*НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2026, том 36, № 4, с. 93–104* *ISSN 0868-5886*

**ФИЗИКА ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

*УДК 51-74: 681.121.83*
*EDN:* GMFPTW

**© А. Л. Касенко, П. А. Щур, Е. А. Драч, И. Г. Борзунов, А. М. Баранов, 2026**

# РАЗРАБОТКА ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО ТЕРМОВОЛНОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА

Основным ограничением традиционных тепловых методов измерения расхода газа является их зависимость от теплофизических свойств среды, определяемых химическим составом. В условиях переменного состава природного газа, характерного для отечественных распределительных узлов, калибровочные характеристики сенсоров утрачивают достоверность при изменении содержания метана, азота или углекислого газа, что приводит к систематической погрешности измерений. В настоящей работе предложен альтернативный подход, в котором нестабильность состава газа перестает быть фактором неопределенности и становится информативным параметром. Для этого разработан частотно-модулированный термоволновый метод измерения объемного расхода природного газа, адаптированный для микротермальных МЭМС-сенсоров. Предложенный подход основан на анализе частотной зависимости разности фаз тепловых волн, регистрируемых терморезисторами, расположенными до и после нагревателя. В работе представлено теоретическое обоснование метода на основе нестационарного уравнения теплопроводности с учетом конвекции, результаты математического моделирования и оптимизация геометрии МЭМС-сенсора на оксиде циркония. Для расстояния между нагревателем и терморезисторами $L$ = 200 мкм обоснован выбор рабочих частот (33 Гц для конвективного режима и 300 Гц для диффузионного), рассчитаны коэффициенты температуропроводности и плотности, а также выполнены расчеты соответствующих сдвигов фаз для типичных скоростей потока (0.1 м/с и 1.0 м/с). На основе шести реальных составов природного газа, добываемого на территории РФ, показано, что при низкой скорости потока (0.1 м/с) вариация состава приводит к изменению фазового отклика в диапазоне от 138° до 146° на высокой частоте (300 Гц), что подтверждает чувствительность метода к теплофизическим свойствам среды. Полученные результаты открывают возможность создания самокалибрующихся расходомеров, способных автоматически учитывать изменение состава измеряемой среды.

*Ключевые слова*: МЭМС-сенсор, природный газ, частотно-модулированный, конвекция, диффузия, тепловая волна, температуропроводность, нагреватель, терморезистор, сдвиг фазы, частота

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционные МЭМС-сенсоры для определения расхода газа делятся на термоанемометрические, калориметрические и времяпролетные. Объединяет их то, что во всех методах определяют изменение температуры при постоянном или периодическом нагреве. Это делает их чувствительными к дрейфу температуры, составу газа, а также вынуждает использовать внешние датчики давления и температуры для пересчета в массовый (объемный) расход газа [1, 2].

Метод термоанемометрии использует конвективные тепловые потери в качестве основы для измерения скорости потока. В этом методе поток газа охлаждает нагреватель, и для поддержания его заданной температуры необходимо подводить дополнительную энергию. По величине этой энергии определяют скорость потока.

В основе калориметрического метода лежит принцип переноса тепла потоком от нагревателя к терморезисторам. В результате чего терморезистор, расположенный до нагревателя, охлаждается, а после него — получает дополнительное тепло и нагревается. По разности температур терморезисторов определяют скорость потока газа.

Как правило, измерения скорости потока с использованием классических методов термоанемометрии и калориметрии требуют предварительной калибровки МЭМС-сенсоров, причем отдельно для каждого газа, поток которого измеряется. Это связано с тем, что интенсивность теплопередачи от нагревателя к газу непосредственно зависит от типа газа. Это ограничивает использование этих методов для измерений в газовых смесях, особенно когда состав протекающего газа неизвестен или изменяется во время измерения.

Времяпролетный метод основан на измерении времени распространения теплового сигнала от источника тепла к приемнику (терморезистору), расположенному на заданном расстоянии вдоль направления потока [3]. Создав тепловую волну и зарегистрировав задержку прихода фронта теплового сигнала от источника к приемнику, можно

найти скорость потока. Приборов с времяпролетными МЭМС-сенсорами достаточно мало. Это обусловлено высокой сложностью проведения измерений. Тем не менее, несмотря на технические трудности, данный метод имеет преимущество по сравнению с анемометрическими и калориметрическими методами, т.к. это прямой метод измерения скорости потока [4, 5].

Традиционные калориметрические и времяпролетные МЭМС-сенсоры основаны на стационарном или импульсном переносе тепла и не используют параметры непрерывных температурных волн (частоту, фазу). Из-за этого они не могут напрямую определять теплофизические свойства протекающего газа.

В то же время методы периодического нагрева, широко применяемые для исследования свойств материалов [6, 7], лишены этого недостатка. Возбуждаемые в среде температурные волны несут информацию о ее теплоемкости, температуропроводности и плотности. Эти данные необходимы для корректного измерения расхода природного газа. Использование данного подхода открывает путь к многопараметрическим измерениям и созданию самокалибрующихся сенсоров — возможностей, недоступных для современных классических технологий.

К настоящему времени были представлены различные конструкции расходомеров газа, основанные на явлении тепловых волн [8, 9]. При этом основной упор делался на поиске подходов, обеспечивающих измерения скоростей независимо от состава протекающего газа [10].

Однако МЭМС-сенсоры потока газа до сих пор не рассматривались для возбуждения, регистрации и анализа тепловые волн с целью проведения измерений расхода природного газа. При реализации термоволнового метода инициаторы тепловой волны и детекторы волны изготавливались на основе микропроводов, расположенных параллельно друг другу на расстояниях несколько миллиметров друг от друга [11].

На основе имеющихся исследований можно ожидать, что применение МЭМС-сенсоров на тепловых волнах в счетчиках газа позволит решить проблему метрологической точности, возникающую из-за нестабильности состава природного газа во времени. Кроме того, МЭМС-сенсоры на основе тепловых волн должны иметь более широкий динамический диапазон измеряемых потоков [12], не менее чем 120, который требуется для счетчиков бытового газа. Например, наиболее распространенные бытовые счетчики газа измеряют поток в диапазоне от 0.06 м$^3$/ч до 7 м$^3$/ч (при диаметре входной трубы счетчика 32 мм это соответствует скорости потока от 0.021 до 2.42 м/с).

В данной работе будет рассмотрен новый подход к проведению независимых измерений скорости потока газа и его коэффициента температуропроводности, основанный на измерении частотной зависимости разности фаз тепловых волн на терморезисторах в МЭМС-сенсоре, расположенных до и после нагревателя. Для достижения поставленной цели в работе проведен теоретический анализ нестационарного уравнения теплопроводности с учетом конвективного переноса газа в широком диапазоне частот тепловых волн, выполнено моделирование отклика МЭМС-сенсора в зависимости от состава природного газа и проведена оптимизация геометрии МЭМС-сенсора для проведения измерений расхода газа.

