



004607367

Деревягин Глеб Александрович

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО
КОНТРОЛЯ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА В СИСТЕМЕ
УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

22 ИЮЛ 2010

Саратов 2010

Работа выполнена

в ГОУ ВПО "Саратовский государственный технический университет"

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
заслуженный деятель науки РФ,
профессор Байбурин Вил Бариевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Львов Алексей Арленович

доктор физико-математических наук,
профессор Аникин Валерий Михайлович

Ведущая организация:

ОАО "Центральный научно-
исследовательский
институт измерительной аппаратуры"
(ЦНИИИА, г. Саратов)

Защита состоится 30 июня 2010 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 212. 242.08 при ГОУ ВПО "Саратовский государственный технический университет" по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 2, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО "Саратовский государственный технический университет".

Автореферат разослан "28" мая 2010 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Терентьев А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Природный газ является одним из основных энергоносителей в России. За год в стране добывается более 500 млрд м³ природного газа. В условиях рыночной экономики значительно возросли требования, предъявляемые к средствам контроля и учёта в системах управления газовыми потоками, включающими, в частности, пункт диспетчеризации, регуляторы, компрессорные станции, устройства контроля расхода газа.

В настоящее время наиболее перспективными устройствами контроля и учёта расхода газа являются ультразвуковые, основанные на определении времени распространения акустического сигнала в газовом потоке вдоль и против движения потока. Подобным устройствам (расходомерам) посвящены работы П.П. Кремлёвского, А.С. Фомина, А.М. Деревягина, В.И. Свистуна, В.В. Козлова, Per Lunde, Kjell-Eivind Froysa, Magne Vestrheim, John Lansing, Koos van Helden и др.

Вместе с тем, анализ конструктивных особенностей и технических характеристик известных ультразвуковых расходомеров (Flowsick, Instromet, Q.Sonic, Гиперфлоу-УС и др.) показывает, что проблемы создания достаточно надёжно работающих преобразователей расхода решены далеко не полностью.

В частности, необходимо обеспечить надёжное определение расхода в "загрязнённых" газовых средах, разработать эффективно работающий в этих средах электроакустический преобразователь и выявить возможные причины измерительных погрешностей, дав рекомендации по их устранению. Изложенное определило актуальность темы работы и её цель.

Цель работы заключается в развитии методических и технических средств, реализуемых в устройствах контроля и учёта расхода газа в системах управления газовыми потоками, в том числе содержащими нежелательные примеси.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка алгоритма определения времени задержки сигнала в электроакустическом тракте преобразователя расхода, использующем как основной элемент электроакустические пьезоэлектрические преобразователи (датчики) мембранного типа.
2. Развитие математической модели распространения акустического сигнала в цилиндрическом трубопроводе и оценка уменьшения погрешности определения расхода с учётом проведённых исследований.
3. Совершенствование конструкции мембранного пьезоэлектрического преобразователя для обеспечения надёжной работы расходомера в "загрязнённых" газовых средах и в условиях существенных шумов, создаваемых регуляторами системы управления.

4. Формирование принимаемого электрического сигнала заданной длительности.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректностью поставленных задач исследования, применением апробированных аналитических и численных методов анализа. Основные теоретические результаты и результаты математического моделирования подтверждены экспериментальными данными.

Научная новизна

1. Разработана трёхмерная математическая модель распространения акустического сигнала в абсолютно жёстком цилиндрическом трубопроводе и выявлены эффекты изменения формы сигнала при его отражении от стенки трубопровода.
2. Разработан эффективный пьезоэлектрический электроакустический преобразователь мембранного типа, обеспечивающий многоканальность измерительной системы при работе одной пары датчиков, надёжность её работы в “загрязнённых” газовых средах и в условиях существенных шумов, создаваемых регуляторами системы управления.
3. Предложен метод определения скорости газового потока в трубопроводах, отличающийся учётом сигналов, прошедших по разным акустическим путям при использовании одной пары датчиков и позволяющий контролировать изменения внутренних размеров трубопровода, вызванное, например, “засорением” трубопровода тяжёлыми примесями, содержащимися в газе.
4. Предложен способ ограничения длительности электрического сигнала на приёмнике за счёт формирования специального передаваемого электрического сигнала, позволяющий разделять во времени сигналы, пришедшие по разным акустическим путям.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Предложенный метод определения скорости газового потока в трубопроводах учитывает сигналы, прошедшие по разным акустическим путям при использовании одной пары датчиков, и позволяет контролировать изменения внутренних размеров трубопровода, вызванные, например, “засорением” трубопровода тяжёлыми примесями, содержащимися в газе.
2. Предложенный пьезоэлектрический электроакустический преобразователь (датчик) мембранного типа обеспечивает многоканальность измерительной системы при работе одной пары датчиков, эффективность её работы в “загрязнённых” газовых средах и при наличии посторонних акустических шумов.

