

На правах рукописи

ОНИЩЕНКО Станислав Александрович

**СТРУЙНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ
КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ И ПЛОТНОСТИ
ЧАСТИЦ В СЛОЕ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2004

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы и приборы» Тамбовского государственного технического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мордасов Михаил Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Дмитриев Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент
Леонтьев Евгений Алексеевич

Ведущая организация: ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт по использованию техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве (ВИИТиН)» (г. Тамбов)

Защита диссертации состоится 10 декабря 2004 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тамбовского государственного технического университета.

Автореферат разослан "___" ноября 2004 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. А. Чуриков

Подписано к печати 2.11.2004
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 745

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
329000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. До 80 % веществ, используемых и производимых в различных отраслях промышленности, являются сыпучими, т.е. представляющими собой совокупность большого количества твердых частиц, пространство между которыми заполнено газом. Наиболее полно состояние сыпучего материала отражают концентрация газовой фазы и плотность.

Весьма заметна роль измерения плотности в организации системы количественного учета (по массе) веществ при их приемке, хранении и отпуске.

Проблема создания новых методов контроля плотности сыпучих материалов (СМ) связана с необходимостью получения оперативной информации о ходе технологического процесса, о качестве и количестве сырья, продуктов и полупродуктов.

Измерение плотности сыпучих материалов возможно только косвенными методами. Основная проблема измерения плотности заключается в измерении концентрации газовой фазы или объема частиц СМ, так как измерение массы не вызывает трудностей. При этом принцип измерения пневматическим замещением позволяет проводить измерение не самой интересующей нас величины, а другой – являющейся замещающей, параметры которой несут информацию об измеряемой величине. Пневматические методы контроля плотности, основанные на принципе замещения, универсальны, надежны и позволяют измерять кажущуюся и истинную плотность частиц сыпучих материалов.

Пневматическая аппаратура, реализующая методы, пожаро- и взрывобезопасна, дешева, неприхотлива, проста в обслуживании.

Известными пневмодинамическими методами невозможно контролировать плотность движущегося СМ, получаемые результаты зависят от гранулометрического состава и температуры газа.

Поставленная в работе проблема разработки струйно-акустического метода контроля концентрации газовой фазы и плотности сыпучих материалов является важной и актуальной.

Цель работы. Разработка и исследование струйно-акустического неразрушающего метода и устройства контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое СМ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- осуществить теоретические и экспериментальные исследования физических процессов, происходящих в струйно-акустической длинной линии с различными типами нагрузок;
- разработать бесконтактный струйно-акустический метод контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое сыпучего материала;
- осуществить экспериментальную проверку полученных результатов и провести метрологический анализ метода контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое сыпучего материала;
- разработать устройство для контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое СМ; осуществить анализ его работы и экспериментальную проверку;
- изучить и осуществить сравнительный анализ различных аэродинамических генераторов акустических колебаний.

Методы и методики исследований. Основные задачи работы решались моделированием и анализом моделей процессов газовой динамики. При проведении экспериментальных исследований использовались методы физического моделирования, статистического и регрессионного анализа.

Научная новизна. На основе проведенных исследований процесса распространения струйно-акустического сигнала предложен метод неразрушающего контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое сыпучего материала, заключающийся в следующем:

- формируется плоская падающая звуковая волна, отражение которой от слоя сыпучего материала высотой, равной четверти длины звуковой волны, приводит к возникновению режима стоячих волн;
- фиксируется положение узла стоячей волны в пространстве, которое однозначно определяет величину концентрации газовой фазы, а с учетом массы – плотность сыпучего материала независимо от параметров окружающей среды и скорости движения.

Предложена физическая модель СМ в виде параллельного соединения твердой фазы как сплошного вещества и газовой фазы как акустической емкости. Для такой системы получена аналитическая зависимость изменения длины струйно-акустической линии, эквивалентной нагрузке в виде СМ в результате струйно-акустического замещения.

Выявлены и физически обоснованы процессы аэродинамического звукообразования при истечении газа через одно- и двухдиафрагмовые звукообразующие элементы. Путем сравнения свойств генераторов диафрагмового типа доказана целесообразность использования однодиафрагмового генератора при реализации струйно-акустического метода.