Предлагаемый подход основан на измерениях частотно-модулированных тепловых волн, возбуждаемых в газовой среде источником тепла с гармоническим изменением температуры (ЧМТ-метод).

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Распространение тепловой волны в потоке газа основано на двух явлениях — вынужденной конвекции и тепловой диффузии. В условиях, когда конвекция является доминирующим фактором, влиянием диффузии на скорость распространения волны можно пренебречь, приняв, что скорость тепловой волны почти равна скорости потока. Это позволяет проводить абсолютное измерение скорости потока, что означает нечувствительность метода к изменениям параметров в потоке газа, а следовательно, и его состава.

В работе будет проанализирован теоретический отклик МЭМС-сенсора, предназначенного для измерения расхода газа и состоящего из нагревателя и двух терморезисторов. Терморезисторы расположены перед и после нагревателя, на который подается переменное напряжение по закону:

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t), \qquad (1)$$

где $U_0 > U_1 > 1$.

Если напряжение на нагревателе изменяется во времени, это приводит к периодическим колебаниям температуры газа. Такие колебания будут порождать температурные волны, которые распространяются от нагревателя в сторону терморезисторов. Скорость тепловой волны будет зависеть от того, совпадает ли направление волны с направлением движения газа или нет. Поэтому терморезисторы будут нагреваться со сдвигом по фазе.

Мгновенная мощность, выделяемая на нагревателе с сопротивлением R, будет подчиняться закону:

$$Q(t)=\frac{U^2(t)}{R}=\frac{\left(U_0+U_1\sin(\omega t)\right)^2}{R}$$

или

$$Q(t)=\underbrace{\frac{U_0^2}{R}+\frac{U_1^2}{2R}}_{Q_{\mathrm{DC}}}+\frac{2U_0U_1}{R}\sin(\omega t)-\frac{U_1^2}{2R}\cos(2\omega t). \quad (2)$$

Первые два слагаемых ($Q_{\mathrm{DC}}$) в уравнении (2) — это постоянная составляющая, создающая базовый температурный фон. Третье слагаемое ($Q_\omega$) — это полезный сигнал для измерения, который несет информацию о потоке газа. Последнее слагаемое изменяется с двойной частотой и является паразитным сигналом. Данный паразитный сигнал обычно намного меньше полезного сигнала (вследствие обычного соотношения $U_0 \gg U_1$). Им можно пренебречь или отфильтровать.

Для анализа отклика МЭМС-сенсора расхода газа нас интересует только компонента на частоте $\omega$:

$$Q_\omega(t)=Q_{\omega,\mathrm{amp}}\cdot\sin(\omega t)=\mathrm{Im}\left\{\hat{Q}e^{\mathrm{j}\omega t}\right\},$$

где комплексная амплитуда

$$\hat{Q}=-\mathrm{j}\cdot Q_{\omega,\mathrm{amp}}=-\mathrm{j}\cdot\frac{2U_0U_1}{R}.$$

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В основе частотно-модулированного теплового метода лежит нестационарное уравнение теплопроводности с учетом конвективного переноса для газа в канале. В одномерном приближении (вдоль оси потока $x$) оно записывается как:

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\upsilon\frac{\partial T}{\partial x}\right)=k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+Q(x,t), \quad (3)$$

где:

- $\rho$ — плотность газа;
- $c_p$ — удельная теплоемкость при постоянном давлении;
- $\upsilon$ — скорость потока газа;
- $k$ — коэффициент теплопроводности газа;
- $Q(x, t)$ — источник тепла (нагреватель) [Вт/м$^3$] удельная мощность.

Введем параметр температуропроводности:

$$\alpha=\frac{k}{\rho c_p}. \quad (4)$$

Тогда уравнение (3) примет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\upsilon\frac{\partial T}{\partial x}=\alpha\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{Q(x,t)}{\rho c_p}. \quad (5)$$

Так, если уравнение теплопереноса линейно относительно температуры, то отклик на гармоническое возбуждение нагревателя также будет гармоническим на той же частоте:

$$T_\omega(x,t)=\mathrm{Im}\left\{\Theta(x)\cdot e^{\mathrm{j}\omega t}\right\},$$

где $\Theta(x)$ — комплексная амплитуда температуры, удовлетворяющая уравнению:

$$\alpha\frac{\mathrm{d}^2\Theta}{\mathrm{d}x^2}-\upsilon\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}x}-\mathrm{j}\omega\Theta=-\frac{\hat{Q}}{\rho c_p}\delta(x), \quad (6)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция (в первом приближении можно считать, что вся мощность выделяется в точке $x=0$ (на нагревателе).

Решением уравнения (6) будет:

$$\Theta(x)=\frac{\hat{Q}}{2\alpha\rho c_p K}\exp\left(\frac{\upsilon x}{2\alpha}-Kx\right),$$

где $K=\sqrt{\frac{\upsilon^2}{4\alpha^2}+\mathrm{j}\frac{\omega}{\alpha}}$ — комплексное волновое число (тепловой волны).

Запишем комплексное волновое число $K$ в алгебраическом виде:

$$K=\sqrt{\frac{\upsilon^2}{4\alpha^2}+\mathrm{j}\frac{\omega}{\alpha}}=\xi+\mathrm{j}\zeta.$$

Тогда выражение для $\Theta(x)$ упрощается до вида затухающей волны:

$$\Theta(x)\propto\exp\left(-\left(\xi-\frac{\upsilon}{2\alpha}\right)x\right)\cdot\exp(-\mathrm{j}\zeta x),$$

где $\propto$ — знак обратной пропорциональности:

- $\xi$ (действительная часть) отвечает за амплитудное затухание,
- $\zeta$ (мнимая часть) отвечает за фазовый сдвиг.

Измеряемым параметром МЭМС-сенсора являются фазовые сдвиги откликов на двух терморезисторах, расположенных симметрично на расстоянии $L$ от нагревателя (Upstream в точке $-L$ (перед нагревателем), Downstream в точке $+L$ (после нагревателя)).

Разность фаз между сигналами Downstream и Upstream определяется мнимой частью волнового числа:

$$\Delta\varphi(\omega)=\arg\left(\Theta(L)\right)-\arg\left(\Theta(-L)\right)\approx -2\zeta L. \quad (7)$$

Коэффициент –2 появляется потому, что мы измеряем разность фаз между двумя точками, разнесенными на расстояние $-2L$ (от $-L$ до $+L$), и фаза меняется линейно с координатой $x$ с коэффициентом $-\zeta$.