3. Способ ограничения длительности электрического сигнала на приёмнике за счёт формирования специального передаваемого электрического сигнала, позволяющий разделять во времени сигналы, пришедшие по разным акустическим путям.
4. Трёхмерная математическая модель распространения акустического сигнала в абсолютно жёстком цилиндрическом трубопроводе и эффекты изменения формы сигнала при его отражении от стенки.
5. Комплекс программ расчёта и анализа акустического сигнала, излучённого мембранным излучателем в цилиндрический канал.

Практическая значимость результатов состоит в совершенствовании ультразвукового метода определения расхода газовых сред и конструкции пьезоэлектрических датчиков, разработке способа формирования и обработки сигнала, повышении точности измерения. Результаты исследований внедрены в ультразвуковой расходомер НПФ “Вымпел”, имеется акт внедрения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Международной конференции International Gas Union Research Company 2008 (Париж, 2008), на XXII Международной конференции “Математические методы в технике и технологиях” (Саратов, СГТУ, 2009), конференции “Инновации и актуальные проблемы техники и технологии” по программе У.М.Н.И.К. (Саратов, СГТУ, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель исследования, новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена существующей методике определения расхода природного газа с помощью ультразвуковых преобразователей (датчиков), основным недостатком которой является расположение датчиков под углом к поверхности трубопровода. В результате образуются “карманы” в местах установки датчика. Это препятствует использованию ультразвуковых расходомеров на газах, содержащих примеси, которые со временем забивают “карманы” и препятствуют излучению и приёму ультразвука датчиками. В результате расходомер выходит из строя. Чтобы избежать этого недостатка, предложен ультразвуковой метод, в котором “карманы” отсутствуют.

Вторая глава посвящена принципиально новой измерительной схеме, позволяющей избежать основных недостатков, присущих известным ультразвуковым методам. Среди её преимуществ – возможность работы на “грязных” газах благодаря отсутствию карманов в местах установки датчиков, возможность регистрации толщины наносного слоя в трубопроводе благодаря обработке сигналов по нескольким акустическим путям при работе одной пары датчиков и др.

Отличительной конструктивной особенностью метода является расположение ультразвуковых датчиков перпендикулярно к оси трубопровода и совмещение их излучающей поверхности с внутренней поверхностью трубопровода (рис.1). Это позволяет, с одной стороны, избежать погрешности измерения, связанной с возмущением потока выступающими элементами, с другой – устранить “карманы” в местах установки датчиков, что обеспечивает их применение в среде “грязных” газов.

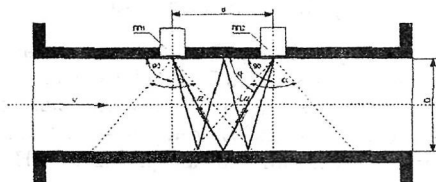


Рис. 1. Схема расположения ультразвуковых датчиков
и варианты прохождения акустического сигнала

В качестве ультразвуковых датчиков используются мембранные резонансные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), обладающие достаточно широкой диаграммой направленности излучения и позволяющие обрабатывать сигналы, проходящие по нескольким акустическим путям (каналам). Используются “основные” пути, проходящие через диаметр трубопровода и имеющие однократное и трёхкратное отражение от стенки (рис.1), и “дополнительные” пути, имеющие более сложную геометрическую форму (рис.2).

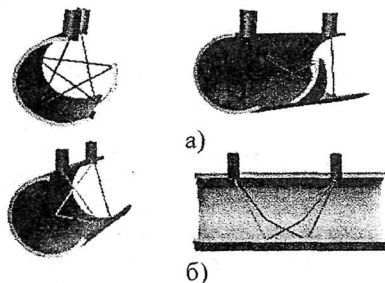


Рис. 2. Варианты прохождения акустических сигналов

Объёмный расход газа в трубопроводе вычисляется по формуле:

$$Q_0 = S v_s, \text{ где } v_s = k v_L. \quad (1)$$

Здесь S – площадь сечения трубопровода; v_s – средняя по сечению скорость газовой среды; k – поправочный коэффициент, связывающий v_s и среднюю скорость потока вдоль выбранного пути v_L . Величина v_L связана со временами распространения акустического сигнала по движению потока и против него известным соотношением:

$$v_L = \frac{L}{2 \cos \varphi} \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} t_{21}}. \quad (2)$$

Здесь t_{12} и t_{21} – времена распространения, соответственно по потоку и против него; L – длина акустического пути; φ – угол наклона акустического пути относительно оси трубопровода.

