

УДК 53.082.4

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ДЛИНЫ, ДИАМЕТРА И СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ТРУБ

© 2018 С.А. Борминский

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Статья поступила в редакцию 14.11.2018

Статья посвящена вопросам разработки теоретического обоснования и практической реализации акустического метода контроля геометрических параметров труб, как основного объекта трубопроводного транспорта, применяемых в системах производства, транспорта и потребления тепловой энергии. Метод основывается на математической обработке отраженного от открытого конца трубы акустического сигнала и позволяет получать информацию одновременно о длине, диаметре трубы с контролем качества внутренней полости. Предложенный в статье алгоритм измерения диаметра расширяет функциональные возможности измерительной аппаратуры и позволяет автоматически рассчитать сдвиг фазы акустического сигнала при отражении от открытого конца трубы, таким образом, полностью автоматизируется процесс измерения длины труб произвольного диаметра. Экспериментальные исследования, проведенные с использованием разработанного алгоритма, показали, что относительная погрешность измерения длины на трубах длиной 3 м составила не более 0.15%, погрешность измерения диаметра трубы равного 110мм составила не более 7%.

Ключевые слова: акустический импульс, труба, диаметр, длина.

Важную часть в системах производства, транспорта и потребления тепловой энергии занимают трубопроводы. К трубам как основному объекту трубопроводного транспорта предъявляются жесткие требования по качеству материала изготовления, технологии производства, прочности, качеству покрытия, а также их геометрическим размерам: длине, диаметру, толщине стенки и т.д. Для организации выходного контроля и складского учета труб на всех этапах их логистического пути от производственного стана до монтажной площадки необходим метод измерения, способный оперативно оценивать их длину и диаметр в условиях ограниченного доступа к ним. Учитывая широкий спектр применяемых труб для теплоэнергетических систем и трубопроводов, такой метод измерения должен обладать инвариантностью к материалу изготовления контролируемых объектов. Данная статья предлагает акустический метод совокупного измерения длины и диаметра открытой с концов трубы, при этом доступ для измерения прибором осуществляются только с одной стороны, что позволяет измерять трубы разной длины при хранении в штабеле.

В настоящее время существуют разнообразные методы контроля длины труб, которые можно разделить на несколько групп:

1. Механические. Для работы приборов используются контактные датчики, при этом в большинстве случаев для измерения необходимо перемещать трубу с помощью специальных

Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, старший научный сотрудник. E-mail: b80@mail.ru

роликов. Данный метод удобен на производствах, где уже существуют системы подачи и перекачивания труб.

2. Оптические. Данные методы обычно используют оптические датчики положения концов трубы при равномерном движении трубы с помощью специального привода. Существуют также методы, позволяющие проводить измерения одновременно до 50 труб при условии их расположения на раскаточном столе в один слой в поле захвата фотокамеры. Другой вариант – использование лазерного дальномера, однако, данный метод также предполагает расположение труб в один слой.

3. Акустические. Данные методы контроля используют внутреннюю полость трубы для распространения акустической волны. Важной особенностью метода является возможность отражения акустической волны от противоположного открытого конца трубы, что позволяет создавать приборы, использующие доступ к трубе только с одного конца.

В большинстве случаев при хранении и транспортировке трубы укладываются в штабель, при этом концы труб не выравниваются относительно друг друга. При необходимости контролировать длину при использовании большинства методов трубы необходимо расположить в один слой и обеспечить доступ к ним с двух сторон. Данная операция требует дополнительного времени, техники и места.

Преимущества акустического метода измерения длины труб хорошо известны [1-7,14-16]: в первую очередь, возможность измерения при доступе датчика с одного конца трубы, а также

возможность измерения изогнутых или свёрнутых в рулон гибких труб, а также простота технической реализации устройства. Кроме того, на измерения не влияет материал трубы. Данные преимущества позволяют организовать учёт труб, расположенных в штабеле без его переукладывания, а также обеспечить контроль изогнутых и свёрнутых в рулон труб или гибких шлангов.

К недостаткам метода относится значительная зависимость скорости распространения звука от внешних параметров среды, в частности от температуры воздуха, что даёт погрешность измерений не менее 5% в диапазоне температур от минус 20 до плюс 40° С. Другой недостаток акустического метода - зависимость фазы отражённого сигнала от диаметра при отражении от открытого конца трубы.

Для компенсации влияния скорости звука существует несколько методов [14,15], которые основаны на измерении температуры воздуха или измерения реальной скорости звука на небольшом участке волновода, расположенного, как правило, внутри прибора. В условиях реальной эксплуатации по данным проведённых экспериментов это даёт возможность снизить относительную погрешность измерения до 0,5-1%. Другой способ компенсации - калибровка в текущих климатических условиях по эталонной трубе перед началом измерений позволяет получить относительную погрешность измерений не более 0,2%.

