 293$ K, $P_c = 760$ mmHg. (1 atm.), Z_c and Z_p are the gas compressibility factors under standard and operating conditions.

The ratio $k = Z_p / Z_c$ is called the compressibility factor. The quantities Z_c , Z_p and, accordingly, k are functions of the gas type (and for mixtures, functions of the gas composition), operating pressure, and operating temperature.

V_p is currently converted into V_c automatically using special corrector devices that receive data on the gas's thermobaric parameters (P_p , T_p) and the compressibility factors Z_p , Z_c [2, 3]. Although modern instruments for measuring operating pressures and temperatures can achieve high levels of accuracy, the compressibility factor is currently calculated.

Moreover, depending on the pressure and temperature ranges, as well as the gas composition, the relative error in the compressibility factor can reach 2–3% and is decisive when converting working gas volumes to standard m^3 using relation (1). Another approach to determining k , namely, experimental, is considered below. It is shown that this method is significantly better than the calculation in terms of both efficiency and error value.

MODERN METHODS OF DETERMINING COMPRESSIBILITY FACTOR AND THEIR DISADVANTAGES

Compressibility factors can be measured experimentally using specialized physical equipment (so-called PVT bombs). The technique for determining the $Z(P, T)$ relationship is quite complex and cannot currently be reproduced in a gas plant laboratory.

Moreover, such measurements require significant labor and time. Therefore, analytical calculation methods (using a number of intermediate coefficients) are used in practice. They are described in detail in GOSTs / State Standards (see GOST 30319.2-96; GOST 30319.2-2015; GOST R 70927-2023; GOST R 8.769-2011; GOST R 8.914-2016 [4–8]). The error in calculating the Z value depends on the method used, as well as on the accuracy of the input data, and ranges from 1.1 to 2.1%, while the deviation from experimental data reaches 3.1% (GOST 30319.2-96, an equation of state GERG-91 mod.) [4].

When measuring pressure, temperature, and differential pressure ΔP , ranging 0.1–0.5%, such large errors are critical, as the error in determining the quantity of gas sold (or purchased) given its large volumes and current gas prices costs one party tens and hundreds of millions of dollars (!)*.

Note also that the calculated value of Z is an average over the period between measurements of the quantities included in the initial calculated data when calculating gas flow rate. If the component composition changes during this period, the uncontrolled error may exceed the error limits of the calculated value of Z . Hence, the requirement to ensure continuous monitoring of the compressibility factor Z , i.e., its monitoring is a pressing task in gas flow measurement and is currently not performed solely due to the lack of acceptable technical feasibility.

BASIC PHYSICAL IDEA

The definition of the compressibility factor is based on the relationship between the gas permittivity ϵ , its density ρ , and the resonator's natural frequency shift [9].

First, we use the equation of state for a real gas in the Mendeleeev–Clapeyron form:

* In 2020, the consumption of natural gas in the Republic of Udmurtia was $5 \cdot 10^9$ SCM. The ratio (1) was used in commercial calculations. Let's assume that the Udmurt industrial consumers paying to Gasprom for delivered gas chose a ratio for compressibility factor calculating $k = Z_p / Z_c$ just 1% lower than the true one. The prices for gas range from USD 1000 to 2000 per 1000 SCM, let's assume that the price was USD 1500. 1% of $5 \cdot 10^9$ SCM is $5 \cdot 10^7$ SCM. Then the cost of $5 \cdot 10^7$ SCM is $(5 \cdot 10^7 \text{ SCM} / 1000 \text{ SCM}) \cdot \text{USD } 1500 = \text{USD } 7.5 \cdot 10^7$. It means that if there was a mistake in billing due to an erroneous compressibility factor settling (resulting in calculated overestimation of delivered gas), the Republic overpaid USD 75 mln. It does not play a substantial role that the domestic Russian prices for gas are lower than the world ones.

$$PV = \frac{m}{M} RTZ. \quad (2)$$

It is valid for both standard conditions (subscript "c") and operating conditions (subscript "p"). We write equation (2) in terms of the gas density $\rho = \frac{m}{V}$:

$$\rho_c = \frac{m}{V_c} \frac{R}{M} T_c Z_c, \quad (3)$$

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \frac{R}{M} T_p Z_p. \quad (4)$$

From relations (3) and (4), we find:

$$k = \frac{Z_p}{Z_c} = \frac{\rho_c P_p T_c}{\rho_p P_c T_p}. \quad (5)$$

The basic idea for determining the compressibility coefficient k is based on relation (5) (we assume the operating pressure P_p and temperature T_p are known).