Предложен метод сигнализации момента достижения узла в распределении амплитуд звукового давления в струйно-акустической системе в режиме стоячих волн, основанный на использовании эффектов, возникающих при акустическом воздействии на ядро турбулентной струи.

Практическая ценность. Разработано струйно-акустическое устройство неразрушающего контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое СМ. Осуществлен выбор конструктивных размеров его основных элементов.

Производственные испытания экспериментальных образцов устройств, реализующих разработанный метод, показали их работоспособность. Величина максимально допустимой погрешности не более 5,0 %.

Оригинальное устройство для измерения плотности признано изобретением и защищено патентом Российской Федерации.

Реализация результатов. Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли промышленные испытания и рекомендованы к внедрению на предприятиях ОАО «Завод подшипников скольжения», ЗАО СМНУ «Тамбовагропромпусконаладка», ОАО «Тамбовское опытно-конструкторское технологическое бюро», кроме того, они используются в научно-исследовательской и учебной работе Тамбовского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Четвертой Международной теплофизической школе «Теплофизические измерения в начале XXI века» (Тамбов, 2001 г.); 11-й Международной научно-технической конференции «Измерение. Контроль. Информатизация» (Барнаул, 2001 г.); III Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений» (Н. Новгород, 2001 г.); VII научной конференции ТГТУ (Тамбов, 2002 г.); 15-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Тамбов, 2002 г.); Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, 2002 г.); II Международной научно-технической конференции «Материалы и технологии XXI века» (Пенза, 2004 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть диссертации изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 44 рисунка и 16 таблиц. Список литературы включает 78 наименований.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту Мордасову Денису Михайловичу за научные консультации по диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы. Дана краткая характеристика содержания диссертации по главам. Сформулированы результаты исследования, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор существующих пневматических методов измерения плотности сыпучих материалов, осуществлена их классификация, приведены расчетные характеристики, определены достоинства и недостатки.

Сыпучий материал – многофазный объект измерения, поэтому плотность сыпучих материалов не является однозначным свойством и должна рассматриваться с учетом влияния газовой фазы. Существует большое количество методов измерения плотности сыпучих материалов, что связано со сложностями физического состояния контролируемого материала.

Учитывая преимущества пневматических методов измерения и их особенности, обоснована целесообразность их выделения в отдельную группу и классификации. Классификация пневматических методов приведена на рис. 1.

Пневматические методы в зависимости от вида воздействия на контролируемый сыпучий материал могут быть потенциальные и кинетические.

В потенциальных методах в процессе измерения течение газа или отсутствует или настолько мало, что его влиянием можно пренебречь. В кинетических методах результат измерения получают при силовом взаимодействии струи газа с частицами СМ.

В потенциальных методах значительное влияние на результат измерения оказывают утечки газа из измерительной емкости и адсорбция составляющих воздуха контролируемым материалом. В кинетических (струйных) методах с непрерывной продувкой газом слоя СМ результат измерения в значительной степени зависит от гранулометрического состава.

Известны методы контроля плотности жидкостей струйно-акустическим замещением. Методов контроля плотности СМ аналогичного действия обзор не выявил.

Определены цели и задачи исследования.

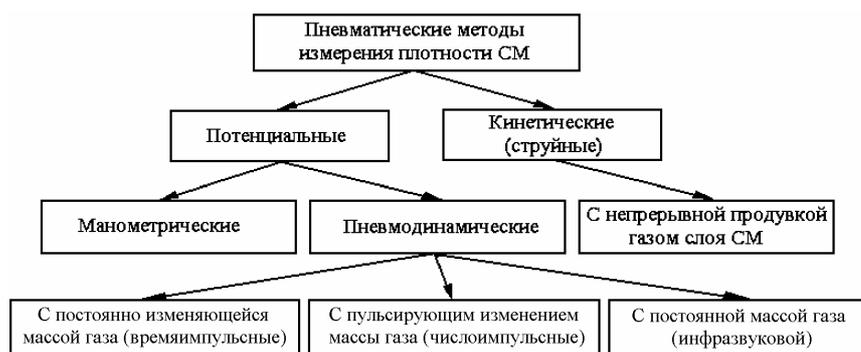


Рис. 1 Классификация пневматических методов измерения плотности СМ

Во второй главе рассмотрены особенности распространения струйно-акустического сигнала. Приведены теоретические зависимости распределения звукового давления и скорости смещения частиц среды вдоль отрезка длинной линии с идеальной нагрузкой, а также с нагрузкой в виде твердой поверхности, газового накопителя, сыпучего материала.