Использование дополнительных акустических путей позволяет без потери точности измерения расхода регистрировать толщину слоя тяжёлых примесей в газе, которые откладываются на дне трубопровода с течением времени. На рис. 3 представлена схема расположения хорд акустических каналов в проекции на сечение трубопровода при наличии слоя примесей толщины h .

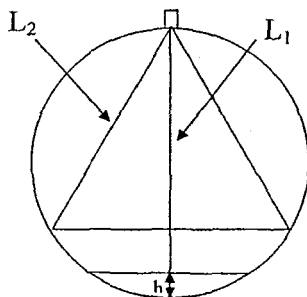


Рис.3. Схема расположения хорд акустических каналов

Из рис. 3 видно, что наличие слоя не влияет на распространение сигнала по пути L_2 , при этом длина пути L_1 сокращается на величину, зависящую от h . Таким образом, по пути L_2 определяется реальный расход газа, а по отклонению расхода, вычисленного вдоль L_1 , от реального оценивается толщина наносного слоя h .

Следует отметить, что использование основного пути L_1 для измерения расхода является неприемлемым, поскольку небольшая толщина наносного слоя ($h=1\text{см}$) влечёт существенную погрешность измерения расхода ($\varepsilon=2,7\%$) на типичном трубопроводе с диаметром $D=300\text{ мм}$.

Разделение во времени сигналов, приходящих по различным акустическим путям, требует ограничения длительности сигнала.

В данной измерительной системе задача ограничения длительности принимаемого сигнала 3 решена путем синтеза специального передаваемого электрического сигнала 1, который создаёт акустический сигнал 2 на передатчике, формирующий электрический сигнал 3 заданной длительности при возбуждении приёмника. Рис. 4 иллюстрирует этот принцип.

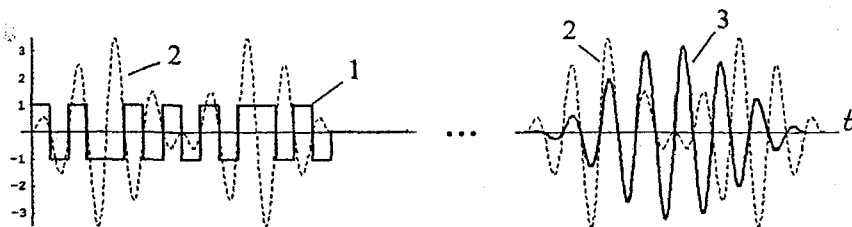


Рис. 4. Иллюстрация принципа синтеза сигнала:

1 – передаваемый электрический сигнал; 2 – акустический сигнал; 3 – принимаемый электрический сигнал

Таким образом происходит формирование сигнала заданной длительности и разделение во времени сигналов, пришедших по разным акустическим путям. В следующей главе приведена методика определения времени распространения сигнала.

Третья глава посвящена корреляционному методу определения времени распространения сигнала в измерительной системе, а также построению опорного сигнала для вычисления взаимно-корреляционной функции.

Анализ производится применительно к электроакустической схеме на рис. 5. Формируемый генератором специальный электрический сигнал $x(t)$ поступает на передающий ПЭП, преобразуется в акустический, распространяется в акустическом тракте и по нескольким акустическим путям приходит на принимающий ПЭП. Далее эти акустические сигналы преобразуются обратно в электрический сигнал и после усиления поступают на АЦП для последующей математической обработки и расчёта взаимно-корреляционной функции.

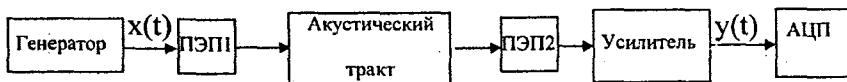


Рис. 5. Электроакустическая схема ультразвуковой измерительной системы

Пусть $x(t)$ – сигнал на генераторе; $y(t)$ – реальный электрический сигнал, принимаемый на АЦП; $\tilde{x}(t)$ – опорный сигнал, подлежащий сравнению с принимаемым. Ввиду прохождения сигнала в акустическом тракте по разным путям принимаемый сигнал $y(t)$ будет представлять собой сумму сигналов $x_i(t)$, имеющих различные временные задержки τ_i :

$$y(t) = \sum_i a_i x_i(t - \tau_i) + n(t), \quad (3)$$

где a_i – амплитуда принятого сигнала для i -го пути; $n(t)$ – некоррелированный шум.