When the microwave resonator is filled with gas, the propagation speed of radio waves decreases, and the resonator frequency f_0 shifts downward and takes on a new value f_1 . The relative frequency shift is determined by the permittivity of the gas [10, 11]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2}(\varepsilon - 1), \quad (6)$$

where $\Delta f = f_0 - f_1$.

Next, the gas density value ρ is found by measuring the dielectric permittivity of the gas ε : it is proposed to determine the gas densities ρ_p and ρ_c using resonators that measure the permittivity ε under operating (ε_p) and standard (ε_c) conditions by the shift in the natural frequency of the (i.e., evacuated) resonator f_0 .

THEORETICAL BASIS OF THE DENSITY MEASUREMENT METHOD

Let us discuss the method of measuring gas density ρ by determining its permittivity ε [12–16].

The method is based on the Clausius – Mossotti equation, which relates the microscopic parameters of a gas — its polarizability α and molar mass M — to its macroscopic, measurable parameters — the density of the substance ρ and its relative permittivity (RP) ε :

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{3\varepsilon_0}, \quad (7)$$

where N_A is Avogadro's constant; $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m is the electric constant.

The right-hand side of equation (7) consists of the fundamental constant ε_0 and two molecular constants — N_A and α — and is called the molar polarization:

$$\frac{N_A \alpha}{3\varepsilon_0} = \Pi. \quad (8)$$

Hence — and this is the central point of the method — *polarization is also a constant and is independent of temperature, pressure, and the frequency of the external field.*

Resolving (7) for ρ , we obtain:

$$\rho = \frac{3\varepsilon_0}{N_A} \frac{M}{\alpha} \frac{(\varepsilon - 1)}{(\varepsilon + 2)}. \quad (9)$$

Since the value of ε for low pressures ($P \leq 10$ – 20 atm) does not differ significantly from 1 (e.g., for methane $\varepsilon = 1 + 0.0008 \cdot P$, for air), we can, as a first approximation, neglect the dependence of ε on pressure and set $\varepsilon + 2 = 3$. (At $P \sim 100$ atm, the dependence of ε must be taken into account).

Then (9) can be rewritten as

$$\rho = \frac{\varepsilon_0}{N_A} \frac{M}{\alpha} (\varepsilon - 1) = A(\varepsilon - 1). \quad (10)$$

The proportionality coefficient A , as can be seen from (10), can be calculated from the known values of M and α for a given gas:

$$A = \frac{\varepsilon_0}{N_A} \frac{M}{\alpha}. \quad (11)$$

Now, combining (6) and (10), we find an equation directly expressing the density through the measured frequency shift:

$$\rho = 3A \frac{2\Delta f / f_0}{\left(2\Delta f / f_0\right) + 3}. \quad (12)$$

To determine the density under operating conditions ρ_p , we must take the frequency shift under these

conditions $\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_p$, and to find the density under standard conditions ρ_c , we must take the shift under

these conditions $\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)_c$. Measuring the density using

relation (12) involves the following procedure. Gas is introduced into the densitometer resonator, its thermobaric parameters P and T are recorded, the shift in the resonator's natural frequency Δf is measured

when it is filled with gas, and the value of ρ is calculated using formula (12). The initial frequency of the resonator f_0 is determined in advance by measuring the resonator frequency at several pressure values P_i and extrapolating the straight line $f=f(P_i)$ to the point where $P_i = 0$.

FEATURES OF USING THE DIELECTRIC METHOD TO DETERMINE THE DENSITY OF OIL AND NATURAL HYDROCARBON GASES

Natural gas is a mixture of hydrocarbon gases, primarily methane, as well as ballast gases such as nitrogen, carbon dioxide, water vapor, hydrogen sulfide, and others. Therefore, the question of extending equation (7) to such a mixture is important.