Так как $K = \sqrt{\frac{\upsilon^2}{4\alpha^2} + \mathrm{j}\frac{\omega}{\alpha}}$, то $\zeta$ — это мнимая часть этого корня:

$$\zeta = \mathrm{Im}\left(\sqrt{\frac{\upsilon^2}{4\alpha^2} + \mathrm{j}\frac{\omega}{\alpha}}\right). \quad (8)$$

Для терморезистора Downstream ($x = +L$): $\varphi(L) = -\zeta \cdot L$ (сигнал отстает от нагревателя на величину $\zeta L$). Для терморезистора Upstream ($x = -L$): $\varphi(-L) = -\zeta\ (-L) = +\zeta \cdot L$.

Подставляя уравнение (8) в формулу (7), получаем итоговое уравнение, которое связывает измеряемую величину (фазу) с искомыми физическими свойствами (скоростью потока газа $\upsilon$ и температуропроводностью газа $\alpha$):

$$\Delta\varphi(\omega) = -2L \cdot \mathrm{Im}\left(\sqrt{\frac{\upsilon^2}{4\alpha^2} + \mathrm{j}\frac{\omega}{\alpha}}\right). \quad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что на низких частотах основным является член, включающий $\upsilon$ (конвекция). На высоких частотах преобладает член с $\omega$ (диффузия). Это и позволяет независимо определять скорость и состав газа (через параметр $\alpha$) по измерениям разности фаз $\Delta\varphi$.

Таким образом, особенность частотно-модулированного метода заключается в математическом разделении скорости потока $\upsilon$ и температуропроводности $\alpha$ за счет различной частотной зависимости фазового сдвига. На высокой частоте $\omega \gg \frac{\upsilon^2}{4\alpha}$ сдвиг фаз из уравнения (9) $\Delta\varphi \approx -L\sqrt{\frac{2\omega}{\alpha}}$ будет зависеть только от $\alpha$. На низкой частоте $\omega \ll \frac{\upsilon^2}{4\alpha}$ сдвиг фаз из уравнения (9) $\Delta\varphi \approx -\frac{2L\omega}{\upsilon}$ будет зависеть только от $\upsilon$.

Далее, используя определение температуропроводности $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, можно найти плотность газа $\rho = \frac{k(T,P,\text{состав})}{\alpha c_p(T,P,\text{состав})}$.

Для чистого метана значения $k$ и $c_p$ известны. Плотность газа вычисляется напрямую.

Для природного газа (переменный состав) измеренное значение $\alpha$ является прямым индикатором состава. При этом можно использовать калибровочную поверхность $\rho = f(\alpha, T)$, построенную по уравнению состояния AGA-8 или данным NIST [13].

Расчет массового расхода газа $m$ проводят по уравнению:

$$m = \rho \cdot \upsilon \cdot A_{\text{channel}},$$

где $A_{\text{channel}}$ — площадь сечения измерительного канала.

Объемный расход при стандартных условиях:

$$Q_{\text{std}} = \frac{m}{\rho_{\text{std}}}.$$

Пример рассчитанных значений плотности газа $\rho$ при разных значениях измеренного коэффициента $\alpha$ представлен в табл. 1.

**Табл. 1.** Пример калибровочной таблицы при $P$ = 101.325 кПа, $T$ = 293.15 К

| Измеренное значение $\alpha$, $\times 10^{-5}$ м²/с | Предполагаемый состав | Рассчитанное значение $\rho$, кг/м³ | Изменение плотности газа от его состава |
|---|---|---|---|
| 2.30 | 100% $CH_4$ | 0.668 | Базовый случай, $\rho_б$ |
| 2.20 | 95% $CH_4$ + 5% $N_2$ | 0.685 | +2.5% к $\rho_б$ |
| 2.10 | 90% $CH_4$ + 10% $N_2$ | 0.703 | +5.2% к $\rho_б$ |
| 2.00 | 85% $CH_4$ + 10% $N_2$ + 5% $CO_2$ | 0.728 | +9.0% к $\rho_б$ |
| 1.90 | 85% $CH_4$ + 10% $CO_2$ + 5% $C_2H_6$ | 0.751 | +12.4% к $\rho_б$ |
| 1.80 | 80% $CH_4$ + 15% $CO_2$ + 5% $N_2$ | 0.778 | +16.5% к $\rho_б$ |

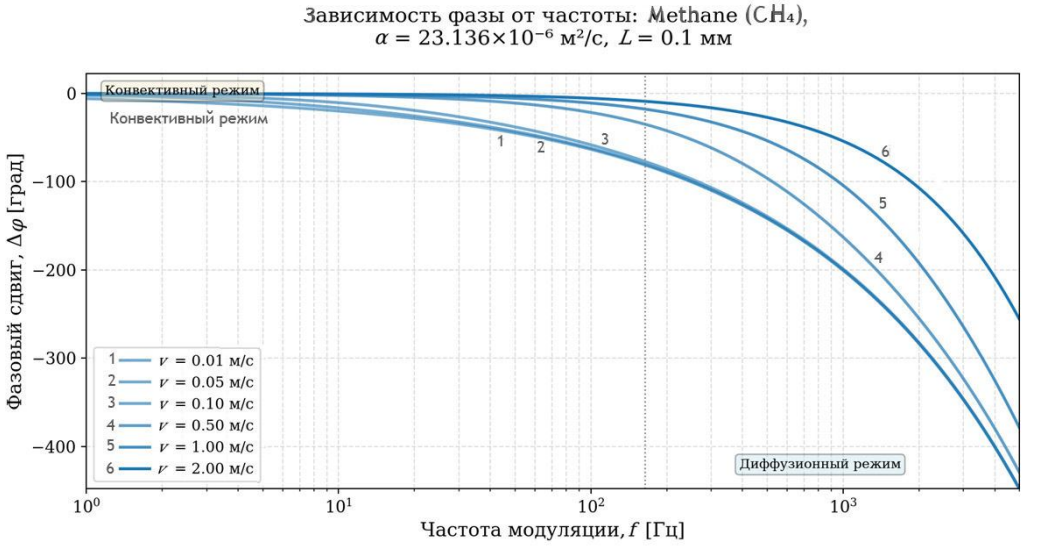


**Рис. 1.** Теоретические зависимости фазового сдвига от частоты возбужденной тепловой волны при разных скоростях потока метана