Время задержки сигнала τ_i для i -го измерительного канала определяется при помощи взаимно-корреляционной функции (ВКФ) $R_{\tilde{x}y}$. Имеет место тождество:

$$R_{\tilde{x}y}(\tau) = E[\tilde{x}(t)y(t+\tau)] = E[\tilde{x}(t)\left(\sum_i a_i x_i(t+\tau-\tau_i) + n(t+\tau)\right)] = \sum_i a_i R_{\tilde{x}x_i}(\tau-\tau_i), \quad (4)$$

где E – символ математического ожидания. Время задержки τ_i находится из соотношения:

$$\tau_i = \arg \max_{|\tau-\tau_i^0| < \epsilon} R_{\tilde{x}x_i}(\tau), \quad (5)$$

где τ_i^0 – время распространения сигнала при отсутствии газового потока.

Для расчёта опорного сигнала $\tilde{x}(t)$ используется входной электрический сигнал на генераторе. Спектр-Фурье опорного сигнала $\tilde{X}(f)$ определяется из выражения:

$$\tilde{X}(f) = H_1(f)H_2(f)e^{i\varphi_1}e^{i\varphi_2(f)}X(f), \quad (6)$$

$$\text{где } H_1(f) = \frac{1}{(2\pi i f + \alpha_1)^2 + (2\pi f_1)^2}, \quad H_2(f) = \frac{1}{(2\pi i f + \alpha_2)^2 + (2\pi f_2)^2}.$$

Здесь $X(f)$ – спектр входного сигнала; H_1, H_2 – частотные характеристики ПЭП1 и ПЭП2; f_1, f_2 – собственные частоты колебания 1-го и 2-го датчиков; α_1, α_2 – коэффициенты затухания датчиков; φ_1 – фазовый сдвиг спектра в акустическом тракте; $\varphi_2(f)$ – частотная характеристика усилителя.

Собственные частоты колебания и коэффициенты затухания датчиков, а также фазовая характеристика усилителя определяются путём периодического тестирования этих элементов, фазовый сдвиг в акустическом тракте оценивается теоретически.

Следующая глава посвящена определению фазовой задержки в акустическом тракте. Для этого решается волновая задача распространения акустического сигнала в цилиндрическом трубопроводе.

В четвёртой главе исследуется процесс распространения в жёстком цилиндрическом канале акустического сигнала малой длительности с гармоническим заполнением. Произведён анализ изменения формы акустического сигнала при его распространении.

Пусть излучение сигнала производится квадратной мембраной малого размера $2d \times 2d$ ($d \ll R$), расположенной на стенке канала радиуса R (рис.6).

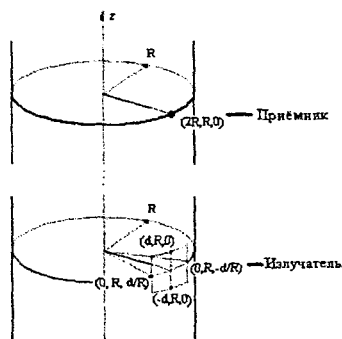


Рис.6. Область расположения излучающей мембраны и точки приёма

Предположим, что излучённый сигнал давления задаётся формулой:

$$p_{изл}(t) = \sin\left(\frac{\pi f}{2}(t - t_{зам} / 2)\right) \cos\left(\frac{\pi f}{4n}(t - t_{зам} / 2)\right), \quad (7)$$

где f - частота акустических колебаний; n - число периодов; $t_{зам}$ - длительность излучения (рис.7).