Решение уравнений Гельмгольца для установившегося режима в струйно-акустической длинной линии при гармоническом воздействии позволяет описать процесс распространения плоской акустической волны. При идеальной нагрузке (абсолютно жесткой или мягкой) в линии наблюдается режим стоячих волн. Такое сопротивление нагрузки $|\dot{Z}_н|$ может быть замещено сопротивлением отрезка воздушной длинной линии

$$|\dot{Z}_н| = |\dot{Z}_в| \operatorname{tg} kl_3, \quad (1)$$

где $|\dot{Z}_в|$ – волновое сопротивление среды (воздуха), в которой распространяется звуковая волна; l_3 – изменение длины, эквивалентное внесенной нагрузке; k – волновое число.

Уравнение (1) справедливо как для нагрузки в виде твердой поверхности, так и для жидкости. Отличие состоит в величине фазовых смещений l_3 .

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость, показывающая, какой длиной эквивалентного отрезка воздушной линии может быть замещена нагрузка в виде вещества с определенным волновым сопротивлением.

При нагрузке в виде плоской твердой поверхности изменение длин эквивалентных отрезков струйно-акустических линий будет незначительным, поэтому использовать такой физический эффект в качестве основы метода контроля плотности струйно-акустическим замещением невозможно, так как чувствительность метода в этом случае будет невелика.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показывает их хорошее совпадение.

Предложена физическая модель сыпучего материала как нагрузки струйно-акустической длинной линии в виде параллельного соединения твердого сплошного вещества и акустической емкости.

Представим твердую фазу сыпучего материала в виде монолита, от которого происходит отражение падающей волны (рис. 3, а), а газовую фазу, заполняющую пространство между частицами, в виде акустической емкости (рис. 3, б) с приведенной высотой – x_1 .

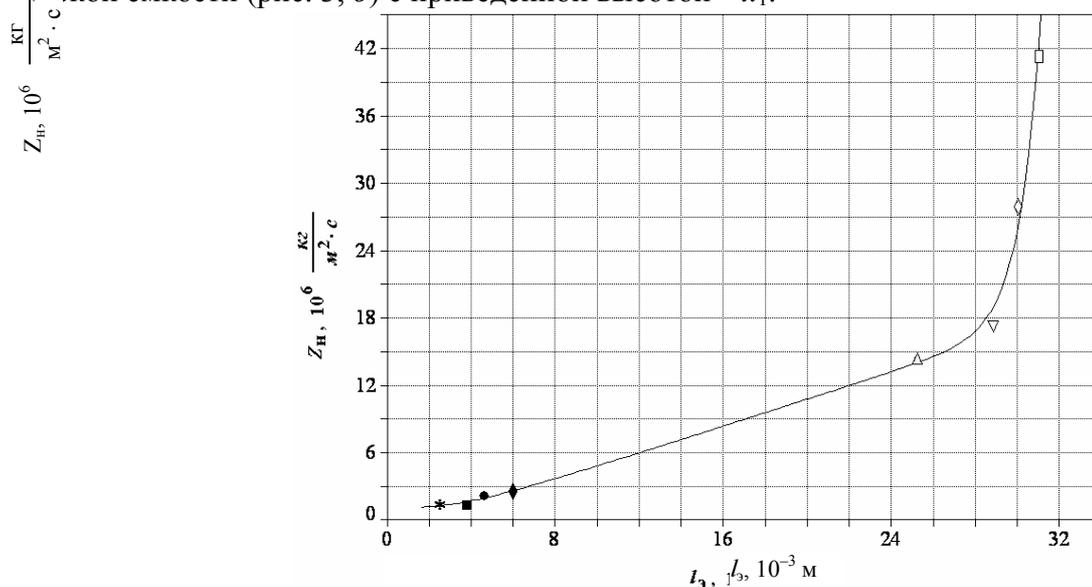


Рис. 2 Зависимость волновых сопротивлений жидких и твердых веществ от длины эквивалентного отрезка струйно-акустической линии:

экспериментальные данные □ – медь; ◇ – свинец; ∇ – алюминий; Δ – стекло;
 ◆ – глицерин; ● – масло М-8; ■ – масло компрессорное КС-19; * – бензин;
 — — аппроксимирующая зависимость

