© А.В. Скоробогатов, 2006

УДК 622:62-752

А.В. Скоробогатов

РАЗРАБОТКА ТЕРМОМЕТРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ХОЛОДОВОЙ ПРОБЫ, ПРИМЕНЯЕМОЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ПРИЗНАКОВ ВИБРАЦИОННОЙ БОЛЕЗНИ У РАБОТНИКОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Семинар № 22

Вибрационная болезнь от воздействия локальной вибрации по-прежнему лидирует в списке профессиональных заболеваний среди рабочих Московской области.

При этой патологии поражаются периферические нервы и сосуды верхних конечностей. Основным клиническим проявлением является наличие полинейропатии рук, чаще с ангиодистоническим или ангиоспастическим синдромами.

Описание вибрационной болезни

Вибрационная болезнь, профессиональное заболевание, вызванное длительным воздействием на организм местной (локальной) или общей вибрации. Местная вибрация (например, при работе с ручными пневмо- и электромолотками, тромбовками, виброуплотнителями) воздействует на ограниченный участок тела; общая вибрация (например, при виброуплотнении бетона, на транспорте) влияет на весь организм.

Вибрационная болезнь описана итальянским врачом Дж. Лоригой в 1911, хотя первые попытки описать её были сделаны ещё в 19 в. русскими врачами А.Н. Никитиным, Ф.Ф. Эрисманом и др. В. б. развивается постепенно и в продолжение длительного времени не влияет на работоспособность. Утомление, холод, напряжённое положение тела при неправильной рабочей позе ухудшают переносимость вибрации. В. б. проявляется болями и слабостью в конечностях, повышенной чувствительностью к охлаждению; в дальнейшем могут появиться судороги, побеление пальцев (особенно на холоде), снижается чувствительность, отмечаются изменения со стороны сосудов конечностей. Эти изменения наблюдаются на фоне функциональных расстройств нервной системы (быстрая утомляемость, раздражительность, головные боли, иногда головокружения). При прогрессировании Вибрационной болезни появляются нарушения сердечно-сосудистой деятельности и внутренней секреции, нарушения обменных процессов и др.

Это заболевание развивается у лиц, профессия которых связана с постоянным соприкосновением рук с вибрирующим инструментом: шлифовщиков и полировщиков, отбойщиков, работающих с пневматическими инструментами, вибрирующими в режиме высоких частот. Длительная вибрация вызывает в первую очередь изменения в капиллярной сети, что выражается как спастическим, так и паралитическим ее состоянием.

Ранним клиническим проявлением заболевания являются: преходящее онемение пальцев, чувство ползания мурашек, одеревенелость с объективной картиной "белых пальцев".

С картиной вегетативного полиневрита сочетаются общие астенические и астеневротические реакции (головокружение, нарушение сна, повышенная раздражительность).

Самыми неблагоприятными являются вибрационные колебания с частотой 100-200 Гц. Особо следует отметить патологические изменения, обусловленные воздействием общей вибрации, которые развиваются у шоферов тяжелых и гоночных машин, трактористов, водителей бульдозеров, проводников поездов дальнего следования. Кроме вегетативных изменений, расстраивается координация движений, у лиц, подвергшихся общей вибрации в положении сидя, из-за сильного напряжения мышц спины при отсутствии опоры и резких толчках, развиваются деструктивные изменения в позвоночнике с дискогенными корешковыми болями. За счет воздействия вибрации на спинной мозг (на уровне сакральных сегментов) могут развиваться расстройства тазовых органов (импотенция, нарушение мочеиспускания, сексуальные нарушения).

Для оценки степени заболевания вибрационной болезнью широко используются клинико-неврологические, телевизионные инфраскопические и капилляроскопические методики, а так-же кожная электротермометрия.

Кожная электротермометрия, методика выполнения холодовой пробы

Выбирается испытуемый, о котором собираются сведения по нижеприведенной анкете. Затем он раздевается до пояса и адаптируется к условиям микроклимата конкретного помещения в течение 20-30 минут. За это время определяются параметры среды: температуру, влажность, движение воздуха. Сопоставляют полученные данные с нормативными для помещения, делают вывод об их соответствии гигиеническим параметрам.

Проверяют точность работы электротермометра. Для наблюдения выбирают ограниченные участки кожи на закрытых одеждой частях тела (грудь, спина). Подобные наблюдения на открытых частях тела (руки, лоб) дают менее характерные результаты, так как они подвержены естественному закаливанию. Можно выбрать один из открытых участков тела (чуть выше середины между бровями) и один из закрытых (середина верхней трети спины). Эти точки следует слегка отметить, чтобы не сдвинуть прибор (для точности измерений). В этих точках измерить исходную температуру кожи и записать в протокол. Затем проба проводится отдельно по выбранным точкам.

Далее кисть опускается в баночку со льдом на 20-30 с (по секундомеру), после чего измеряется температура кожи. Она будет снижаться вследствие охлаждения. Необходимо отметить, до какой величины снизилась температура и за какое время. Затем вследствие адаптационных механизмов температура будет увеличиваться, достигнув первоначальной величины.

Необходимо записывать значения температуры кожи каждые 30 сек (для детального анализа) и отметить время, в течение которого она достигла исходных значений. Все полученные значения изображаются на графике для наглядности (см. рис. 1).

Температура кожи может восстанавливаться в течение 10-15 минут, при этом в первые 2-4 минуты это происходит в быстром темпе, еще 2-3 минуты подъем существенно замедляется и в последнем периоде изменения едва заметны. Подобная трехфазность восстановления первоначальных значений характерна для температурной кривой.

Для хорошей адаптации к холоду, т.е. отсутствие признаков вибрационной болезни характерно кратковременное и незначительное снижение в пределах 1,5-2

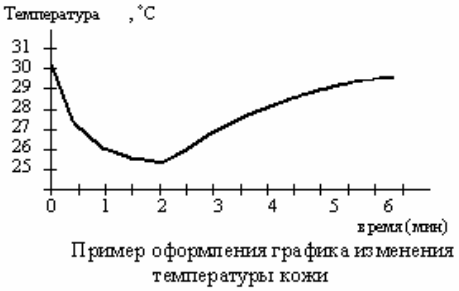
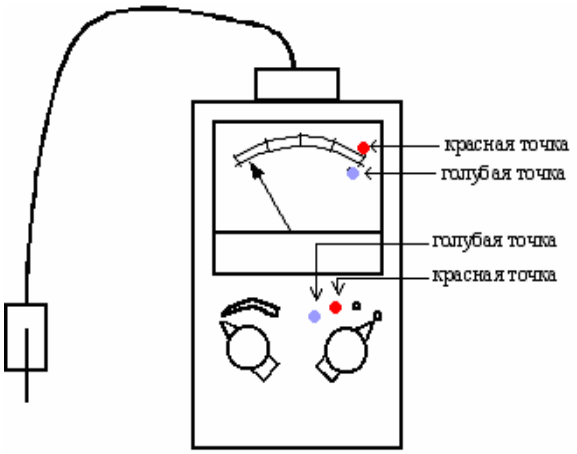


Рис. 1

°С и возвращение ее к исходным значениям в течение 5 минут. Более выраженный сдвиг показателя (3-4 °С) и восстановление за 10 минут свидетельствует об появлении признаков вибрационной болезни и еще более длительное восстановление температуры кожи – стойкие нарушения в тканях.

Устройство и методика работы электротермометра. Прибор (см. рис. 2) имеет термодатчики, предназначенные для измерения температуры кожи на туловище, на конечностях (бедро, голень, плечо, предплечье, кисть, в полости рта, в подмышечной впадине.



Внешний вид электрометра

Рис. 2

На приборе имеется регистрирующая часть в виде двух шкал, отмеченных красной и голубой точками. Красная точка - для показаний прибора более 29 °С, голубая - менее 29 °С. Имеются на панели прибора два переключателя: один для контроля за качеством его работы, другой - для переключения на разные шкалы.