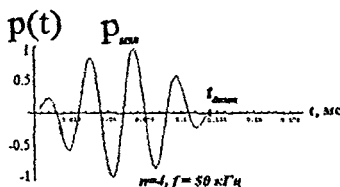


Рис.7. Пример сигнала давления на излучателе

Решение задачи сводится к нахождению поля акустического давления $p = p(z, r, \theta, t)$ в канале для любого момента времени. Известно, что давление p связано с потенциалом скорости ψ соотношением:

$$p = \rho_0 \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (8)$$

где ρ_0 - плотность среды. Потенциал скорости ψ находится из решения волнового уравнения:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

с граничными и начальными условиями:

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial r} \right|_{r=R} = \begin{cases} v(t) \cos\left(\frac{\pi}{2d} z\right) \cos\left(\frac{\pi R}{2d} \theta\right), & |z| \leq d, |\theta| \leq \frac{d}{R} \\ 0, & |z| > d, |\theta| \leq \pi \\ 0, & |z| \leq d, |\theta| > \frac{d}{R} \end{cases} \quad (10)$$

$$\psi(z, r, \theta, t)|_{t=+0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \psi}{\partial t}(z, r, \theta, t) \right|_{t=+0} = 0, \quad (11)$$

где $v(t)$ – зависимость скорости колебания мембраны от времени; c – скорость звука в среде.

Для нахождения $\psi(z, r, \theta, t)$ применяются известные методы преобразования Лапласа по времени и расщепления по переменным z , r и θ . При этом изображение $\Psi(z, r, \theta, s)$ потенциала скорости представляется в виде:

$$\Psi(z, r, s) = \frac{v(s)R}{2d^2 i} \sum_{m=0}^{\infty} b_m I_m(z, r, s) \cos m\theta, \quad (12)$$

$$\text{где } I_m(z, r, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos(\tau d)}{\left(\left(\frac{\pi}{2d}\right)^2 - \tau^2\right) \sqrt{\left(\frac{s}{c}\right)^2 + \tau^2} J'_m(Ri \sqrt{\left(\frac{s}{c}\right)^2 + \tau^2})} d\tau, \quad b_m = \frac{\cos(md/R)}{\left(\frac{\pi R}{2d}\right)^2 - m^2}, \quad (13)$$

s – комплексная переменная преобразования Лапласа; i – мнимая единица; $v(s)$ – изображение $v(t)$; $J_m(z)$ и $J'_m(z)$ – цилиндрическая функция Бесселя первого рода и её производная, соответственно.

Интеграл $I_m(z, r, s)$ в (13) находится с помощью известной леммы Жордана и представляется в виде суммы вычетов подынтегрального выражения в верхней комплексной полуплоскости. В итоге I_m имеет вид:

$$I_m(z, r, s) = \sum_{n=1}^{\infty} F_{nm}(z, r, s), \quad (14)$$

причём $F_{nm}(z, r, s)$ имеют вид:

$$F_{nm}(z, r, s) = \frac{2\pi}{a} \frac{-ch(s_{mn}d)J_m\left(\frac{r}{a}\alpha_{mn}\right)e^{-z_{mn}}}{\left(\left(\frac{\pi}{2d}\right)^2 + s_{mn}^2\right)s_{mn}J'_m(\alpha_{mn})} + \frac{2\pi}{a} \delta_0^m \frac{ch\left(\frac{s}{c}d\right)e^{-\frac{z}{c}}}{\left(\left(\frac{\pi}{2d}\right)^2 + \left(\frac{s}{c}\right)^2\right)\frac{s}{c}}, \quad (15)$$

где $s_{mn} = \sqrt{\left(\frac{s}{c}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{mn}}{a}\right)^2}$, α_{mn} – n -й корень $J'_m(x)$, $ch(x)$ – гиперболический косинус,

$$\delta_0^m = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m \neq 0. \end{cases} \quad (16)$$

Изображение принимаемого сигнала давления $p_{вх}(s)$ в точке $(2R, R, 0)$ находится по формуле:

$$p_{вх}(s) = p_{ex}(s) \frac{\Psi(2R, R, 0, s)}{\Psi(0, 0, 0, s)}, \quad (17)$$

где $p_{вх}(s)$ – изображение выражения (7).

Для расчёта $p_{вх}(t)$ к выражению (17) применяется обратное преобразование Лапласа, осуществляемое при помощи численного интегрирования в вычислительной среде Mathematica 5.0. При этом α_{mn} находятся с помощью встроенной в среду функции `BesselJPrimeZeros`, вместо бесконечных пределов суммирования в (12), (14) берутся конечные с учётом быстрой сходимости соответствующих рядов.

На рис. 8 представлен пример расчёта $p_{вх}(t)$ при заданном $p_{ex}(t)$ (рис.7) для следующих параметров системы: $R=200$ мм, $d=10$ мм, $c=300$ м/с. В соответствии с выражением (3) принятый сигнал $p_{вх}(t)$ представляет набор сигналов, имеющих разные временные задержки. Из рис. 6 видно, что временные задержки полученных сигналов совпадают с отмеченными точками задержками, рассчитанными геометрическим путём по формуле $t_i=L_i/c$ (L_i – длина i -го акустического пути, c – скорость звука), что подтверждает достоверность полученных расчётов и позволяет по заданному времени задержки сигнала однозначно определить акустический путь, вдоль которого он распространяется.