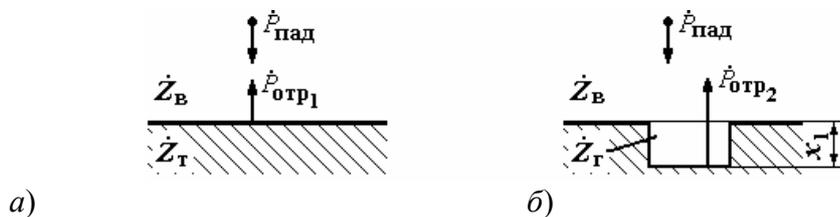


Рис. 3 Модельное представление сыпучего материала:

а – твердая фаза как сплошное вещество;
 б – газовая фаза как акустическая емкость

Струйно-акустический сигнал, падающий от генератора на поверхность сыпучего материала, взаимодействует с его частицами и, одновременно, проникает внутрь слоя, т.е. происходит заполнение акустической емкости. Вследствие этого акустический импеданс слоя сыпучего материала, учитывая параллельность соединения сопротивлений твердой поверхности и акустической емкости, будет определяться уравнением

$$\dot{Z}_{\text{CM}} = \frac{\dot{Z}_r \dot{Z}_T}{\dot{Z}_r + \dot{Z}_T} \quad (2)$$

После подстановки в (2) полученных выражений для акустических импедансов твердой плоской поверхности Z_r и нагрузки в виде акустической емкости Z_r получим

$$|\dot{Z}_{\text{CM}}| = \frac{|\dot{Z}_1|}{\text{tg} kx_1 + \text{ctg} kl_3} = \frac{|\dot{Z}_1|}{\text{tg} kx_1 + \text{tg} \left(k \left(\frac{\lambda}{4} - l_3 \right) \right)} \quad (3)$$

С учетом взаимного влияния двух реактивных составляющих нагрузки, изменение фазы результирующего распределения

$$\Delta x = \frac{x_1 + l_3 - \frac{\lambda}{4}}{2}. \quad (4)$$

Величина Δx в (4) есть изменение длины струйно-акустической линии, полученное в результате струйно-акустического замещения, эквивалентное нагрузке в виде сыпучего материала, акустический импеданс частиц которого эквивалентен сопротивлению отрезка длиной l_3 , а количество газовой фазы эквивалентно отрезку x_1 .

В третьей главе приведено описание разработанного метода контроля концентрации газовой фазы в слое СМ и плотности его частиц, представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Получена зависимость величины фазового смещения в распределении амплитуд звукового давления в струйно-акустической линии с нагрузкой в виде СМ в режиме стоячих волн от концентрации газовой фазы:

$$\varepsilon_0 = \frac{2\Delta x}{h}, \quad (5)$$

где ε_0 – концентрация газовой фазы в слое сыпучего материала (порозность); h – высота слоя сыпучего материала.

Разработан метод контроля концентрации газовой фазы и кажущейся плотности частиц в слое СМ путем измерения фазового смещения в распределении амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн и массы материала в слое.

При реализации метода измерения концентрации газовой фазы и кажущейся плотности в слое частиц СМ:

- заполняют емкость высотой $h_{\text{сл}}$ сыпучим материалом и определяют его массу m ;
- струйно-акустический измерительный преобразователь размещают над поверхностью сыпучего материала на расстоянии $\lambda/2$;
- сжатый воздух с заданными параметрами подают на вход струйно-акустического измерительного преобразователя;
- изменяя расстояние до сыпучего материала, осуществляют поиск узла стоячей волны;
- в момент достижения нулевого значения в распределении амплитуд звукового давления в струйно-акустической линии, измеряют расстояние l от генератора до контролируемой поверхности, по которому определяют величину Δx смещения узла стоячей волны относительно ее положения в случае идеальной нагрузки (на расстоянии $\lambda/4$), по которой судят о концентрации газовой фазы в слое сыпучего материала;

– по результатам измерения m массы СМ в пробе и расстояния l , пропорционального объему твердой фазы СМ, кажущуюся плотность частиц СМ определяют по формуле $\rho_{\text{ТВ}} = \frac{m}{V_{\text{ТВ}}} = \frac{m}{A + Bl}$, где

$$A = V_{\text{СМ}} - V_{\text{СМ}} \frac{\lambda}{2h_{\text{сл}}} \text{ и } B = \frac{2V_{\text{СМ}}}{h_{\text{сл}}}.$$

Разработано устройство для реализации и исследования метода измерения концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое СМ. Проведен анализ влияния неконтролируемых величин на результат измерений.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальной проверки струйно-акустического метода измерения кажущейся плотности частиц СМ.