Вначале устанавливаем рукоятку первого переключателя на положение "К" (контроль). Стрелка прибора должна установиться на проекции красной и голубой точек. Если она не установилась в этом положении, то рукояткой другого переключателя доводят ее до необходимого уровня. Теперь точность работы прибора соответствует требуемым условиям. Устанавливаем термодатчик на выбранную точку на теле испытуемого и рукоятку переключателя переводим на голубую точку. Ждем, пока стрелка остановится. Это и есть значение температуры кожи в этой точке. Если стрелка прибора уходит за пределы данной (голубой) шкалы, то переключаем рукоятку в положение красной точки и ждем, пока стрелка остановится. Записываем полученное значение в протокол и отмечаем

Краткое описание конструкции разрабатываемого прибора

У вышеописанного прибора есть ряд недостатков:

1. Невозможность прямого построения графиков.
2. Низкая точность
3. Необходимость выбора диапазона.
4. Большая инерционность термодатчиков прибора.

Разрабатываемый прибор создан на основе микроЭВМ (микроконтоллера) фирмы ATMEL серии AVR – Atmega 128. Для вывода данных используется графический ЖКИ фирмы Winstar разрешением 320x240 с яркой светодиодной подсветкой. Собран прибор в корпусе размером 15x10 см. На корпуе сделаны разъемы для подключения датчиков, источника питания, кабеля связи с компьютером и прочей перефирии.

В качестве датчиков используются датчики фирмы Dallas Semiconductor DS1820. Они обладают необходимой точностью, не зависят от наводимых помех, для соединения необходимо всего 3 провода, а в некоторых случаях даже 2. А также обладают малой инерционностью.

Также у прибора имеется стандартный разъем для подключения к ПК по

интерфейсу RS-232. Это позволяет легко передавать данные для обработки и анализа во внешние программы ПК. Стоит заметить, что возможно сохранение и анализ данных в самом приборе. Для этого он оснащен энергонезависимой памятью для хранения результатов.

А использование в приборе программируемого микроконтроллера позволяет легко модифицировать программу и расширять возможности прибора.

Заключение

Основной целью данной работы является разработка прибора, взамен габаритного и ненадежного электротермометра.

Разрабатываемый прибор:

- будет более удобным и надежным;
- позволит в реальном времени строить график восстановления кожного покрова на большом графическом дисплее;
- даст возможность сохранять данные графики в памяти;
- обеспечит связь с персональным компьютером, т.е. передача данных для обработки и анализа во внешние программы;
- даст возможность использования любого количества, а также разных температурных датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева-Галанина Е.Ц., Дрогичина Э.А., Артамонова В.Г.* Вибрационная болезнь, Л., 1981;
2. *Андреева-Галанина Е.Ц. и Артамонова В.Г.* Экспертиза трудоспособности при вибрационной болезни, Л., 1985
3. *Рашмер Р.* Динамика сердечно-сосудистой системы. Москва. «Медицина». 1981г. С. 191-195.
4. *Суворов Г.А., Шкарин А.Н., Денисов Э.И.* Гигиенические нормативы производственных шумов и вибраций, 1984. Москва.
5. *Суворов Г.А., Прокопин А.В.* Вибрация и защита от нее. М. Ред. Журнала «Охрана труда», 2001 г.
6. *Артамонова В.Г., Шатилов Н.Н.* Профессиональные болезни, 2-е издание, М.: Медицина, 1988.
7. *Материалы* сайтов www.atmel.ru, www.atmel.com, www.winstar.tw.com, www. gaw.ru

Коротко об авторах

Скоробогатов А.В. – кафедра «Электротехника и информационные системы», Московский государственный горный университет.

© С.З. Шкундин, В.В. Стучил
2006

УДК 622:534

С.З. Шкундин, В.В. Стучилин

АЭРОАКУСТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В МЕТОДЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ АНЕМОМЕТРИИ

Семинар № 22

1 Сущность метода интегральной акустической анемометрии

В горных выработках, штреках, стволах, вентиляционных каналах эпюра аэродинамического распределения скоростей в сечении имеет неправильную форму. Вид ее может изменяться во времени при изменении средней скорости потока, состава среды и ее температуры. Поэтому измерение расхода в названных воздуховодах при помощи точечных анемометров или расходомеров с приемлемой точностью представляет собой весьма сложную задачу.

Сущность предлагаемого метода состоит в том, что при распространении звука под углом примерно в 45° к направлению потока воздуха часть вектора скорости воздушного потока, действующая в направлении распространения звука, приводит к увеличению его фазовой скорости. Наоборот, при распространении звука под углом примерно в 45° против направления потока воздуха часть вектора скорости воздушного потока, действующая против направления распространения звука, приводит к уменьшению его фазовой скорости.

Принцип измерения интегральной или средней скорости воздушного потока в выработке поясняется на рис. 1. Если принять за ось *x* направление движения воздуха или ось воздуховода, а за *y* перпендикулярное направление, то распределение потока воздуха можно представить в виде функции $v_в(y)$. Среднюю скорость по сечению туннеля можно оценить, интегрируя функцию *v(y)* по оси *y*:

$$V_{B.CP} = \frac{1}{H}\int_0^H v_B\left(y\right)dy \qquad (1)$$

Полученное значение $V_{в.ср}$ позволяет определить расход воздуха в туннеле по формуле: $Q = V_{B.CP} \cdot S$, где *S* площадь сечения выработки.

Обычно измерение расхода воздуха оценивают по измерению в одной точке, или по перепаду давления в двух точках вдоль потока, что не отражает средней (интегральной) скорости потока.

Если на одной стороне выработки установить акустический излучатель *И1*, и примерно в направлении под углом 45° к оси выработки установить два приемника *Пр1* и *Пр2*, то можно определять интегральное значение скорости потока воздуха по фазовой задержке или фазовому набегу звуковых волн с учетом профиля распределения скорости по сечению выработки. При этом на скорость распространения звука, или изменение фазы акустических колебаний, будет влиять только составляющая вектора скорости воздуха $v_в(y)$, совпадающая с направлением распространения звуковой волны от излучателя на приемник. Её можно выразить как:

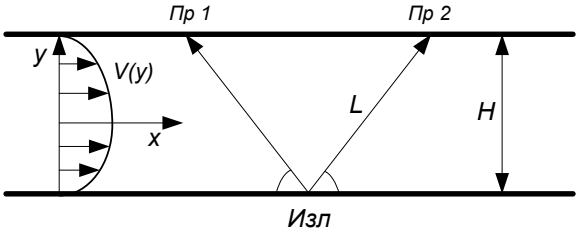


Рис. 1. Распределение скоростей потока воздуха и расположение излучателя и прием-ников в туннеле

$$v_{B3}(y) = v_B(y)\cos\alpha,$$

где α угол между направлением потока воздуха и направлением от источника звука к приемнику *Пр2*.

Соответственно, если приемник установлен симметрично против потока воздуха, будем иметь

$$v_{B3}(y) = v_B(y)\cos(-\alpha) = -v_B(y)\cos\alpha.$$

Если приемники установлены под углом 45° к оси туннеля, то косинус угла α составит:

$$\cos\alpha = 1/\sqrt{2} = 0,71$$

Под воздействием потока воздуха локальная скорость звука будет изменяться к приемникам *Пр1* и *Пр2* по закону:

$$v_{3B}(y) = v_{30} + v(y) = v_{30} + v_B(y)\cdot\cos\alpha \quad (2)$$

где v_{30} - скорость распространения звука в неподвижном воздухе.

Если приемники установлены под углом 45° к оси туннеля, то имеем:

$$v_{3B}(y) = v_{30} \pm v(y)\cdot\cos\alpha = v_{30} \pm 0,71\cdot v_B(y), \quad (3)$$

где знак «+» относится к направлению на приемник *Пр2*, а знак - относится к направлению на приемник *Пр1*.