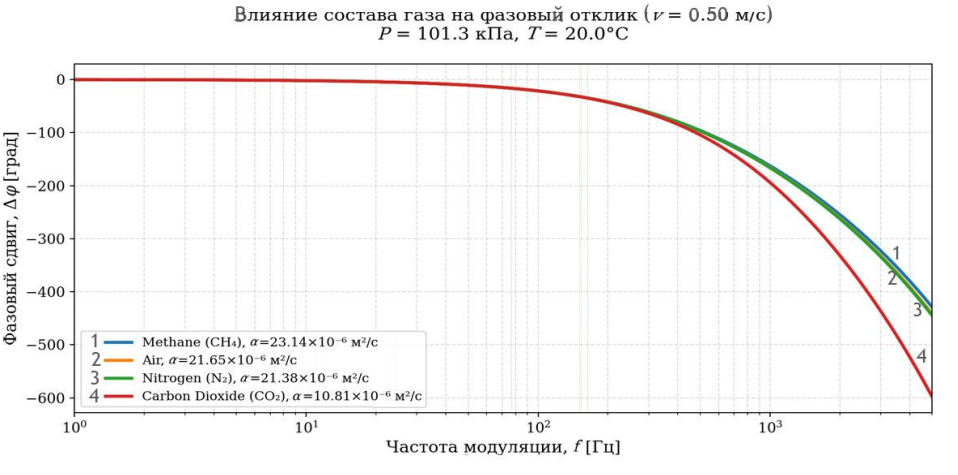


**Рис. 2.** Теоретические зависимости фазового сдвига от частоты, возбужденной тепловой волной, для метана, воздуха, азота и диоксида углерода при скорости потока 0.5 м/с

На рис. 1 приведены теоретические графики фазового сдвига в зависимости от частоты прикладываемого напряжения для различных скоростей движения потока метана (от 0.1 м/с до 2 м/с) при расстоянии $L$ между нагревателем и терморезисторами, равном 100 мкм. Расчет выполнен для температуры 20 ˚С.

Из рис. 1 видно, что сдвиг фаз (абсолютное значение) увеличивается с увеличением частоты. Это объясняется изменением влияния частотного слагаемого в уравнении (9). При этом видно, что чем меньше скорость потока газа, тем больше фазовый сдвиг.

На рис. 2 представлены теоретические зависимости фазового сдвига от частоты для различных газов, скорость потока которых равна 0.5 м/с. Расчеты проведены для стандартных условий и $L = 100$ мкм. Из рис. 2 видно, что на низких частотах (при одинаковой скорости потока) все газы дают одинаковый фазовый сдвиг, несмотря на различие их температуропроводности $\alpha$. Это означает, что в данном режиме фазовый сдвиг определяется только кинематикой переноса тепла потоком, а не теплофизическими свойствами газа.

Приведенный выше анализ позволяет разделить измерения скорости и состава газа, используя две

разные частоты измерения. Тем не менее метод нуждается в оптимизации с точки зрения выбора низких и высоких частот, а также выбора расстояния между нагревателем и терморезисторами $L$.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОПТИМИЗАЦИЯ ЧМТ-МЕТОДА

Введем понятие характеристической частоты, при которой происходит переход от конвекционного режима распространения тепловой волны (когда перенос теплоты определяется движением среды со скоростью $\upsilon$) к диффузионному (когда перенос теплоты определяется преимущественно молекулярными процессами). Переход между режимами происходит, когда два слагаемых под корнем становятся сравнимыми по величине:

$$\frac{\upsilon^2}{4\alpha^2} \approx \frac{\omega}{\alpha}. \qquad (10)$$

Однако в этом соотношении отсутствует характеристический размер МЭМС-сенсора — расстояние между нагревателем и терморезисторами ($L$). Поэтому найдем характеристическую частоту следующим образом.

В гармоническом режиме нагрева переход между режимами можно определить из условия равенства характерных пространственных масштабов затухания тепловой волны. Масштаб затухания тепловой волны:

– для конвекционного члена — $\ell \sim \frac{\upsilon}{\omega}$;

– для диффузионного члена — $\ell \sim \left(\frac{\alpha}{\omega}\right)^{\frac{1}{2}}$.

На границе режимов эти масштабы сравнимы с расстоянием $L$. Тогда получаем следующие приближенные уравнения для оценки значения характеристической частоты $\omega_c$:

$$\omega_c = \frac{\upsilon}{L} \quad \text{и} \quad \omega_c = \frac{\alpha}{L^2}.$$

В нашем случае удобно пользоваться вторым определением характеристической частоты, в который входит $L$ и не входит скорость потока:

$$f_c = \frac{\alpha}{2\pi L^2}. \qquad (11)$$

Равенство двух этих частот дает $\frac{\upsilon}{L} = \frac{\alpha}{L^2}$ или $\frac{\upsilon L}{\alpha} = 1$, что совпадает с критерием Пекле $(\mathrm{Pe} \approx 1)$ для определения границы между конвекционным и диффузионным режимами распространения тепла.

**Табл. 2.** Расчет характеристических частот

| Расстояние $L$, мкм | $f_c = \frac{\alpha}{2\pi L^2}$ |
|---|---|
| 10 | ~36.6 кГц |
| 20 | ~9.15 кГц |
| 35 | ~2.99 Гц |
| 50 | ~1.47 кГц |
| 75 | ~650 Гц |
| 100 | ~366 Гц |

В табл. 2 представлены значения характеристической частоты для МЭМС-сенсора с разными значениями $L$ в среде метана.

На рис. 3 и 4 представлены теоретические расчеты для фазового сдвига сигнала МЭМС-сенсора при разных значения $L$ и двух скоростях потока метана: 1 м/с и 0.1 м/с (типичные значения скоростей газа в бытовой сети).

Из рис. 3 и 4 видно, что для обеспечения разумной величины фазового сдвига необходимо найти компромисс между скоростью потока и расстоянием между нагревателем и терморезисторами. При скорости 1 м/с необходимо увеличивать расстояние $L$, чтобы увеличить фазовый сдвиг на низких частотах. При малых скоростях потока, 0.1 м/с и меньше, заметный фазовый сдвиг тепловой волны будет наблюдаться уже при низких частотах.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для МЭМС-сенсоров потока, у которых расстояние между нагревателем и терморезисторами составляет порядка 10 мкм, фазовый сдвиг можно наблюдать только при небольших скоростях потока — 0.1 м/с и меньше. При этом даже при скорости потока метана 0.1 м/с и $L = 10$ мкм характеристическая частота будет порядка 36.6 кГц. Это достаточно высокая частота для модуляции тепловой волны.

Таким образом, можно заключить, что предлагаемый метод измерения скорости потока вряд ли может найти применение в МЭМС-сенсорах на основе CMOS-технологии на кремнии, где используются нагреватели и терморезисторы микрометрового масштаба (исключения составляют области применения, в которых требуется контролировать очень маленькие скорости потока газа, меньше 0.01 м/с).