1 Результаты экспериментальной проверки струйно-акустического метода измерения кажущейся плотности частиц СМ

№	Вещество	$\rho_{\text{ТВ}}^{\text{обр}},$ кг/м ³	Расстояние $l \pm \Delta l, 10^{-3}$ м ($p = 0,95$)	$m,$ 10^{-3} кг	$\rho_{\text{ТВ}}^{\text{эксп}},$ кг/м ³	Относительная погрешность $\delta,$ %
1	Дробь свинцовая	11 350	$26,4 \pm 0,4$	192,0	$\frac{1120}{2}$	1,3
2	Опилки железные	7540	$23,1 \pm 0,6$	88,4	7690	2,0
3	Шарики стеклянные	2800	$24,4 \pm 0,5$	37,7	2746	1,9
4	Шарики керамические	2100	$27,2 \pm 0,7$	39,8	2152	2,5
5	Гранулы полистирола	1230	$25,2 \pm 0,5$	18,1	1200	2,4

Изучено влияние на выходной сигнал гранулометрического состава. Доказано, что сыпучие материалы, различные по гранулометрическому составу, но сходные по величине концентрации газовой фазы, ведут себя идентично в качестве нагрузки отрезка струйно-акустической длинной линии и смещение узла стоячей волны при таких нагрузках одинаково.

Адекватность математической модели физического эффекта, положенного в основу метода контроля концентрации газовой фазы, реальным физическим процессам, происходящим в струйно-акустической измерительной системе, проверялась с использованием экспериментальной установки путем сравнения результатов, полученных по математической модели (5) с результатами, полученными путем образцовых измерений.

Образцовые измерения концентрации газовой фазы проводились методом жидкостной волюмометрии с погрешностью, не превышающей 0,5 %.

Обработка экспериментальных данных заключалась в определении смещения Δx_i расстояния от излучателя звука до контролируемой поверхности, при котором образуется узел в распределении амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн, относительно его положения на расстоянии $\lambda/4$, и расчете расстояния Δx_p , полученного по математической модели (5) при $h_{\text{сл}} = \lambda/4 = (33,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м.

В рассматриваемом случае получены значения $N = 7, I_c = 5, F_T = 5,05$. Среди вычисленных значений квантиля, максимальное – не превышает 2 ($F_{\text{max}} = 1,93$).

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что расчетная математическая зависимость адекватна процессу, протекающему в измерительной системе, так как $F < F_T$.

Определены закономерности изменения относительной погрешности, возникающей вследствие изменения скорости перемещения СМ. Импеданс движущегося сыпучего материала

$$Z_v = \frac{Z_{\text{СМ}}}{\sin \phi \left(1 + \frac{v}{c} \cos \phi \right)}, \quad (6)$$

где ϕ – угол между векторами скорости v движения СМ и скорости c падающей звуковой волны; $Z_{\text{СМ}}$ – импеданс неподвижного СМ.

При движении сыпучего материала в направлении, перпендикулярном направлению распространения звуковой волны, угол $\phi = 90^\circ$, а выражение (6) примет вид $Z_v = Z_{\text{СМ}}$, откуда видно, что импеданс движущегося СМ равен импедансу неподвижного. Проверка полученного результата проводилась на специально созданной установке. Результаты экспериментальной проверки влияния скорости движения слоя сыпучего материала на величину смещения узла стоячей волны приведены в табл. 2.

2 Результаты экспериментальной проверки влияния скорости движения слоя сыпучего материала на величину смещения узла стоячей волны

№	Скорость v , 10^{-2} м/с	$\overline{\Delta x}$, 10^{-3} м	M , 10^{-3} м	$(\Delta x \pm \Delta)_{v=0}$, 10^{-3} м
1	5	7,5	7,5	$7,5 \pm 0,3$
2	10	7,7		
3	15	7,5		
4	20	7,4		
5	25	7,2		

Примечание. $\overline{\Delta x}$ – среднее значение смещения узла стоячей волны, полученное в результате обработки экспериментальных данных; M – математическое ожидание величины $\overline{\Delta x}$.