Интегральную или среднюю скорость звука можно определить по формуле:

$$V_{3B.CP} = 1/H\int_0^H v_{3B}(y)\,dy =$$

$$= 1/H\int_0^H \left(v_{30} + v_B(y)\cdot\cos\alpha\right)dy = v_{30} +$$

$$+\cos\alpha/H\int_0^H v_B(y)\,dy \quad (4)$$

Анализ формулы (1.4) и сопоставление с формулой (1.1) показывает, что интегральное значение скорости звука связано с интегральным значением скорости потока воздуха следующим соотношением:

$$V_{3B.CP} = v_{30} + V_{B.CP}\cdot\cos\alpha. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для звука распространяющегося по направлению от излучателя к приемнику *Пр1*. При распространении звука по направлению от излучателя к приемнику *Пр2* интегральное значение скорости звука будет связано с интегральным значением скорости потока воздуха следующим соотношением:

$$V_{3B.CP} = v_{30}\cdot V_{B.CP}\cdot\cos\alpha \quad (6)$$

Если определить разность интегральной скорости звука с потоком воздуха и без него, то, согласно формуле (5), можно определить интегральное значение скорости потока воздуха по формуле:

$$V_{B.CP} = \left(V_{3B.CP} - v_{30}\right)/\cos\alpha.$$

2. Аналитическое описание траекторий акустических лучей в аэродинамическом поле

При прозвучивании выработки акустический луч искривляется вследствие взаимодействия с аэродинамическим полем. Для анализа характеристик различных способов анемометрии необходимо знать траектории распространения акустических лучей, т. е. степень отклонения этих траекторий от линейных. Ниже приводится аналитическое описание вышеназванных траекторий в ламинарном и турбулентном газовоздушных потоках.

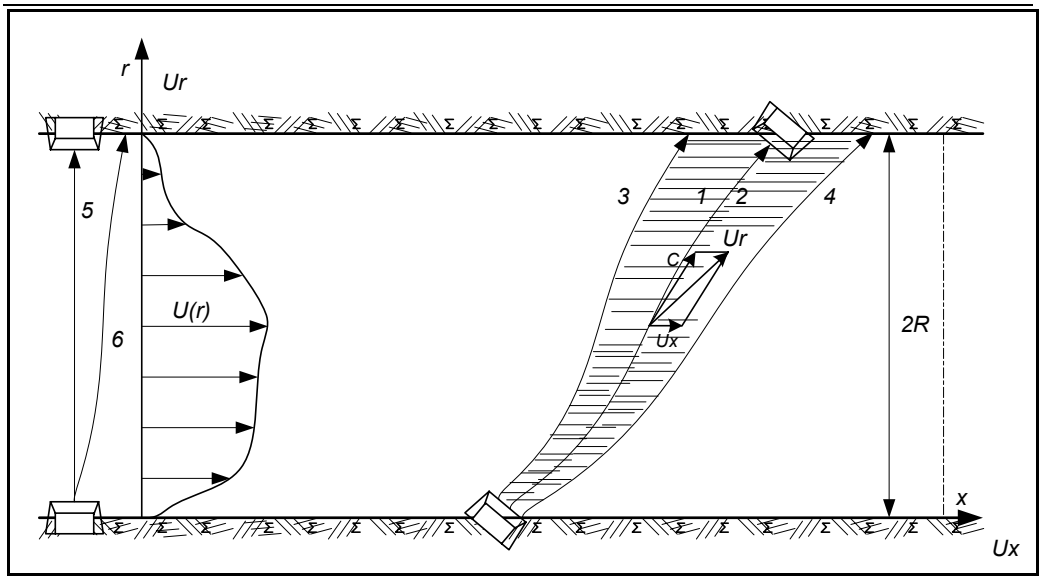


Рис. 2. К расчету траекторий акустических лучей в аэродинамическом поле горной выработки

Уравнения, описывающие интегральную анемометрию, могут быть представлены в общем виде

$$g = \Phi(L) \cdot \Psi(U_C, \cos\alpha, t_3, c, f)$$

где g – измеряемой схемой параметр (время, частота, фаза); Φ, Ψ - аналитические функции, L – прозвучиваемая база.

Траектория передачи акустических колебаний от излучателя к приемнику в случае покоящейся среды представляет собой расходящийся пучок лучей, поэтому здесь определение L не представляет трудностей – величина эта есть длина луча, соединяющего преобразователи, т.е. расстояние между ними. В движущемся потоке картина иная вследствие существования поля скоростей, вид которого определяет режим потока. Здесь может быть два класса задач: первая соответствует ламинарному режиму, второй – турбулентному, соответственно числу Рейнольдса *Re*.

На рис. 2 схематически показано расположение излучателя, приемника, а также траектории акустического луча в отсутствии потока (1 и 5) и движущемся (2, 3, 4, 6) потоке. Кинематика движения материальной точки, попадающей в зону действия источника акустических колебаний, определяется двумя силами – давлением в движущемся потоке воздуха и силой избыточного давления в акустической волне. Рассмотрим скорость движения материальной точки в поле двух названных сил. Проекциями этой скорости на оси координат, показанные на рисунке, будут соответственно:

$$U_r = \frac{dr}{dt}; \quad U_X = \frac{dx}{dt},$$

где r и x – координаты рассматриваемой точки.

Отсюда

$$r = \int_{t(r_0)}^{t(r_k)} U_r \cdot dt \qquad (7)$$

$$x = \int_{t(x_0)}^{t(x_k)} U_x \cdot dt$$

где $t(r_0)$, $t(x_0)$, $t(r_к)$, $t(x_к)$ – моменты времени, соответствующие прохождению точек r_0, x_0 и $r_к$, $x_к$ соответственно.

Для простоты сначала рассмотрим случай, когда движение ламинарное, а луч акустических колебаний направлен перпендикулярно оси выработки. В этом случае эпюра скоростей может быть представлена в виде

$$U_x = U_m - U_m (r-R)^2 \cdot R^{-2}$$

где U_m - скорость на оси выработки; R – половина ширины выработки (для трубы – радиус).

Исходные уравнения для составляющих скорости будут иметь вид

$$U_r = c;\ U_x = U_m - U_m (r-R)^2 \cdot R^{-2} \qquad (8)$$

Из (7) и (8) получаем

$$dr = c \cdot dt;\ dx = U_m \left[1-(r-R)^2 R^{-2}\right] dt$$

Далее, избавляясь от параметра t, будем иметь уравнение в дифференциалах

$$dx = U_m \cdot c^{-1} \left[2rR - r^2\right] dr$$

Интегрирование последнего дифференциального уравнения дает результат

$$x = U_m \cdot c^{-1} (r^2 R - \frac{r^3}{3})$$

Найдем точки экстремумов и точки перегиба этой кривой.

$x' = 2r \cdot R - r^2 = 0 \Rightarrow$ $r=0$, $r=2R$ – экстремумы,

$x'' = 2R - 2r = 0 \Rightarrow r=R$ – точка перегиба.

Кривая 6 на рис. 2 соответствует полученному уравнению.

Рассмотрим более общий случай: акустические колебания излучаются под углом к оси выработки, поток – ламинарный. В этом случае исходные уравнения имеют вид

$$U_r = c \cdot \sin\alpha\ , \qquad (9)$$

$$U_x = U_m \left[1-(r-R)^2 \cdot R^{-2}\right] + c \cdot \cos\alpha\ .$$

Из (7) и (9) получаем уравнения в дифференциалах:

$$dr = c \cdot \sin\alpha \cdot dt; dx =$$
$$= \left\{U_m \left[1(r-R)^2 \cdot R^{-2}\right] + c \cdot \cos\alpha\right\} dt$$

Избавляясь от параметра t, получаем дифференциальное уравнение

$$dx = c^{-1} \left\{U_m \left[1-(r-R)^2 \cdot R^{-2}\right] + ctg\,\alpha\right\} dr\ .$$

Интегрирование этого уравнения дает результат

$$x = U_m (c \cdot \sin\alpha)^{-1} \left[\frac{r^2}{R} - \frac{r^3}{3} R^2\right] + ctg\alpha \cdot r\ . \qquad (10)$$

Проанализируем полученное уравнение (кривые 2, 3, 4) траекторий акустического луча. Угол α задает угол входа луча в аэродинамическое поле.