Let the component composition of the gas be given by the following series (volume fractions in percent): $v_1(\text{CH}_4)$, $v_2(\text{C}_2\text{H}_6)$, $v_3(\text{C}_3\text{H}_8)$, etc. Let's return to the Clausius – Mossotti formula (7). If we are dealing with a gas mixture containing i types of pure gases, then the dipole moment of a volume unit will include the moments of all polarized molecules. Then relation (7) can be written as:

$$\frac{M_{\text{cm}}}{\rho_{\text{cm}}} \cdot \frac{(\epsilon_{\text{cm}} - 1)}{(\epsilon_{\text{cm}} + 2)} = \frac{N_A \alpha_{\text{cm}}}{3\epsilon_0}. \quad (13)$$

Here M_{cm} , ρ_{cm} , α_{cm} are the molar mass of the mixture, its density, and the polarizability of the mixture "molecules" (although, of course, no "mixture molecules" actually exist). Given a known volumetric content, they are calculated using the relations:

$$M_{\text{cm}} = \sum v_i M_i, \quad \rho_{\text{cm}} = \sum v_i \rho_i, \quad \alpha_{\text{cm}} = \sum v_i \alpha_i, \quad (14)$$

where M_i , ρ_i , α_i is the molar mass, density, and polarizability of the i -th component of the mixture;

$v_i = \frac{V_i}{\sum V_i}$, V_i is the partial volume of the i -th component.

From the Clausius – Mossotti equation for mixture (13), we find an expression for its density, which depends on ϵ_{cm} :

$$\rho_{\text{cm}} = K_{k-m} \cdot \frac{(\epsilon_{\text{cm}} - 1)}{(\epsilon_{\text{cm}} + 2)}, \quad (15)$$

where

$$K_{k-m} = \frac{3\epsilon_0}{N_A} \frac{M_{\text{cm}}}{\alpha_{\text{cm}}} = \frac{3\epsilon_0}{N_A} \frac{\sum v_i M_i}{\sum v_i \alpha_i}$$

is a coefficient depending on the molar mass of the components of the gas mixture M_i and their polarizabilities α_i .

Fundamentally, the Clausius – Mossotti formula for gas mixtures (13) is no different from the same formula for pure gas (7): it simply operates with the values of M , α , ρ , averaged over the composition of the gas mixture. However, there is a pitfall: when calculating real-time density for natural gases transported through pipelines, the composition of these gases is not constant: it varies from field to field and, most importantly, even within a single field, it changes over time.

This leads to uncontrolled variation in the coefficient K_{k-m} and, hence, to additional errors associated with compositional variations. This is a fundamental issue when measuring the densities of natural and petroleum gases. However, this disadvantage is totally erased when calculating the compressibility factor, as will be demonstrated later.

MAIN CALCULATION RELATION

Let us derive a relation by which the compressibility coefficient k can be practically calculated. From relations (5) and (12), we find

$$a_i = \frac{V_i}{\sum V_i} k = \frac{T_c P_p}{T_p P_c} \cdot \frac{\left(\frac{2\Delta f}{f_0} \right)_c}{\left(\frac{2\Delta f}{f_0} \right)_p} \cdot \frac{\left[\left(\frac{2\Delta f}{f_0} \right)_p + 3 \right]}{\left[\left(\frac{2\Delta f}{f_0} \right)_c + 3 \right]}. \quad (16)$$

A remarkable feature of expression (16) is as follows. Although the expression for density determined by the dielectric method (12) includes the Clausius–Mossotti coefficient K_{k-m} , which depends on the mixture composition and, in principle, is subject to variation with changes in gas composition, this coefficient is not included in expression (16). This allows for the rapid determination of k with a small error (determined only by the error in T , P , and $\Delta f/f_0$).

Indeed, since frequency is one of the most accurately measured parameters (it is easy to measure it with a relative error of $\delta f/f_0 = 10^{-6} - 10^{-7}$), it can be hoped that the measurement of relative shifts $(\Delta f/f_0)_c$ and $(\Delta f/f_0)_p$ can be carried out with an error of $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$, i.e., no more than 0.1–0.01% (this depends on the choice of measurement scheme and the quality factor of the resonator).

EXPERIMENTAL RESULTS

An experimental verification of the algorithm for determining the compressibility factor was conducted in [9] and repeated in a later study [1]. For safety reasons, carbon dioxide, which has a k value close to that of methane, was used. Furthermore, the availability of reference data for this gas in the literature was important [17]. The difference between [9] and [1] was primarily the use of different frequency ranges: in [9], this was the wavelength range of $\lambda \sim 3$ cm ($f \sim 10$ GHz), while in [1], it was the millimeter range ($\lambda \sim 0.8$ cm, $f \sim 35$ GHz). Since the measurement results were essentially similar, we will henceforth refer to [1].