Анализ данных табл. 2 показывает, что при изменении скорости v в диапазоне от 0 до 0,25 м/с усредненное значение величины смещения узла стоячей волны совпадает со значением, полученным для неподвижного слоя.

Отклонения результатов лежат в пределах погрешности измерений и не превышают 1 %.

Проведен метрологический анализ метода контроля концентрации газовой фазы и кажущейся плотности частиц СМ.

Анализ источников погрешности, определяющих общую погрешность метода измерения, позволил представить ее в виде

$$\Pi_M = f(\Pi_{\text{сист}}, \Pi_{\text{случ}});$$

$$\Pi_{\text{сист}} = \Pi_{\text{оми}} + \Pi_v;$$

$$\Pi_{\text{случ}} = \sqrt{\Pi_{\text{ки}}^2 + \Pi_{\text{нв}}^2},$$

где Π_M – погрешность метода контроля; $\Pi_{\text{сист}}$ – систематическая составляющая общей погрешности; $\Pi_{\text{случ}}$ – случайная составляющая общей погрешности; $\Pi_{\text{оми}}$ – погрешность образцовой методики измерения; Π_v – погрешность вызванная перемещением слоя СМ в плоскости, перпендикулярной направлению распространения звуковой волны; $\Pi_{\text{ки}}$ – погрешность косвенных измерений; $\Pi_{\text{нв}}$ – погрешность от влияния величин, неконтролируемых в процессе измерения.

На основании проведенной оценки величин погрешностей, определяющих общую погрешность, последняя, в силу преобладания в ней случайной составляющей, примет вид

$$\Pi_M = \sqrt{\Pi_{\text{сист}}^2 + \Pi_{\text{случ}}^2}$$

и не будет превышать 2,5 %.

В четвертой главе приводятся результаты исследований аэродинамических звукообразующих устройств диафрагмового типа. Разработан аэродинамический метод индикации момента звукообразования.

Основным узлом струйно-акустических измерительных устройств является генератор колебаний, от стабильности которого зависит не только точность измерения, но и реализуемость метода.

Изучены особенности звукообразования в генераторах, выполненных в виде одно- и двухдиафрагмовых устройств, позволившие выявить аэродинамические обратные связи и обосновать их действие. Доказано, что в однодиафрагмовых звукообразующих элементах поток отрицательной обратной связи образуется за счет эжекции воздуха из окружающей среды в область, образованную при снятии фаски с внешней стороны диафрагмы. Глубина обратной связи определяется геометрическими параметрами фаски.

В двухдиафрагмовых звукообразующих элементах обратная связь формируется вихревым движением потока газа в междиафрагмовом пространстве, а ее глубина определяется конфигурацией этого пространства.

Изучено влияние температуры и расхода питающего газа на частоту генерируемых колебаний.

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований выявлены достоинства и недостатки струйно-акустических генераторов различных конструкций. Обоснована целесообразность использования в методах и средствах контроля однодиафрагмовых генераторов.

Проведен сравнительный анализ характеристик свободных газовых струй и струй, прошедших через однодиафрагмовый звукообразующий элемент. Доказано, что при прохождении последних через звукообразующий элемент возникающие акустические колебания вызывают турбулизацию основного участка струи газа, вследствие чего уменьшается объем ядра постоянных скоростей, что приводит к увеличению угла раскрытия турбулентной струи. При отсутствии генерации характеристики струй, прошедших через диафрагмовый звукообразующий элемент, аналогичны характеристикам свободных газовых струй, вытекающих из сопел.

Результаты исследований могут быть использованы при оценке температурных погрешностей и выработке мероприятий по их коррекции в струйно-акустических устройствах контроля свойств веществ в различных агрегатных состояниях. Кроме того, они могут быть использованы при разработке принципиально новых струйно-акустических методов и средств измерения плотности и температуры газа в потоке.

Пятая глава посвящена разработке и исследованию струйно-акустического устройства для контроля концентрации газовой фазы в слое СМ и кажущейся плотности его частиц, схема которого приведена на рис. 4.