Найдем точки экстремумов траекторий, продифференцировав (10) по r.

$$x' = U_m (c \cdot \sin\alpha)^{-1} (\frac{2r}{R} - \frac{r^2}{R^2}) + ctg\alpha = 0$$

Отсюда получаем квадратное уравнение для точек экстремумов

$$r^2 - 2r \cdot R - R^2 \cdot c \cdot \frac{\cos\alpha}{U_m} = 0$$

с корнями

$$r_{1/2} = R\left[1 \pm (1 + c \cdot \frac{\cos\alpha}{U_m})^{1/2}\right];$$

Следовательно, экстремумы кривых (2.4) лежат вне области (0, $2R$), иначе говоря, касательная к траектории движения акустического луча ни в одной точке воздуховода не принимает горизонтального положения. (Это естественно – ведь излучение осуществляется под углом к оси выработки).

Найдем точки перегиба у полученной траектории:

$$x'' = U_m (R^2 \cdot c \cdot \sin\alpha)^{-1})(2R - 2r) = 0\ ,$$

$r = R$ – точка перегиба.

Как и следовало ожидать, точка перегиба траектории находится на оси выработки.

Теперь подвергнем исследованию взаимодействие акустического луча с турбулентным потоком. Эпюра скоростей, как известно, в этом случае задается выражением

$$U_x = U_m(1-\frac{r}{R})^{1/n}$$

где r – расстояние, которое отсчитывается от оси выработки, т.е.

$U_x(0) = U_m; \qquad U_x(R) = 0$,

n – показатель зависящий от числа Re:
при $Re = 4\cdot10^3$ $n = 6$; при $Re = 2\cdot10^6$ $n = 10$.

Представим эпюру турбулентного режима в виде

$$U_x = U_m - U_m(1-\frac{r}{R})^{1/n},$$

$$0 \le r < R; U_x = U_m,\ r = R$$

Рассмотрим область изменения $0<r<R$ и симметрично продолжим решение на область $R<r<2R$.

С учетом (7) можно записать параметрические уравнения текущих координат точек траектории акустического луча:

$$r = \int_{t(r_0)}^{t(r_k)} U_r \cdot dt = \int_{t(r_0)}^{t(r_k)} c \cdot dt \cdot \sin\alpha$$

$$x = \int_{t(x_0)}^{t(x_k)} U_x \cdot dt =$$

$$= \int_{t(x_0)}^{t(x_k)} \left\{ \left[U_m - U_m(1-\frac{r}{R})^{1/n} \right] + c \cdot \cos\alpha \right\} dt$$

Интегрирование этих уравнений приводит к результату

$$r = ct\sin n\alpha + const\ ,$$

$$x = \left[U_m - U_m(1-\frac{r}{R})^{1/n} \right] \cdot t + ct\cos\alpha + const\ .$$

Избавляясь от параметра и переходя к явному заданию функции, получим

$$x = U_m r(c\cdot\sin\alpha)^{-1}\left[1-\left(1-\frac{r}{R}\right)^{1/n}\right] + rctg\alpha\ .$$

На рис. 2. в центре показано, как образуется результирующий вектор U_R, характеризующий скорость в каждой точке траектории.

Полученные уравнения траекторий акустического пучка в аэродинамическом поле ламинарного и турбулентного потоков позволяют устранить погрешность измерений и вычислений, предполагающих названные траектории прямыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шкундин С.З., Кремлева О.А., Румянцева В.А.* Теория акустической анемометрии. – М.: Академии горных наук, 2001.
2. *Берикашвили В.Ш.* Импульсная техника. – М.: Центр «Академия», 2004.

Коротко об авторах

Шкундин С.З., Стучилин В.В. – кафедра «Электротехника и информационные системы», Московский государственный горный университет.

© С.И. Буянов, В.А. Румянцева, 2006

УДК 534:622.002.5

С.И. Буянов, В.А. Румянцева

ПУТИ КОМПЕНСАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО АНЕМОМЕТРА, СВЯЗАННОЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ СОСТАВА КОНТРОЛИРУЕМОГО ПОТОКА

Семинар № 22

Рассматриваются проблемы исключения влияния существенного изменения скорости звука на показания акустического анемометра. Предлагаются два метода измерения скорости звука: по амплитудочастотной характеристике анемометрического канала и по началу отклика на одиночный импульс. Получены теоретические и экспериментальные зависимости амплитуды давления на приемном преобразователе от частоты, а также временные зависимости сигнала на приемном преобразователе при подаче на излучающий преобразователь одиночного импульса. Приводятся результаты экспериментов по работе анемометрического канала в газовоздушной среде, содержащей ксенон.

Фазовый акустический метод

Лаборатория рудничной аэрологии МГГУ занимается развитием акустического направления шахтной анемометрии. В ней был разработан акустический метод, позволяющий с высокой точностью измерять скорость воздушного потока, а также расход газа через сечение цилиндрического воздуховода.

Акустический способ анемометрии имеет ряд преимуществ перед другими методами, таких как точность, безынерционность, надежность и т. д. Основной проблемой акустической анемометрии является зависимость показаний прибора от изменяющихся параметров потока, таких как температура, влажность, газовый состав.

С использованием фазового акустического метода [1] был разработан портативный акустический анемометр, который сейчас используется на некоторых отечественных шахтах. В общих чертах фазовый акустический метод заключается в следующем (рис. 1): два электроакустических преобразователя являются попеременно приемником и излучателем акустической волны и располагаются в потоке, тогда разность фаз сигналов, распространяющихся по и против потока будет пропорциональна скорости потока.

$$\varphi_2 - \varphi_1 \approx \frac{2\omega l V}{c^2}, \quad (1)$$

здесь ω – угловая частота акустических колебаний, l – расстояние между преобразователями, V – скорость воздушного потока, c – скорость звука, как характеристика среды.

Однако из формулы (1) видно, что разность фаз зависит как от скорости потока, так и от скорости звука. Эта проблема обычно решается следующим образом: измеряется разность и сумма фаз сигналов, распространяющихся по и против потока (или разность и сумма времен прихода одной и той же фазы, что одно и то же).

$$\varphi_2 + \varphi_1 \approx \frac{2\omega l}{c} \quad (2)$$

Таким образом, из этих двух выражений (1) и (2) вычисляется и скорость потока и скорость звука.

Эти выражения мы приводим для, волн, распространяющихся в открытом пространстве. Датчик акустического ане-

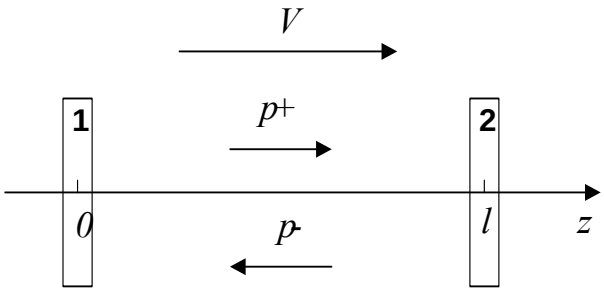


Рис. 1. К пояснению фазового способа измерения скорости потока: *1, 2* – преобразователи акустических колебаний. Волна акустического давления p+ от излучателя 1 приходит на приемник 2 с фазой φ_1, распространяется по потоку V; p- от излучателя 2 приходит на приемник 1 с фазой φ_2, распространяется про-тив потока V

мометра представляет собой цилиндрический волновод-воздуховод (рис. 2), а акустическая волна представляет собой сумму гармонических составляющих – нормальных мод.