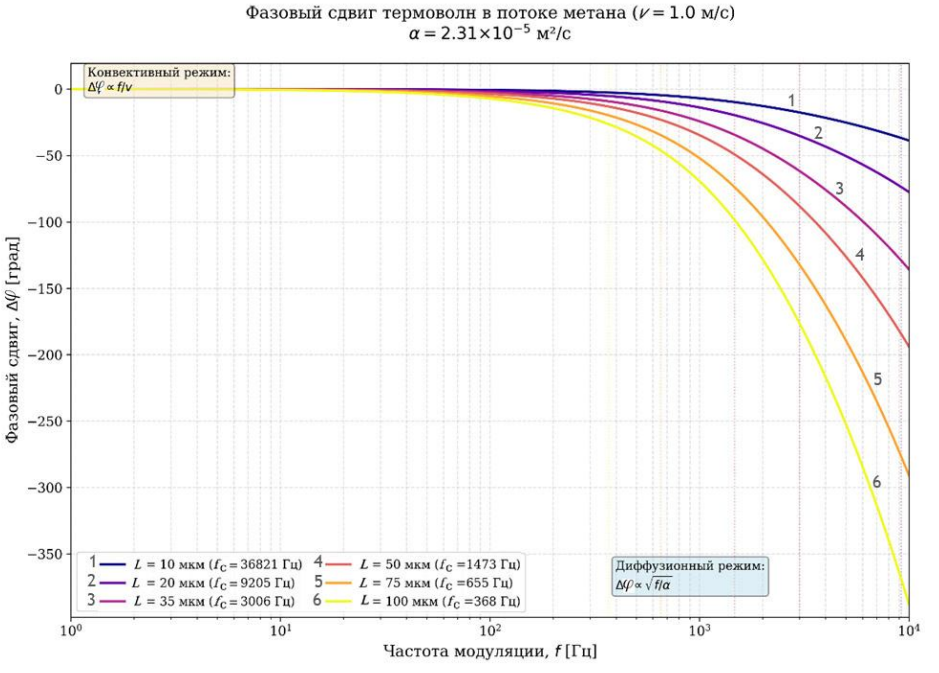


**Рис. 3.** Теоретические зависимости фазового сдвига от частоты тепловой волны при скорости потока метана 1 м/с и разных расстояниях между нагревателем и терморезистором ($L$)

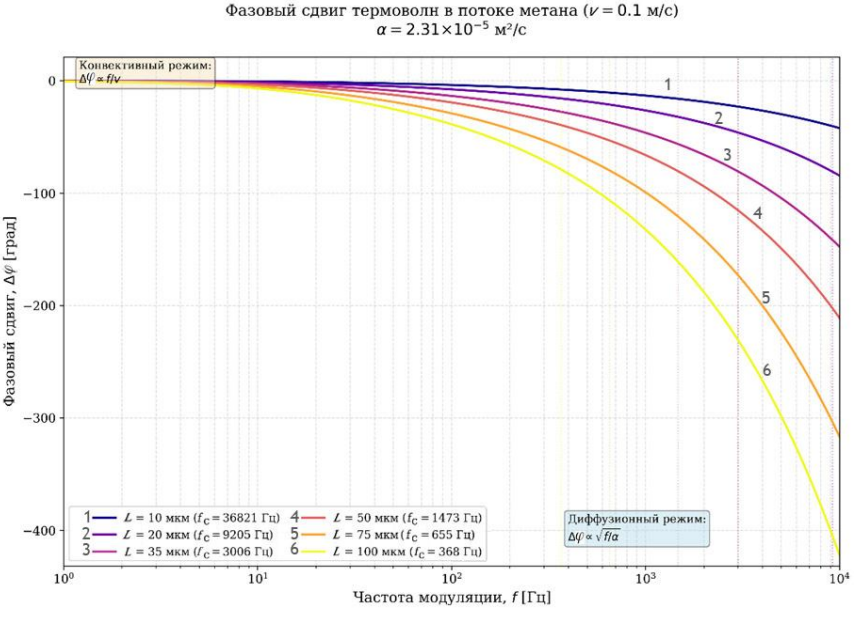


**Рис. 4.** Теоретические зависимости фазового сдвига от частоты тепловой волны при скорости потока метана 0.1 м/с и разных расстояниях между нагревателем и терморезистором ($L$)

Кроме того, нагреватель и терморезисторы имеют инерцию при циклическом нагреве. При большой частоте они могут не успевать отслеживать изменение температуры. Однако это не единственные типы сенсоров, которые могут быть использованы для измерения расхода газа.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЭМС-СЕНСОРОВ НА ОКСИДЕ ЦИРКОНИЯ

Керамические МЭМС-сенсоры представляют собой альтернативу традиционным кремниевым микросистемам, особенно в условиях высоких температур, агрессивных химических сред и механических нагрузок. Для измерения потока газа, в частности в энергетике, автомобильной промышленности и системах контроля природного газа, керамические материалы обеспечивают повышенную термостабильность, химическую инертность и долговечность по сравнению с сенсорами, выполненными на кремнии [14].

Кроме того, керамическая технология позволяет отказаться от большинства технологий микроэлектроники, требующих дорогостоящего оборудования: окисления кремния, глубокого травления кремния для формирования мембран и процессов фотолитографии.

Наиболее часто используемые керамики в МЭМС-устройствах — это $Al_2O_3$, $ZrO_2$ и LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics). В работе [15] был разработан и исследован калориметрический сенсор потока газа для бытовых применений, выполненный на мембране из оксида циркония (рис. 5).

У сенсора, описанного в работе [15], расстояние между нагревателем и терморезисторами составляет $L = 100$ мкм. Согласно уравнению (11), такое расстояние в потоке метана при 20 °C, 101.3 кПа ($\alpha = 2.314 \times 10^{-5}$ м²/с) дает характеристическую частоту $f_c = 368.2$ Гц. Расчет фазового сдвига для двух скоростей потока 0.1 м/с и 1 м/с на частотах меньше и больше характеристической частоты приведен в табл. 3.

Как отмечалось ранее, из-за инерционности процессов нагрева нагреватель может не успевать полноценно реагировать на изменение управляющего напряжения с частотой порядка 1000 Гц. Поэтому характеристическая частота должна быть понижена, чего можно достичь за счет увеличения расстояния между нагревателем и терморезисторами.

Положим $f_c = 100$ Гц и найдем значение $L$. Проведем моделирование параметров. Для метана при 20 °C и с температуропроводностью $\alpha = 2.30 \times 10^{-5}$ м²/с по формуле (11) получаем $L = 191$ мкм. Таким образом, расстояние между нагревателем и терморезисторами должно превышать полученное значение.