Предложен метод индикации узла в распределении амплитуд звукового давления в режиме стоячих волн, базирующийся на использовании аэродинамического эффекта увеличения сечения турбулентной струи газа при акустическом воздействии. Проведенные выше исследования характеристик свободных турбулентных струй, а также струй, вытекающих из диафрагмовых звукообразующих элементов, показали, что угол раскрытия струи изменяется скачкообразно от $15^\circ - 18^\circ$, при отсутствии генерации, до $20^\circ - 26^\circ$, при наличии колебаний звуковой частоты. На этом основании предложено информацию о достижении нулевого значения в распределении амплитуд звукового давления в струйно-акустической линии получать косвенно по изменению угла раскрытия турбулентной струи. Конструктивная реализация этого возможна различными техническими средствами, однако, наиболее приемлемым, с точки зрения единства используемой энергии, является струйный блок индикации.

На рис. 5 представлена схема предложенного в работе блока индикации.

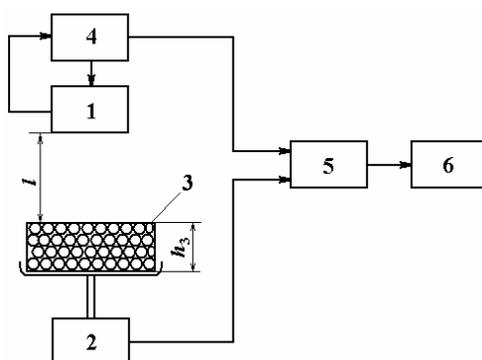


Рис. 4 Схема устройства для контроля концентрации газовой фазы

и плотности частиц в слое сыпучего материала:

- 1 – струйно-акустический измерительный преобразователь; 2 – весоизмерительное устройство; 3 – емкость с сыпучим материалом; 4 – устройство перемещения; 5 – множително-делительное устройство; 6 – вторичный прибор

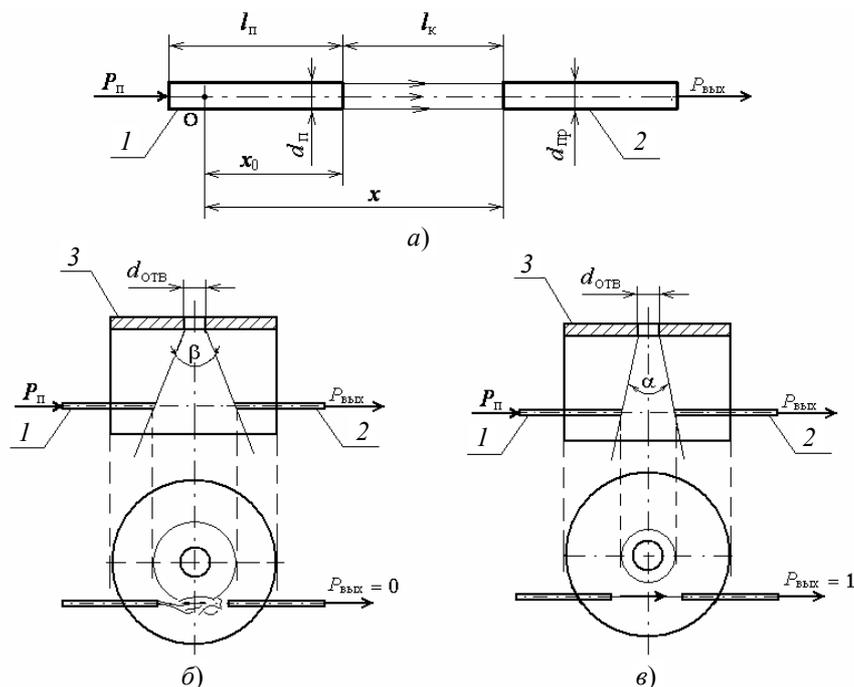


Рис. 5 Блок индикации узла стоячей волны (а) и принцип его действия при струйном генерировании (б), при отсутствии звуковых колебаний (в):
 1 – канал питания; 2 – приемный канал;
 3 – диафрагмовый звукообразующий элемент

В результате проведенного расчета блока индикации узла определены его геометрические размеры ($l_p, l_k, d_p, d_{пр}, d_{отв}, x_0, x$), параметры входного ($P_{п}$) и выходного ($P_{вых}$) сигналов, а также сформулировано условие выбора установочных размеров в зависимости от параметров формирователя плоской акустической волны и радиуса излучающего отверстия.