В нашей лаборатории был разработан импульсный метод, основанный на том, что акустический сигнал подается в виде радиоимпульсов [2]. В этом случае, каждая нормальная мода, распространяющаяся со своей фазовой и групповой скоростью, будет приходить на приемный преобразователь в свои интервалы времени, что дает возможность работать с каждой модой в отдельности.

Формулы (3) (4) представляют собой обобщение формул (1) и (2) на случай произвольной рабочей моды. Таким образом, мы получаем возможность, измерять скорость газовоздушного потока фазовым акустическим методом, исключив при этом влияние изменения параметров среды: температуры, влажности, газового состава [3].

$$\varphi_2 - \varphi_1 \approx \frac{2\omega l V}{c^2} \qquad (3)$$

$$\varphi_2 + \varphi_1 \approx \frac{2l}{1-\frac{V^2}{c^2}}\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}-\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)\frac{\mu_n^{\,2}}{a^2}}+2\pi k \qquad (4)$$

здесь μ_n корни функции Бесселя первого порядка первого рода, k – некоторое целое число.

Вследствие того, что данный метод представляет наиболее надежным и перспективным, мы продолжаем его разработку и рассматриваем возможность его применения для других приборов и сфер деятельности.

Постановка задачи

Был разработан стационарный анемометр, работающий в системе безопасности шахты в Смоленске. Еще одно направление развития: медицина. Нами разрабатываются акустический спирометр и спироанализатор, позволяющий диагностировать заболевание силикозом шахтеров на ранней стадии, а также аппарат искусственной вентиляции легких. Датчики всех этих приборов представляют собой такие же волноводы-воздуховоды, как и у акустического анемометра. Однако если при измерении скорости воздушного потока скорость звука менялась незначительно, то при изменении скоростей потоков газов, существенно отличающихся

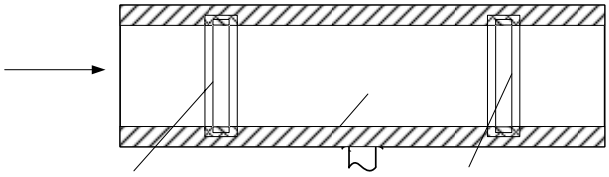


Рис. 2. Анемометрический канал: *1, 2* – кольцевые преобразователи, *3* – цилиндрический волновод воздуховод

от воздуха могут возникнуть проблемы.

Целью настоящего исследования является оценка границ области применимости данного фазового-импульсного метода и разработка алгоритмов, позволяющих измерить скорость потока и звука и в том случае, когда мы вышли за границы области применимости. Под границами применимости будем при-нимать диапазон скоростей звука, при котором данный метод работает без изменения каких-либо параметров.

Рассмотрим формулы (5) и (6). Они представляют собой уравнения (3) и (4) приближенно решенные относительно c и V.

$$V = \frac{\alpha\omega}{\frac{(\gamma - x)^2}{2l} + 2l\frac{\mu_n^2}{a^2}}$$

(5)

$$c = \sqrt{\frac{\omega^2}{\frac{(\gamma - x)^2}{4l^2} + \frac{\mu_n^2}{a^2}}}$$

(6)

Здесь используются обозначения: γ – сумма фаз, α – разность фаз сигнала на преобразователях. Величина x в выражении (6) по сути, является подгоночным параметром. Теоретически она равна $2\pi k$, где k – некоторое целое число, фиксирующее, какой именно период мы рассматриваем. На практике периоды синусоиды неразличимы, и мы не можем его определить алгоритмически. Кроме того, к фазам акустического сигнала добавляется некоторых фазовый сдвиг пьезопреобразователей. Поэтому параметр x подбирается эмпирически. При нормальных условиях мы полагаем скорость звука известной и, исходя из этого, вычисляем значение этого параметра, которое впоследствии хранится в памяти прибора. Однако при таком измени скорости звука, при котором время прихода выделенной нами фазы изменится более чем на период должно измениться и значение параметра x, поскольку изменится число k. Не говоря уж о том, что могут появиться новые моды и для успешного применения формул (5) и (6) нужно будет поменять рабочую точку - время начала отсчета импульсов и, возможно, рабочую моду.

Для того чтобы прибор автоматически выбирал параметры режима измерения – рабочую точку и номер рабочей моды, необходимо, чтобы было известно значение скорости звука.

Действующий метод позволяет нам лишь отслеживать и исключать изменения скорости звука при каждом измерении. Для определения значения скорости звука нужно ввести дополнительный алгоритм. Поиск такого алгоритма и есть тема настоящего исследования и нам хотелось бы поделиться результатами некоторых изысканий, проведенных в этом направлении.

Исследование ВАХ анемометрического канала

Известно, что акустическая волна, распространяясь в цилиндрическом волноводе-воздуховоде с жесткими стенками, представляет собой бесконечную сумму нормальных мод – гармонических колебаний. Причем конечное число мод распространяется, а бесконечное число мод экспоненциально затухает вблизи источника. Количество распространяющихся мод определяется соотношением частоты колебаний, радиуса волновода и скорости звука. Условие распространения моды с номером n следующее:

$$\frac{\omega^2}{c^2} - \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)\frac{\mu_n^2}{a^2} \geq 0 \qquad (7)$$

В соответствии с моделью распространения синусоидальной акустической волны в цилиндрическом бесконечном волноводе акустическое давление (в комплексной форме) на приемный преобразователь (рис. 2) можно вычислить по формуле [4]:

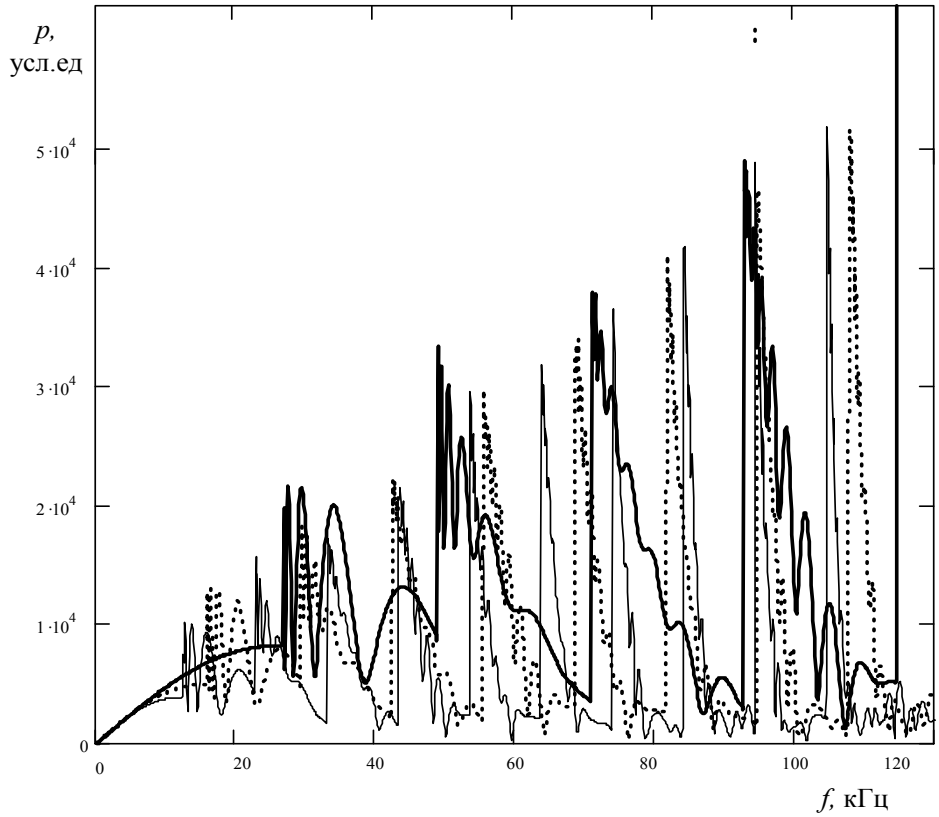


Рис. 3. Амплитудочастотная характеристика анемометрического канала. Сплошная толстая линия соответствует скорости звука* с *= 343 м/с, пунктирная линия* с *= 206 м/с, сплошная тонкая линия* с *= 161 м/с.

$$p(t,z)=\sum_{n=0}^{N}\frac{v_0\rho\left(\omega+s_n^+V\right)\sin^2\left(s_n^+\frac{h}{2}\right)e^{i\left(s_n^+z+\omega t\right)}}{a\cdot s_n^+\cdot\frac{h}{2}\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}-\left(1-\frac{V^2}{c^2}\right)\frac{\mu_n^2}{a^2}}}, \qquad (8)$$

где $s_n^+=\dfrac{\dfrac{\omega V}{c^2}-\sqrt{\dfrac{\omega^2}{c^2}-\left(1-\dfrac{V^2}{c^2}\right)\dfrac{\mu_n^2}{a^2}}}{\left(1-\dfrac{V^2}{c^2}\right)}$,

$n = 0,1..N$

– номер моды, N - количество распространяющихся мод, v_0 – колебательная скорость излучателя, ρ плотность воздуха.