A millimeter-wave Fabry – Perot resonator (FPR) with concave mirrors, consisting of beer can bottoms, was used for the measurements. The resonator was housed in a high-pressure enclosure rated for 10 MPa (Fig. 1).

Fig. 1. Assembly drawing of the compressibility factor sensor for the device Arzamas-1 prototype. 1 — load-bearing housing; 2, 3 — flanges for the upper and lower FPR mirrors; 4 — waveguide flange; 5, 6 — FPR mirrors; 7 — seal; Б — radio-transparent window; В — temperature sensor

A solid-state oscillator with a Gunn diode and a ferrite isolator protecting the oscillator from reflected waves served as a millimeter-wave source. The generator was frequency-controlled using a sawtooth voltage applied to the varactor. A detector head with a D607 diode served as a detector. The signal level from the resonator was several tens of millivolts. An example of a resonant peak obtained using this technique is shown in Fig. 2.

Fig. 2. Position of resonance picks on frequency scale at various absolute gas pressure values in the load-bearing housing
 $P = 0$, $P = P_c = 1$ atm and $P = P_p$

Figure 3 shows the signal from the resonator using a different electronic recording circuit—a personal computer and an IN PXI 7831R board.

Fig. 3. Resonance at the pressure of $P = 23.4$ atm, $t = 18^\circ\text{C}$.
Natural frequency $f_p = 34626$ MHz, half-width $\Delta F \approx 5.3$ MHz, quality factor $Q = 6530$

In work [9], measurements of the value of k were carried out in a small range of gas pressures of $23 \leq P \leq 33$ atm. The relative error (deviation from the control values of k taken from [17]) ranged from 0.25 to 1.3%. In work [1], the pressure range was wider — from 26 to 41 atm, and the relative error was in the interval from 0.12 to 1% in 10 cases and up to 3.9% in three cases (the points spiked). The error was determined by various factors — primarily a deviation of the gas temperature from that adopted in the calculation (a difference of only 1°C leads to an error of 0.3%), the errors in measuring the pressure, frequency shift Δf , extrapolating the control values of $k_{\text{контр}}$ (given in [17]), and a number of other factors.

Without a doubt, it can be reduced by taking strict measures to stabilize temperature and pressure, as well as more accurately calculating the compressibility factors Z_p and Z_c .

COMMERCIAL PROSPECTS. APPLICATION SCOPE

We will list the main points that suggest that the proposed "Highly Operative Meter for Compressibility Factor of Gases and Their Mixtures" may find wide application among large gas consumers: thermal power plants; boiler houses serving factories and residential complexes.

1. The scope of application of the meter is not limited by gas composition, pressure, or temperature, while calculation methods operate within limited ranges of these parameters (see GOSTs cited in Section 1 "Modern Methods for Determining...").

2. The device allows for the operational (continuous) determination of the k value, while calculation methods do not allow this.

3. The reliability level of the k value determined by the meter is significantly higher than that provided by calculation methods due to the fact that k is experimental and refers to the gas flowing through the pipeline at the time of measurement, while the calculated value refers to a composition determined previously.

4. The error in determining the k value by the meter will be $\sim 0.5\%$ or less, while for calculation methods, the calculation error in certain ranges of the parameters P_p , T_p , and mixture composition reaches 3.1%.

CONCLUSION

Considering all of the above, as well as high gas prices, with large-scale gas consumption, gas-fired enterprises are likely to prefer a device that provides an accurate k value to avoid overpaying money when purchasing gas (see the example with Udmurtia in Section 1). Since no company in the world currently

produces a device that measures k , we can expect to sell it abroad as well.

It's also worth noting that, in addition to its practical use in the gas industry, the meter may be in demand as a laboratory instrument in many other areas of physics and engineering dealing with gases.

It's also worth noting that a Russian Federation patent [18] was issued to the Yu.E. Sedakov Research

Institute of Measuring Systems (Nizhny Novgorod) for the method of determining the compressibility factor. However, it is currently unsupported, and if another company were to decide to produce such a meter, it would need to be re-registered to that company.