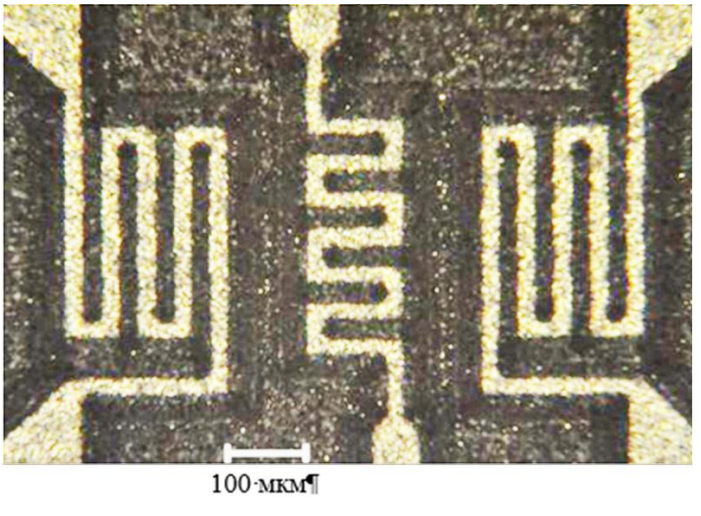


**Рис. 5.** Керамический МЭМС-сенсор

**Табл. 3.** Значения фазового сдвига

| $V$, м/с | Значения фазового сдвига (градусы) на $f$ = 100 Гц | Значения фазового сдвига (градусы) на $f$ = 1 кГц |
|---|---|---|
| 0.1 | –38.76 | –132.39 |
| 1.0 | –7.20 | –69.33 |

**Табл. 4.** Состав природного газа (% по объему)

| № п/п | $CH_4$ | $C_2H_6$ | $C_3H_8$ | $C_4H_{10}$ | $C_5H_{12}$ | CO | $H_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 95.1 | 2.3 | 0.7 | 0.4 | 0.8 | 0.2 | 0.5 |
| 2 | 86.9 | 6.0 | 1.6 | 1.0 | 0.5 | 1.2 | 2.8 |
| 3 | 98.7 | 0.33 | 0.12 | 0.04 | 0.01 | 0.1 | 0.7 |
| 4 | 99.0 | 0.1 | 0.005 | – | – | 0.095 | 0.8 |
| 5 | 80.2 | 2.64 | 1.15 | 0.7 | 0.71 | 0.73 | 13.8 |
| 6 | 87.2 | 3.98 | 1.34 | 0.75 | 0.23 | 1.73 | 4.77 |

Далее рассчитаем ожидаемое значение сдвига фаз на низких и высоких частотах. Для диапазона высоких частот (режим измерения $\alpha$, $f > f_c$) выберем частоту $f_{high} = 3f_c = 300$ Гц. Разность фаз в диффузионном режиме будет равна:

$$\Delta\varphi_{true} \approx -L\sqrt{\frac{2\omega}{\alpha}} = $$

$$= -191\times10^{-6}\cdot\sqrt{\frac{2\cdot1885}{2.30\times10^{-5}}} \approx -140^{\circ}.$$

Найдем разность фаз при низкой частоте (режим измерения $\upsilon$, $f < f_c$). Выберем $f_{low} = \frac{f_c}{3} \approx 33$ Гц. Разность фаз в конвективном режиме:

$$\Delta\varphi_{true} \approx -\frac{2L\omega}{\upsilon} = -\frac{2\cdot191\times10^{-6}\cdot207}{1.0} \approx$$

$$\approx -0.079\,\text{рад} \approx -4.5^{\circ}.$$

Важно отметить, что условие $f < f_c$ выполнить намного проще, чем условие $f > f_c$. Это позволяет на первом этапе расчетов найти скорость потока $\upsilon$, а потом (даже если условие не будет выполнено) по формуле (9) рассчитать значение $\alpha$. Более того, достаточно выполнить один из критериев по частоте сигнала, чтобы на первом этапе определить $\alpha$ или $\upsilon$ (а затем второй параметр). Этот подход упрощается, когда речь идет о природном газе и бытовых счетчиках с известным диапазоном расхода. Исходя из этих известных потоков и скоростей выбираются частоты сигналов и то, какой параметр рассчитывается первым.

Для учета тепловой инерции необходимо найти тепловую постоянную времени. Расчет тепловой постоянной времени сенсора является отдельной задачей. Однако ее можно учесть экспериментальным путем. Для учета тепловой инерции необходимо провести измерения в газе при нулевой скорости потока. При скорости потока $\upsilon = 0$ истинная разность фаз равна нулю, поэтому измеренное значение фазы на высокой и низкой частотах будет результатом проявления инерции. Полученное значение необходимо будет учитывать при проведении измерений в движущемся потоке газа.

В табл. 4 приведены составы природного газа (в объемных процентах) с различных месторождений России. В табл. 5 приведены теоретические расчеты критической частоты, плотности, значения $\alpha$, сдвига фаз при двух скоростях потока при использовании МЭМС-сенсора с $L = 200$ мкм.

**Табл. 5.** Результаты теоретических расчетовпараметрови фазовых сдвигов для природного газа, состав которых взят из табл. 4 при $\upsilon = 1$ м/с и 0.1 м/с (для стандартных условий $T$ = 293.15 K и $P$ = 101325 Па)

| № п/п | $f_c$, Гц | $\Delta\varphi$: ° при 33 Гц, $v$ = 1 м/с | $\Delta\varphi$: ° при 300 Гц, $v$ = 1 м/с | $\Delta\varphi$: ° при 300 Гц, $v$ = 0.1 м/с | $\Delta\varphi$: ° при 33 Гц $v$ = 0.1 м/с | $\alpha$, $\times10^{-5}$ м²/с | $\rho$, кг/м³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 91.9 | –4.75 | –43.0 | –142.1 | –37.8 | 2.31 | 0.68 |
| 2 | 86.3 | –4.75 | –44.9 | –146.2 | –38.3 | 2.17 | 0.74 |
| 3 | 93.0 | –4.75 | –42.7 | –141.0 | –37.5 | 2.34 | 0.67 |
| 4 | 93.5 | –4.75 | –42.5 | –140.7 | –37.4 | 2.35 | 0.66 |
| 5 | 96.1 | –4.75 | –41.4 | –138.4 | –37.1 | 2.42 | 0.64 |
| 6 | 88.8 | –4.75 | –44.2 | –144.3 | –37.9 | 2.23 | 0.71 |

Из табл. 5 видно, что фазовые сдвиги при скорости 0.1 м/с значительно больше, чем при 1 м/с, что облегчает их точное измерение. Однако частота 33 Гц при 0.1 м/с попадает в переходный режим, поэтому фаза незначительно зависит от состава газа, хотя в идеальном случае этого быть не должно. Следовательно, частота сигнала должна быть выбрана ниже 33 Гц. При частоте 300 Гц и скорости 0.1 м/с реализуется диффузионный режим, в котором разность фаз зависит от состава природного газа и изменяется от 138.4° до 146.2°.

Для скорости 1 м/с картина меняется: частота 33 Гц обеспечивает конвективный режим измерения, а частота 300 Гц соответствует переходному режиму (формула (10)). Тем не менее разность фаз может быть точно определена по формуле (9), если скорость потока уже найдена.

Из табл. 5 также видно, что значения $\alpha$ и $\rho$ изменяются в диапазоне ±5% от средних значений, что может упростить расчеты.

## ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

Для измерения разности фаз достаточно одного периода колебаний. Однако это может не обеспечить достаточную точность измерения, особенно в диапазоне небольшого сдвига фаз. В связи с этим необходимо регистрировать несколько периодов.