Вычисляя зависимость амплитуды давления (модуля функции $p(t,l)$) от частоты можно построить график, представляющий собой АЧХ анемометрического канала. Построим графики АЧХ в диапазоне частот до 120 кГц. при различных значениях скорости звука (рис. 3).

В соответствии с (7), чем выше частота, тем больше мод может распространяться в канале анемометра. При той частоте, при которой неравенство (7) обращается в равенство, АЧХ имеет пик – локальный максимум. Происходит явление, отдаленно напоминающее явление резо-

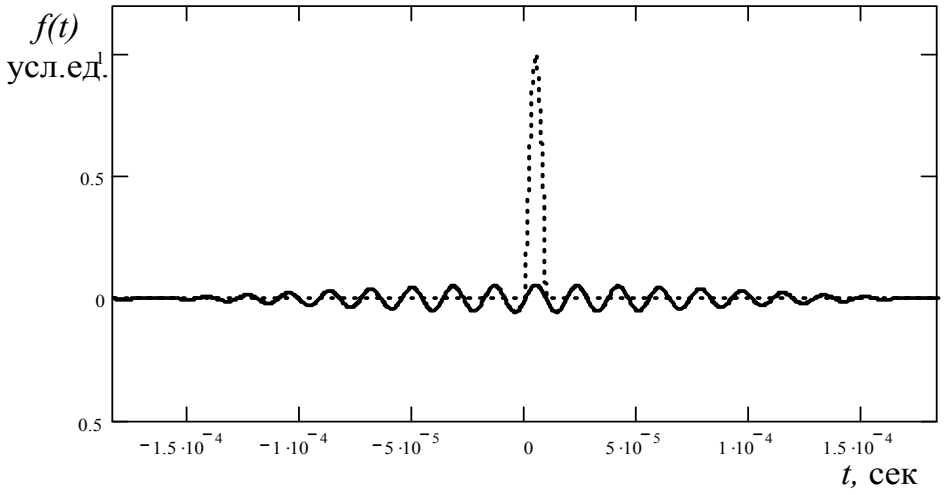


Рис. 4. Сигнал на входе (пунктирная линия) и выходе (сплошная линия) излучающего преобразователя

нанса. Знаменатель в выражении (8) становится равным 0. Вычислить значение давления при этих частотах можно, только учитывая диссипативные процессы, которые в модели, при помощи которой была получена формула (8) не учитываются. Однако, во всех других точках (значениях частоты) модель работает и мы можем проанализировать данную АЧХ. В зависимости от скорости звука пики, соответствующие частотам исчезновения нормальных мод будут смещаться вдоль оси частот, и расстояние между пиками будет изменяться. На рис. 3 показана АЧХ для трех скоростей звука, соответствующих воздуху, ксенону и пятидесятипроцентной концентрации ксенона в воздухе.

По графику можно предложить алгоритм определения скорости звука, например, по расстоянию между первым и вторым локальным максимумом $(\omega_2 - \omega_1)$, которое из теоретической формулы (7), в которой рассматривается случай равенства, должно быть равно

$$c = \frac{(\omega_2 - \omega_1)a}{(\mu_2 - \mu_1)}. \qquad (9)$$

При автоматическом исследовании АЧХ могут возникнуть проблемы из-за пиков, связанных с резонансами пьезоэлектрических преобразователей. Некоторые пики могут не проявиться из-за того, что их ширина меньше дискретности, с которой задается частота. Короче говоря, этот метод требует дальнейших экспериментальных исследований, начало которых будет рассмотрено далее.

Определение скорости звука импульсным методом

Идея определения скорости звука импульсным методом довольно проста. Время распространения акустического импульса в открытом пространстве равно:

$$t_{распр} = \frac{l}{c}. \qquad (10)$$

При распространении импульса в волноводе происходит, так называемая, волноводная дисперсия. Каждая гармоника, составляющая импульс при разложении его в ряд Фурье, распространяется со своей групповой и фазовой скоростью. Кроме того, нельзя забывать про модовое распространение. При прохождении канала сигнал разделится на моды. Необходимо еще учитывать резонансные свойства преобразователей.

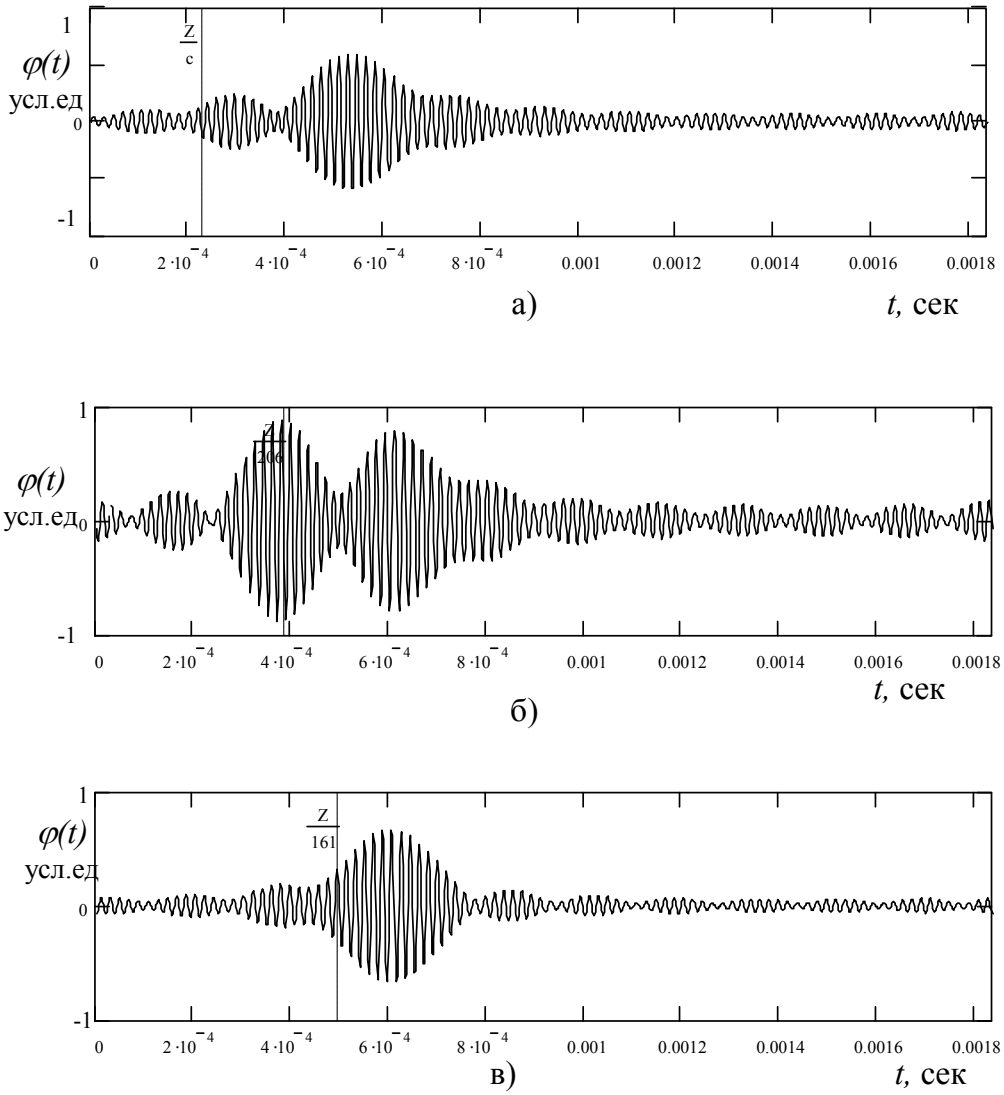


Рис. 5. Временная зависимость акустического потенциала на приемном преобразователе

Спектр кольца узкополосный, он вырежет из спектра импульса полосу, что приведет к тому, что излучаемый сигнал «расплывется» во времени, то есть будет содержать не одно, а несколько колебаний (рис. 4).