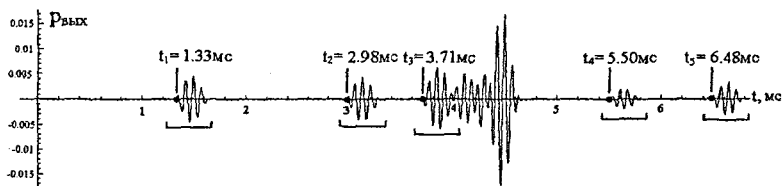


Рис. 8. Пример численного расчёта принимаемого акустического сигнала

На основании расчётов выявлено, что каждый из принятых сигналов претерпевает сдвиг фазы φ_1 гармонического заполнения по отношению к излучённому, причём имеет место следующая оценка:

$$\varphi_1(m) = -\frac{\pi}{2}m - \delta\varphi, \quad \delta\varphi \approx 0.2\pi, \quad (18)$$

где m — число отражений от стенки канала вдоль соответствующего акустического пути; $\delta\varphi$ возникает из-за конечности размеров излучающей мембраны, причём при уменьшении величины $\frac{d}{R}$ значение $|\delta\varphi|$ уменьшается.

Сравнительная картина излучённого сигнала (0) и принятого после однократного отражения (1) представлена на рис. 9.

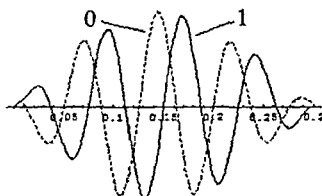


Рис. 9. Сравнение акустических сигналов: 0 — излучаемый,

1 — принимаемый, после однократного отражения

Физически наличие сдвига фазы объясняется тем, что при каждом отражении от вогнутой стенки канала акустическая волна проходит особую область (каустическую поверхность), в которой, как известно, не выполняются законы геометрической акустики.

Оценка (18) фазового сдвига подтверждена на эталонном измерительном участке трубопровода диаметром $D=200$ мм при отсутствии движения потока среды для сигналов, принимаемых после одно-, трёх- и четырёхкратного отражения от стенки.

Учёт фазового сдвига в акустическом тракте позволил устранить погрешность измерения времени распространения сигнала, вызванную неточностью нахождения опорного сигнала. Например, для трубопровода диаметром $D=200$ мм на частоте излучения 40 кГц устраняемая погрешность составляет 1,8%.

Пятая глава посвящена разработке резонансного пьезоэлектрического преобразователя мембранного типа. На рис. 10,а представлен пьезоэлектрический преобразователь (датчик) мембранного типа, разработанный специально для работы в “грязных” и химически агрессивных средах.

Такой преобразователь обеспечивает эффективное излучение и приём ультразвука на резонансной частоте за счёт преобразования радиальных колебаний диска пьезокерамики в изгибные колебания металлической мембраны достаточно большой амплитуды. Излучающий элемент (рис.10,б) датчика изготовлен из стали и является устойчивым к воздействию химически агрессивных сред.

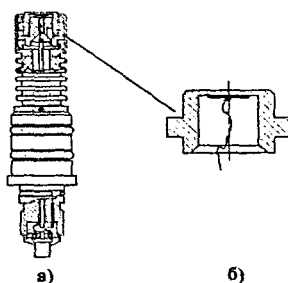


Рис. 10. Пьезоэлектрический преобразователь:

а – внешний вид; б – излучающий элемент

Расчёт оптимальной конструкции излучателя проведён методом конечных элементов на основе известного программного комплекса. Схема излучающего элемента (излучателя) представлена на рис.11.

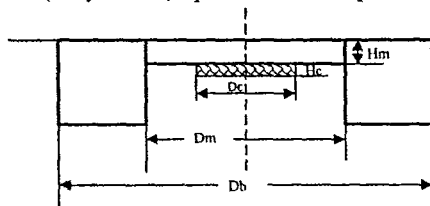


Рис. 11. Модель излучателя

В расчётах контакт пьезокерамики и мембраны считается идеальным, нижняя поверхность корпуса жёстко закреплена, остальные поверхности считаются свободными от внешних напряжений. Рассмотрены три варианта материала мембраны и корпуса: сталь, титан и алюминий. В качестве материала пьезокерамики используется PZT-5A, отечественным аналогом которой является ЦТС-19 (цирконат-титанат свинец). Считается, что диск пьезокерамики поляризован по толщине, его верхняя поверхность заземлена, а на нижнюю подаётся заданный потенциал.