Среднеквадратичное отклонение при измерении фазы уменьшается, как $\sigma_\varphi \propto 1/\sqrt{N}$, где $N$ — число усредняемых периодов. Для бытовых счетчиков должно быть достаточно 4–16 периодов. Для прецизионных применений число периодов можно увеличить. В этом случае время измерения $T_{\text{meas}} = \dfrac{N_{\text{periods}}}{f_{\text{mod}}}$. Например, при $f = 100$ Гц и $N = 4$ время измерения будет составлять $T_{\text{meas}} = 0.04$ с.

Для извлечения фазы из регистрируемых откликов можно использовать синхронное детектирование и другие методы анализа гармонических сигналов [16].

Для определения сдвига фаз нагреватель должен возбуждаться гармоническим сигналом на частоте $f$. А на терморезисторах (Upstream и Downstream) необходимо регистрировать изменение температуры. Фазовый сдвиг между гармоническими сигналами с терморезисторов и будет искомой величиной.

При этом важно отметить: измеряется разность фаз, а не абсолютная фаза. Это позволяет компенсировать: фазовый сдвиг в цепи возбуждения, задержки АЦП и цифровой обработки, а также дрейф опорного генератора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен теоретический подход к измерению объемного расхода газа в бытовых счетчиках путем независимых измерений скорости потока природного газа и его коэффициента температуропроводности. Подход основан на частотно-модулированных тепловых измерениях, возбуждаемых в газовой среде МЭМС-нагревателем, температура которого изменяется по гармоническому закону. Возникающие тепловые волны в газе изменяют температуру терморезисторов МЭМС-сенсора, расположенных до и после нагревателя. Движение природного газа приводит к тому, что возникает разность фаз между гармоническими колебаниями температуры терморезисторов. Проводя измерения сдвига фаз на двух частотах, можно рассчитать значения $\alpha$ и $v$, по которым далее возможно определить объемный расход газа.

В работе проведен теоретический анализ уравнения теплопроводности с учетом конвективного переноса газа, выполнено моделирование параметров и оптимизация геометрии МЭМС-сенсора. В результате проведенных теоретических исследований показано, что МЭМС-сенсоры, выполненные по технологии CMOS, требуют слишком высоких частот проведения измерений (десятки килогерц) из-за микрометровых размеров нагревателя и терморезисторов. Критерием является характеристический размер $L$ расстояния между нагревателем и терморезисторами МЭМС-сенсора, который определяет характеристическую частоту, разделяющую конвективный и диффузионный режимы измерения.

Теоретические расчеты показали, что применение данного подхода возможно для практического использования, если расстояние между нагревателем и сенсором $L$ превышает 200 мкм, которые имеют место в МЭМС-сенсорах на основе мембран оксида циркония [15].

В работе проведено определение характеристической частоты для МЭМС-сенсора с $L$ = 200 мкм, обоснован выбор частоты для высокочастотного (диффузионного) и низкочастотного (конвективного) режимов измерений и проведены расчеты сдвига фаз при типичных для бытовых применений скоростях потока газа 0.1 м/с и 1 м/с. На основе проведенных расчетов определены сдвиги фаз при двух скоростях потока, а также значения плотности и коэффициента $\alpha$ для природного газа, добываемого на различных месторождениях в России.

Предложенный метод трансформирует парадигму измерения расхода газа: от компенсации внешних факторов — к их прямому измерению. Это открывает путь к созданию универсальных, точных и доступных расходомеров с МЭМС-сенсорами, выполненными по альтернативной традиционным кремниевым микросистемам керамической технологии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ


1. *Ejeian F., Azadi S., Razmjou A. et al.* Design and applications of MEMS flow sensors: a review // Sens. Actuators. A. 2019. Vol. 295. P. 483–502. DOI: 10.1016/j.sna.2019.06.020
2. *Wang J. et al.* Silicon monolithic microflow sensors: a review // J. Micromech. Microeng. 2021. Vol. 31, no. 10. Id. 104002. DOI: 10.1088/1361-6439/ac1f3a
3. *Rachalski A. et al.* Use of the thermal wave method for measuring the flow velocity of air and carbon dioxide mixture // Measurement. 2017. Vol. 95. P. 210–215. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.10.019
4. *Huang L.* Micromachined Thermal Time-of-Flight Flow Sensors and Their Applications // Micromachines. 2022. Vol. 13, no. 10. Id. 1729. DOI: 10.3390/mi13101729
5. *Berthet H., Jundt J., Durivault J. et al.* Time-of-flight thermal flowrate sensor for lab-on-chip applications // Lab Chip. 2011. Vol. 11, no. 2. P. 215–223. DOI: 10.1039/c0lc00229a
6. *Кравчун С.Н., Липаев А.А.* Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике. Казань: Изд. Казанского университета, 2006. 208 с. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19452101
7. *Ивлиев А.Д.* Метод температурных волн в теплофизических исследованиях // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 5. С. 771–792. URL: https://energy.ihed.ras.ru/arhive/article/916
8. *Lambert D.K., Harrington C.R.* An air flow sensor based on interface thermal wave propagation // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 59, no. 1. P. 59–65. DOI: 10.1063/1.336839
9. *Rachalski A.* High-precision anemometer with thermal wave // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77, no. 9. Id. 095107. DOI: 10.1063/1.2338260
10. *Rachalski A.* Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave // Rev. Sci. Instrum. 2013. Vol. 84, no. 2. Id. 025105. DOI: 10.1063/1.4790410
11. *Gomes R.A., Niehuis R.* Development of a novel anemometry technique for velocity and temperature measurement // Exp. Fluids. 2018. Vol. 59. Id. 142. DOI: 10.1007/s00348-018-2595-z
12. *Al-Salaymeh A., Jovanovic J., Durst F.* Bi-directional flow sensor with a wide dynamic range for medical applications // Med. Eng. Phys. 2004. Vol. 26, no. 8. P. 623–637. DOI: 10.1016/j.medengphy.2004.06.002
13. ГОСТ Р 8.662–2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Газ природный. Термодинамические свойства газовой фазы. Введ. 31.12.2009. Москва: Стандартинформ, 2010. 40 с. URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/019/4293819254.pdf?ysclid=mtnzy3nmzv635583699
14. *Samotaev N., Podlepetsky B., Mashinin M. et al.* Thermal conductivity gas sensors for high-temperature applications // Micromachines. 2024. Vol. 15, no. 1. Id. 138. DOI: 10.3390/mi15010138
15. *Касенко А.Л., Щур П.А., Драч Е.А. и др.* Разработка МЭМС-сенсора калориметрического типа на основе мембран оксида циркония // Научное приборостроение. 2026. Т. 36, № 2. С. 73–83. URL: http://iairas.ru/mag/2026/abst2.php#abst8
16. *Зайцева И.Н.* Алгоритм определения сдвига фаз гармонических сигналов с использованием стохастической дискретизации // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. С. 90–96. URL; https://elibrary.ru/item.asp?id=38583497