При изменении скорости звука изменяется количество распространяющихся мод, а также соотношение фазовых и групповых скоростей различных мод. Поэтому с изменением скорости звука принимаемый сигнал, имеющий довольно сложную форму, не только сдвигается во времени, но и меняет свою форму, что не позволяет нам оценить скорость звука по максимуму огибающей.

Оценка скорости звука может проводиться по первому вступлению. Быстрее всех мод распространяется нулевая мода. Ее фазовая и групповая ско-

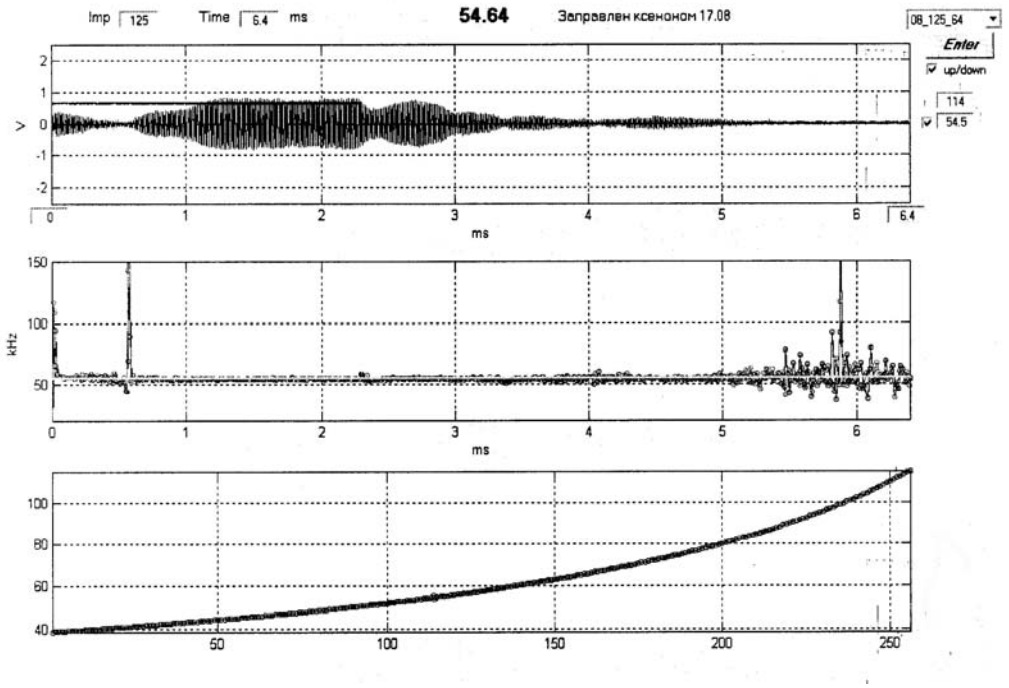


Рис. 6. Интерфейс программы обработки экспериментальных данных. На верхнем графике показана осциллограмма принимаемого сигнала и огибающая сигнала на входе излучателя. На среднем графике показана зависимость частоты от времени, определяющаяся по периоду принимаемого сигнала. На третьем графике показаны частоты, для которых проводились измерения, и выделяется та частота, для которой строятся текущие графики. В соответствующих окошечках показаны: количество импульсов в пачке, временные границы построения осциллограммы, название директории с данными, номер текущего файла, частота излучения, соответствующая текущему файлу

рости равны скорости звука по первому вступлению. Однако амплитуда нулевой моды может быть мала по сравнению с остальными модами, она может быть сравнима с шумами, на нее могут наслаиваться «хвосты» резонирующих мод, не успевшие затухнуть в течение периода повторения импульса.

Построим, пользуясь моделью импульсного распространения акустических волн в анемометрическом канале [2], временную зависимость сигнала на приемном преобразователе при излучении одиночного импульса. При моделировании использовалось преобразование Фурье.

Поле акустического потенциала в анемометрическом канале будет вычисляться по формуле:

$$\Phi_+(r,z,t) = \\ = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C(n) \sum_{m=0}^{\infty} 2v_0 i \frac{\sin(s_{+m}^n h) \cdot \exp(i\omega_0 nt - is_{+m}^n z)}{a \cdot s_{+m}^n \cdot \sigma_m^n}, \quad (11)$$

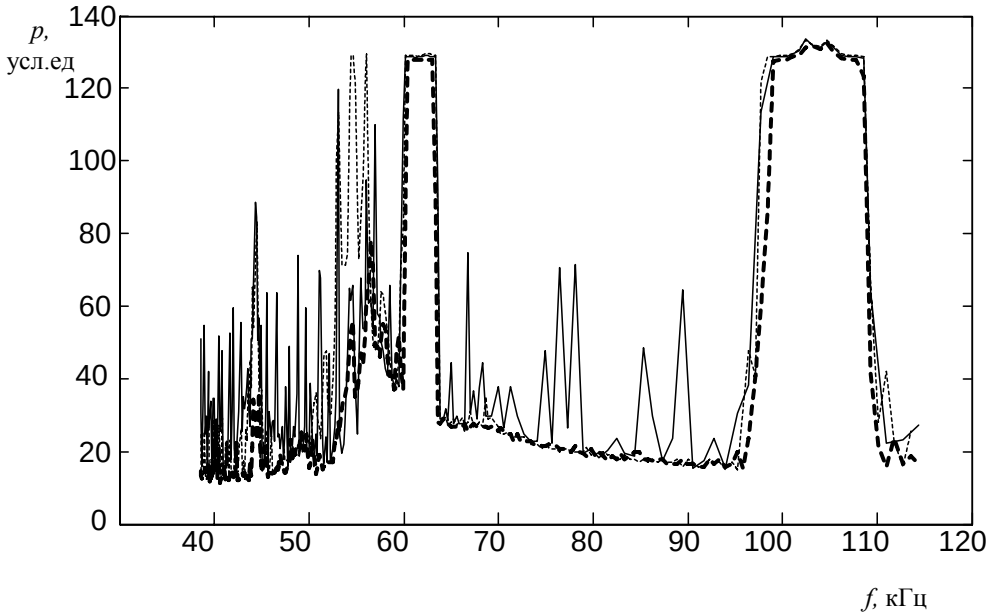


Рис. 7. Амплитудочастотная характеристика анемометрического канала, построенная по экспериментальным данным. Сплошная толстая линия соответствует воздуху, сплошная тонкая линия – ксенону, пунктирная линия – смеси воздуха и ксенона

$$s_{\pm m}^{n} = \frac{-\frac{\omega_0 n}{c} M \pm \sigma_m^n}{\beta^2};$$

$$\sigma_m^n = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{\omega_0 n}{c}\right)^2 - \beta^2 \left(\frac{\mu_m}{a}\right)^2}, \\ \left(\frac{\omega_0 n}{c}\right) > \beta \left(\frac{\mu_m}{a}\right) \\ -i \cdot \sqrt{\beta^2 \left(\frac{\mu_m}{a}\right)^2 - \left(\frac{\omega_0 n}{c}\right)^2}, \\ \left(\frac{\omega_0 n}{c}\right) < \beta \left(\frac{\mu_m}{a}\right) \end{cases}$$

$$C(n) = \frac{1}{iT(\omega - n\omega_0)} \left[\exp(i(\omega - \omega_0)\tau) - 1\right];$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad \beta^2 = \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right).$$