Важнейшими характеристиками мембранного резонансного пьезодатчика являются его резонансная частота f_R и коэффициент электромеханического преобразования $k=v/U$, где v – средняя по поверхности амплитуда скорости мембраны при подаче гармонического напряжения с амплитудой U .

На основе численного расчёта построена зависимость резонансной частоты f_R от величины Hm (рис.12) при следующих геометрических размерах датчика: $Dm=11$ мм, $Db=16$ мм, $Hc=0,3$ мм, $Dc=0,85$ мм. На датчик подаётся гармоническое напряжение с амплитудой $U=1$ В.

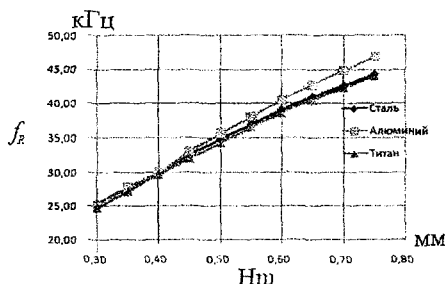


Рис.12. Зависимость резонансной частоты колебания от толщины мембраны

Из рис. 12 видно, что с увеличением толщины мембраны резонансная частота повышается. Ещё одной практически важной задачей является подбор размеров пьезокерамического диска, при котором будет достигаться наиболее эффективное электромеханическое преобразование энергии.

На рис. 13 представлена зависимость коэффициента электромеханического преобразования k от диаметра пьезодиска Dc , из которой видно, что существует область значений Dc , в которой k достигает максимума. В соответствии с рис.12 для эффективного электромеханического преобразования энергии для датчика с диаметром $Dm=11$ мм следует выбрать пьезокерамический диск с диаметром $D_{c\text{опт}} \approx 8,5-9$ мм.

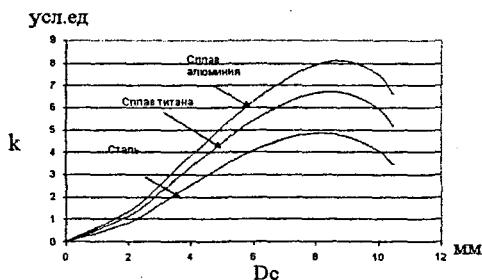


Рис.13. Зависимость коэффициента электромеханического преобразования от диаметра пьезодиска

Таким образом, найдены оптимальные параметры конструкции эффективного излучателя.

Полученные с помощью компьютерного моделирования результаты внедрены в конструкцию преобразователей ультразвукового расходомера "Гиперфлоу-УС" (НПФ "Вымпел"). Разработаны эффективные преобразователи с частотами излучения 40, 90 и 140 кГц. Создание датчиков с разными частотами излучения обусловлено необходимостью ухода от диапазона шумов, вызванных регуляторами расхода в системах управления потоками газораспределительной системы, фрагмент которой представлен на рис. 14.

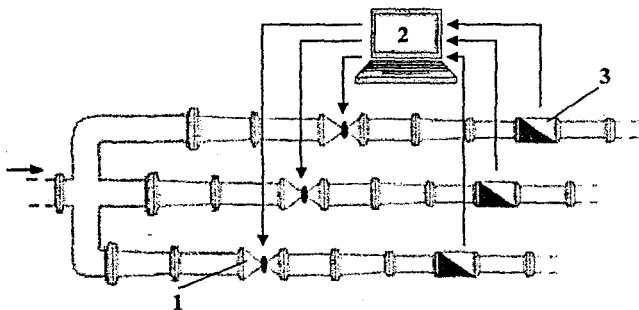


Рис.14. Система управления газовыми потоками: 1 – регулятор расхода; 2 – пункт управления; 3 – ультразвуковой расходомер

Представленные в данной работе метод и конструкции электроакустических преобразователей реализованы в ультразвуковом расходомере природного газа "Гиперфлоу-УС" (рис.15), отличающемся повышенными техническими характеристиками и надёжностью работы в "загрязнённых" газовых средах, что позволяет осуществлять эффективный контроль расхода и управление потоками газотранспортной системы.

В заключении изложены основные результаты исследований.