Экспериментальная проверка разработанного устройства позволила определить его основные технические и метрологические характеристики. Основная допустимая погрешность контроля плотности СМ в диапазоне $1100 \dots 12\,000 \text{ кг/м}^3$ разработанным устройством не превышает 5,0 %, что позволяет использовать его для оперативного контроля в производственных условиях.

В приложении приведены акты внедрения результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Проведенный литературный обзор выявил отсутствие струйных пневматических методов неразрушающего контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое СМ, выходной сигнал которых не зависел бы от гранулометрического состава и скорости движения частиц контролируемого материала.

2 Предложено использовать в качестве измерительной струйно-акустическую систему, состоящую из отрезка струйно-акустической длинной линии с нагрузкой в виде СМ. Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающих возможность использования такой системы в качестве измерительной.

3 На основе физического представления СМ в виде параллельного соединения твердой фазы как сплошного вещества и газовой фазы как акустической емкости получена аналитическая зависимость

изменения длины струйно-акустической линии, эквивалентного нагрузке в виде СМ в результате струйно-акустического замещения.

4 Полученная аналитическая модель струйно-акустической системы с нагрузкой в виде СМ положена в основу разработанного метода неразрушающего контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое сыпучего материала. Проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния неконтролируемых величин на процесс измерения. Осуществлена оценка погрешности методов.

5 Проведено исследование одно- и двухдиафрагмовых струйных генераторов акустических колебаний. Сравнительный анализ полученных результатов показал целесообразность использования при реализации разработанного метода контроля СМ однодиафрагмовых генераторов.

6 Предложен метод индикации узла в распределении амплитуд звукового давления вдоль струйно-акустической длинной линии, в основу которого положена зависимость размеров газовой струи после генератора от режима его работы.

7 Разработано оригинальное устройство для реализации метода контроля концентрации газовой фазы и плотности частиц в слое сыпучего материала, которое признано изобретением и защищено патентом РФ.

**Основные материалы, отражающие результаты диссертационной
работы, изложены в следующих публикациях**

1 Онищенко С.А. Метод адаптации струйно-акустического измерительного устройства к изменению частоты генератора / С.А. Онищенко, Д.М. Мордасов, С.В. Рыбаков // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов 15-й Междунар. науч. конф. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2002. – Т. 7. – С. 45.

2 Онищенко С.А. Струйно-акустический неразрушающий контроль веществ / С.А. Онищенко, М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Труды Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза, 22 – 24 октября 2002 г.). – Пенза, 2002. – С. 50 – 51.

3 Онищенко С.А. Бесконтактный контроль истинной плотности частиц сыпучих материалов / С.А. Онищенко, М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой Международной теплофизической школы (24 – 28 сентября 2001 г.) / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2001. – Ч. 2. – С. 72 – 73.

4 Онищенко С.А. Бесконтактный струйно-акустический контроль порозности сыпучих материалов / С.А. Онищенко, М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов // VII научная конференция ТГТУ: Пленарные доклады и тезисы стендовых докладов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2002. – Ч. 1. – С. 40 – 41.

5 Онищенко С.А. Принцип газового замещения в методах контроля плотности сыпучих материалов / С.А. Онищенко, М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – 31 с. – Деп. в ВИНТИ, г. Москва, № 177-B2004.

6 Онищенко С.А. Струйно-акустические генераторы диафрагмового типа / С.А. Онищенко, Д.М. Мордасов // Материалы и технологии XXI века: Сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза, 25 – 26 февраля 2004 г.). – Пенза, 2004. – С. 156 – 157.

7 Онищенко С.А. Двухдиафрагмовый генератор струйно-акустических устройств контроля технологических параметров веществ / С.А. Онищенко, Д.М. Мордасов, Р.Ю. Ласьков, И.Н. Мартынов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – Вып. 15. – С. 145 – 148.

8 Онищенко С.А. Струйно-акустический контроль плотности сыпучих материалов / С.А. Онищенко, Д.М. Мордасов; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2004. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ, г. Москва, № 693-B2004.

9 Заявка № 2002112953 на патент РФ с приоритетом от 13.05.2002. Устройство для измерения плотности сыпучих веществ / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов, С.А. Онищенко.