В данной формуле (11) теоретически должна быть бесконечная сумма, но мы учтем только те гармоники, которые попадают в полосу пропускания преобразователя. Если сигнал на входе излучающего преобразователя (рис 4) – одиночный импульс (пунктирная линия), то на выходе получается картина (рис. 4, сплошная линия) радиоимпульс, содержащий 12-14 периодов. Это соответствует тому, что кольцо под воздействием импульса начинает раскачиваться, а потом затухает. В соответствии с формулой (11) построим графики временной зависимости акустического потенциала на приемном преобразователе (рис. 5) при разных скоростях звука. На этих графиках указаны пунктиром моменты времени $t_{\text{распр}}$.

Экспериментальные исследования работы анемометрического канала при разных скоростях скорости звука

Поставленный эксперимент заключался в следующем. На один из преобразова-

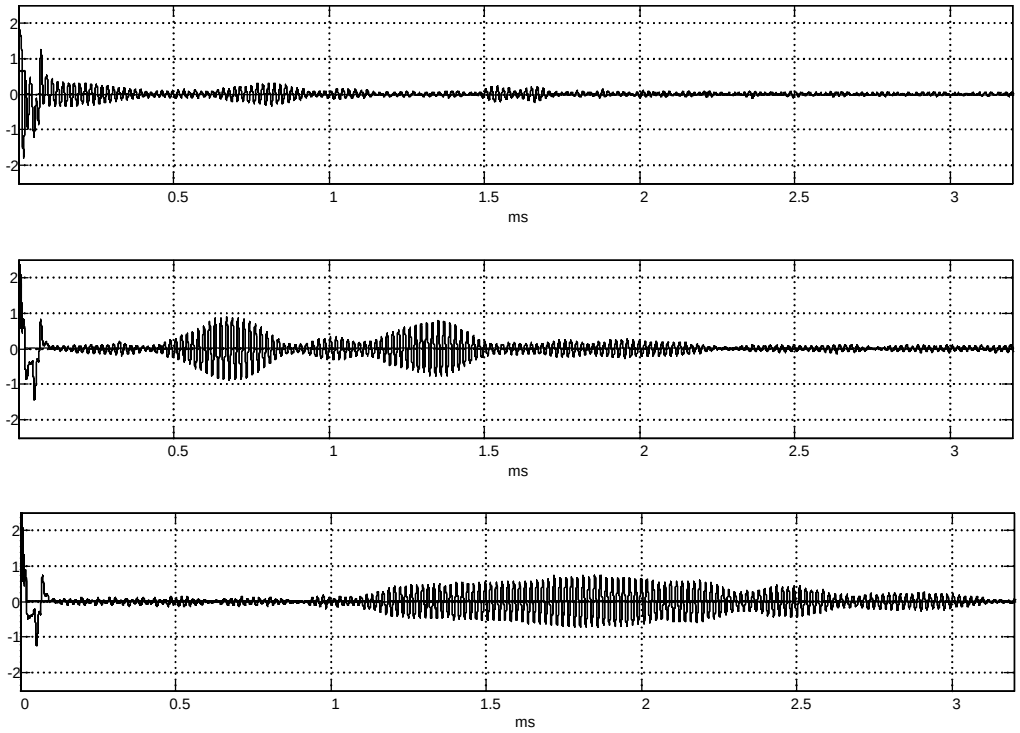


Рис. 8. Осциллограммы принимаемых сигналов, реакций на пачку из одного импульса при различных концентрациях ксенона в воздухе

телей подавалась пачка импульсов, с другого преобразователя при помощи цифрового осциллографа АСК-3151 снималась осциллограмма принимаемого сигнала. Менялось количество импульсов в пачке и частота заполнения. Измерения проводились в воздухе и ксеноне. Ксенон – газ, молекулярная масса которого сильно отличается от молекулярной массы воздуха, а следовательно, и скорость звука тоже.

Для того чтобы работать с ксеноном использовались резиновые баллоны, которые были наполнены ксеноном и с двух сторон присоединены к анемометрическому каналу. Воздух предварительно был удален из баллонов. Как оказалось впоследствии, резина не является материалом непроницаемым для ксенона. Поэтому с течением времени оказалось, что в баллонах уже смесь воздуха и ксенона. Концентрация ксенона в баллонах оценивалась очень.

приблизительно, по внешнему виду баллонов. Была написана программа в системе MATLAB, интерфейс которой показан на рис. 6. Программа обеспечивает доступ к многочисленным экспериментальным данным.

После обработки экспериментальных данных были получены зависимости, которые можно соотнести с теоретическими

На рис. 6 показана АЧХ. Поскольку обычно АЧХ снимаются при синусоидальном излучении, для их построения были выбраны осциллограммы для пачек, содержащих 125 импульсов, что достаточно точно имитирует непрерывное излучение. Сравнивая теоретические и экспериментальные зависимости можно заметить, что характер их совпадает. Судя по АЧХ, концентрация ксенона в воздухе не такая

большая, как предполагалась. Экспериментальные АЧХ, снятые таким образом, не позволяют определить по ним скорость звука. Возможно, для определения скорости звука подойдут АЧХ, снятые при непрерывном излучении и при непрерывном изменении частоты входного сигнала.

Для исследования реакции на одиночный импульс рассматривались осциллограммы, взятые при частоте приблизительно 54,5 кГц, что совпадает с резонансной частотой преобразователя. Мы видим (рис. 7), что общий вид осциллограмм соответствует теории. Исключение составляет осциллограмма (рис. 7, *а*). В этом случае принимаемый сигнал довольно слабый по сравнению с помехами: наводками от излучающего преобразователя, электрическими или акустическими, распространяющимися по корпусу.

Отследить первое вступление по экспериментальным данным представляется сложной задачей. Даже по теоретической кривой время первого вступления далеко не просто вычислить. В реальной осциллограмме добавляются еще отражения от торцов и окружающих объектов. Получается, что определить время первого вступления при наличии таких помех представляется проблематичным. Тем не менее, общая тенденция ясна, как на теоретических, так и на экспериментальных графиках. С уменьшением скорости звука огибающая сдвигается во времени. Чтобы дать количественную оценку этого явления необходимо проведение дальнейших исследований.

Заключение

Были проведены исследования с целью обоснования возможности непосредственного измерения скорости звука при помощи амплитудочастотной характеристики и импульсным методом. Полученные результаты не опровергли такую возможность, однако для практического использования этих методов необходимы дальнейшие, как теоретические, так и экспериментальные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шкундин С.З. Лашин В.Б.* Фазовый способ акустической анемометрии. Метрология. 1990. №7. – С. 39-43.
2. *Шкундин С.З., Буянов С.И., Румянцева В.А.* Исследование распространения акустического импульса в цилиндрическом волноводе с движущимся воздушным потоком. – М: Наукоёмкие технологии, №1, 2002
3. *Шкундин С.З., Буянов С.И., Румянцева В.А.* Оценка влияния состава контролируемого потока на погрешность акустического анемометра.// Горный информативно-анали-тический бюллетень. – М.: МГГУ, №10, 2000. – С. 181-182.
4. *Шкундин С.З., Кремлева О.А., Румянцева В.А.* Теория акустической анемометрии. – М.: Академия горных наук, 2001.

Коротко об авторах

Буянов С.И. Румянцева В.А. – кафедра «Электротехника и информационные системы», Московский государственный горный университет.