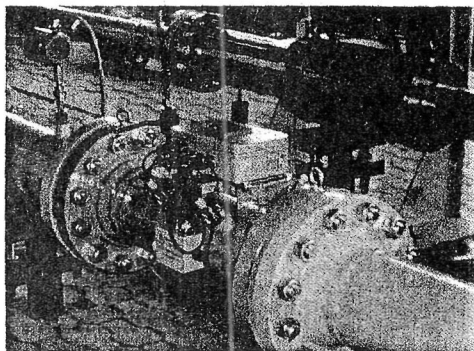


Рис.15.Ультразвуковой расходомер “Гиперфлюу-УС”

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен ультразвуковой метод определения скорости потока в трубопроводах преимущественно “загрязнённых” газовых сред, отличающийся учётом сигналов, прошедших по нескольким акустическим путям при использовании одной пары датчиков, и позволяющий контролировать изменения внутренних размеров трубопровода, вызванные, например, “засорением” трубопровода тяжёлыми примесями, содержащимися в газе.
2. Разработан пьезоэлектрический электроакустический преобразователь мембранного типа, обеспечивающий надёжную работу измерительной системы в загрязнённых газовых средах, её многоканальность при работе одной пары датчиков, а также в условиях шумов, вызванных регуляторами. На основе компьютерного моделирования методами конечных элементов разработаны требования к конструкции преобразователя для заданных характеристик излучения.
3. Предложен способ ограничения длительности электрического сигнала на приёмнике за счёт формирования специального передаваемого электрического сигнала, позволяющий разделять во времени сигналы, пришедшие по разным акустическим путям.
4. Разработана трёхмерная математическая модель распространения акустического сигнала в абсолютно жёстком цилиндрическом трубопроводе, излучённого мембранным излучателем, и решена соответствующая волновая задача. На основе полученных решений создан комплекс программ, позволяющий рассчитать акустический сигнал в

произвольной точке внутри трубопровода при заданном сигнале на излучателе.

5. Путём численного эксперимента обнаружен эффект скачка фазы гармонического заполнения сигнала при каждом отражении от стенки трубопровода, подтверждённый в реальном эксперименте, учёт которого позволил сократить погрешность определения времени распространения сигнала в электроакустическом тракте измерительной системы.
6. В перспективе планируется разработка эффективного измерителя расхода "попутных" газов, получаемых сепарацией при добыче нефти и отличающихся значительной загрязнённостью.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Деревягин Г.А. Новый способ измерения расхода газа, реализованный в ультразвуковом расходомере "Типерфлоу-УС"/А.М. Деревягин, А.С. Фомин, В.И. Свистун, Г.А. Деревягин // Наука и техника в газовой промышленности. 2006. No 4(28). С. 20-29.
2. Деревягин Г.А. Распространение акустического сигнала в жёстком цилиндрическом канале/ Г.А. Деревягин, В.Б. Байбурин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. No 4(43). С. 33-37.
3. Деревягин Г.А. Датчик для ультразвуковой системы измерения расхода химически агрессивных газов/ В.Б. Байбурин, Г.А. Деревягин, Б.М. Кац // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. No 1(44). С. 156-158.
4. Деревягин Г.А. Исследование пьезодатчика мембранного типа/ Г.А. Деревягин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. No 1(44). С. 159-161.

Публикации в других изданиях

5. Derevyagin G.A. New technology of natural gas flow rate measurement based on ultrasonic method / A.S. Fomin, G.A. Derevyagin, V.V. Kozlov, N.F. Stolyar, A.G. Lykov // International Gas Union Research Conference. Paris, 2008. P. 250-266.
6. Деревягин Г.А. О распространении импульсных акустических волн в цилиндрических каналах / Г.А. Деревягин, В.Б. Байбурин // Математические методы в технике и технологиях: материалы XXII Междунар. конф.: в 2 т. Саратов: СГТУ, 2009. Т.1. С. 13-15.

7. Деревягин Г.А. Излучение высокочастотных акустических импульсов в цилиндрический канал мембранным излучателем / Г.А. Деревягин // Инновации и актуальные проблемы техники и технологии: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных: в 2 т. Саратов: СГТУ, 2009. Т.1. С. 20-23.
8. Деревягин Г.А. Программа расчёта и анализа акустического сигнала, излучённого мембранным излучателем в цилиндрический канал / Г.А. Деревягин, В.Б. Байбурин // Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2010610452 от 11 января 2010.

Деревягин Глеб Александрович

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ РАСХОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ

Автореферат

Корректор О.А. Панина

Подписано в печать 27.05.10

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд.л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 203

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77.

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77