***ООО "ИНТЭР", Москва*** (*Касенко А.Л., Щур П.А., Драч Е.А., Борзунов И.Г., Баранов А.М.*)

***Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва*** (*Щур П.А., Борзунов И.Г., Баранов А.М.*)

***Университет науки и технологий МИСИС, Москва*** (*Драч Е.А.*)

Контакты: *Драч Екатерина Анатольевна*, catherinedratch@yandex.ru


Материал поступил в редакцию 24.08.2026

*NAUCHNOE PRIBOROSTROENIE, 2026, Vol. 36, No. 4, pp. 93–104* *ISSN 0868-5886*

# DEVELOPMENT OF A FREQUENCY-MODULATED THERMAL WAVE METHOD FOR GAS FLOW MEASUREMENT

**A. L. Kasenko[1], P. A. Shchur[1, 2], E. A. Drach[1, 3], I. G. Borzunov[1, 2], A. M. Baranov[1, 2]**

[1]*LLC "INTER", Moscow, Russian Federation*
[2]*Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation*
[3]*University of Science and Technology MISIS*

The main limitation of traditional thermal methods for measuring gas flow is their dependence on the thermophysical properties of the medium, determined by its chemical composition. Under conditions of variable natural gas composition, typical for domestic distribution nodes, sensor calibration characteristics become unreliable due to changes in the methane, nitrogen, or carbon dioxide content, leading to systematic measurement errors. This paper proposes an alternative approach when gas composition instability ceases to be an uncertainty factor and becomes an informative parameter. To this end, a frequency-modulated thermal wave method for measuring natural gas volumetric flow rate, adapted for microthermal sensors, has been developed. The proposed approach is based on an analysis of the frequency dependence of the phase difference of thermal waves recorded by thermistors located upstream and downstream of the heater. The paper presents a theoretical justification for the method based on a non-stationary heat conduction equation taking into account convection, the results of mathematical modeling, and the optimization of the geometry of a zirconium oxide MEMS sensor. For a distance of $L$ = 200 μm between the heater and thermistors, the choice of operating frequencies (33 Hz for convective mode and 300 Hz for diffusion) was justified. Thermal diffusivity and density coefficients were calculated, and the corresponding phase shifts were calculated for typical flow rates (0.1 m/s and 1.0 m/s). Using six real-world natural gas compositions produced in the Russian Federation, it was shown that at low flow rates (0.1 m/s), variations in composition lead to a change in the phase response in the range from 138° to 146° at a high frequency (300 Hz), confirming the sensitivity of the method to the thermophysical properties of the medium. The obtained results provide the possibility of creating self-calibrating flowmeters capable of automatically accounting for changes in the composition of the measured medium.

*Keywords*: MEMS-sensor, natural gas, frequency-modulated, convection, diffusion, thermal wave, thermal diffusivity, heater, thermistor, phase shift, frequency

REFERENCES

1. Ejeian F., Azadi S., Razmjou A. et al. Design and applications of MEMS flow sensors: a review. *Sens. Actuators. A*, 2019, vol. 295, pp. 483–502. DOI: 10.1016/j.sna.2019.06.020
2. Wang J. et al. Silicon monolithic microflow sensors: a review. *J. Micromech. Microeng*., 2021, vol. 31, no. 10, id. 104002. DOI: 10.1088/1361-6439/ac1f3a
3. Rachalski A. et al. Use of the thermal wave method for measuring the flow velocity of air and carbon dioxide mixture. *Measurement*, 2017, vol. 95, pp. 210–215. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.10.019
4. Huang L. Micromachined Thermal Time-of-Flight Flow Sensors and Their Applications. *Micromachines*, 2022, vol. 13, no. 10, id. 1729. DOI: 10.3390/mi13101729
5. Berthet H., Jundt J., Durivault J. et al. Time-of-flight thermal flowrate sensor for lab-on-chip applications. *Lab Chip*, 2011, vol. 11, no. 2, pp. 215–223. DOI: 10.1039/c0lc00229a
6. Kravchun S.N., Lipaev A.A. *Metod periodicheskogo nagreva v eksperimentalnoj teplofizike* [The Periodic Heating Method in Experimental Thermophysics]. Kazan, Kazan University Publ., 2006. 208 p. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19452101
7. Ivliev A.D. [Method of temperature waves in thermophysical investigations (Analysis of Soviet and Russian Experiences)]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur* [High Temperature], 2009, vol. 47, no. 5, pp. 737–758. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0018151X09050162
8. Lambert D.K., Harrington C.R. An air flow sensor based on interface thermal wave propagation. *J. Appl. Phys*., 1986, vol. 59, no. 1, pp. 59–65. DOI: 10.1063/1.336839
9. Rachalski A. High-precision anemometer with thermal wave. *Rev. Sci. Instrum*., 2006, vol. 77, no. 9, id. 095107. DOI: 10.1063/1.2338260
10. Rachalski A. Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave. *Rev. Sci. Instrum.* 2013. Vol. 84, no. 2. Id. 025105. DOI: 10.1063/1.4790410

11. Gomes R.A., Niehuis R. Development of a novel anemometry technique for velocity and temperature measurement. *Exp. Fluids*, 2018, vol. 59, Id. 142. DOI: 10.1007/s00348-018-2595-z
12. Al-Salaymeh A., Jovanovic J., Durst F. Bi-directional flow sensor with a wide dynamic range for medical applications. *Med. Eng. Phys*., 2004, vol. 26, no. 8, pp. 623–637. DOI: 10.1016/j.medengphy.2004.06.002
13. *GOST R 8.662–2009*. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements (GSI). Natural Gas. Thermodynamic Properties of the Gaseous Phase. Effective Dec. 31, 2009. Moscow: Standartinform Publ., 2010, 40 p. URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/019/4293819254.pdf?ysclid=mtnzy3nmzv635583699 (In Russ.).
14. Samotaev N., Podlepetsky B., Mashinin M. et al. Thermal conductivity gas sensors for high-temperature applications. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 1, Id. 138. DOI: 10.3390/mi15010138
15. Kasenko A.L., Shchur P.A., Drach E.A. et al. [Development of a calorimetric MEMS sensor based on zirconium oxide membranes]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2026, vol. 36, no. 2, pp. 73–83. URL: http://iairas.ru/mag/2026/abst2.php#abst8 (In Russ.).
16. Zaitseva I.N. [Algorithm for determining phase shift of harmonic signals using stochastic discretization]. *Vestnik AGTU. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: management, computer science and informatics], 2019, no. 3, pp. 90–96. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=38583497 (In Russ.).

Contacts: *Drach Ekaterina Anatol'evna,*
catherinedratch@yandex.ru

The article was received by the editorial office on 24.08.2026