Если проблема влияния скорости звука на результаты измерений в настоящее время хорошо изучена, то проблема влияния фазы отражения от открытого конца для измерения параметров труб глубоко не исследовалась - применялись только различные методы компенсации. Погрешность измерения возникает из-за сдвига фазы отражённого сигнала от открытого конца в зависимости от диаметра трубы и частоты излучаемого импульса. Существующие методы [16] основаны на калибровке фазы отражения для каждого диаметра трубы в отдельности, что приводит к необходимости оператору выбирать перед измерениями диаметр трубы. Дополнительные настройки прибора усложняют рабочий процесс и могут привести к субъективным погрешностям. Таким образом, для уменьшения погрешности измерения длины и расширения функциональных возможностей приборов ставится задача измерения диаметра контролируемых труб.

В классических трудах по физической акустике [8-11] имеются формулы, описывающие изменения фазы отражённого от открытого конца трубы сигнала в зависимости от её диаметра и частоты волны. Однако, в виду математической сложности, данные формулы не при-

менимы в реальных приборах. Кроме того, при неизвестной длине трубы невозможно измерить фазу отражённого сигнала от открытого конца, поэтому измерение должно производиться на двух разных частотах. Для решения поставленной задачи необходимо получить функцию преобразования от параметров сигналов и разработать алгоритм работы.

В работах [8-11] приведены аналитические методы определения фазы отражённого сигнала. Для упрощения выражений введём безразмерный параметр χ , равный отношению периметра трубы к длине волны:

$$\chi = \frac{\pi D}{\lambda}, \quad (1)$$

где D - диаметр трубы;

λ - длина волны, излучаемой прибором.

Тогда фаза θ отражённого сигнала может быть найдена по формуле [11]:

$$\theta = \frac{2\chi}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\psi(\sqrt{\chi^2 + y^2})}{\chi^2 + y^2} dy, \quad (2)$$

где $\psi(x) = \arctg \frac{J_1(x)}{Y_1(x)}$, $0 \leq \psi(x) < \pi$ - волновая

функция, состоящая из функций Бесселя $J_1(x)$, $Y_1(x)$ первого и второго рода соответственно.

Сдвиг фазы увеличивает время распространения волны. Общее время распространения t_p по трубе до открытого конца трубы и обратно с учётом фазы составит:

$$t_p = \frac{2L}{c} + \frac{1}{f} \cdot \frac{\theta}{2\pi} = \frac{2L}{c} + \frac{2\chi \int_0^{\infty} \frac{\psi(\sqrt{\chi^2 + y^2})}{\chi^2 + y^2} dy}{2\pi^2 f}, \quad (3)$$

где L - длина измеряемой трубы;

f - частота волны, излучаемой прибором.

Формула (3) с учётом (1) может быть представлена в виде

$$t_p = \frac{2L + D}{c} \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\psi(\sqrt{\chi^2 + y^2})}{\chi^2 + y^2} dy. \quad (4)$$

Вычисление интеграла, входящего в выражение (4) возможно только численными методами и является трудоёмкой задачей. Для применения на практике целесообразно выделить для изучения следующую функцию:

$$g(\chi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\psi(\sqrt{\chi^2 + y^2})}{\chi^2 + y^2} dy. \quad (5)$$

На рисунке 1 жирной линией показан рассчитанный численными методами график функции (5). Пунктирной линией показана линейная аппроксимация с погрешностью, не превышающей 0.6% в диапазоне $0.3 < \chi < 3$.

Диапазон $0.3 < \chi < 3$ выбран с учётом применения реальных диаметров, частот излучения, а также затухания при отражении, которое будет рассмотрено далее. Линейная аппроксимация,

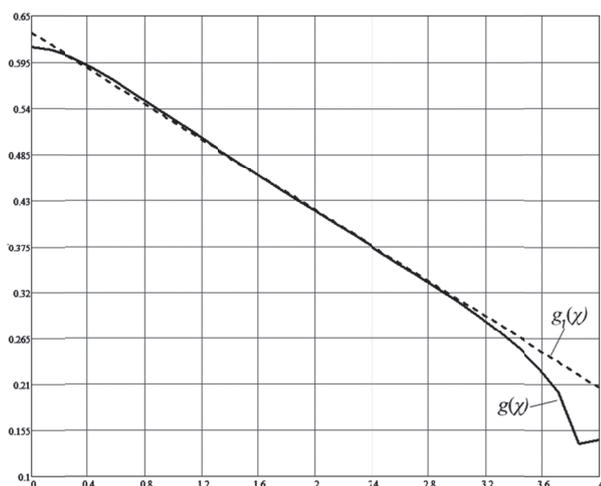


Рис. 1. Расчётные графики функции $g(\chi)$ и аппроксимация $g_1(\chi)$

представленная на графике 1, описывается выражением:

$$g_1(\chi) = -0.108\chi + 0.63. \quad (6)$$

В некоторых случаях может быть полезна более точная интерполяция (7), однако, применение данной формулы усложняет итоговые формулы и на практике не приводит к увеличению точности.

$$g_2(\chi) = -0.112\chi + 0.645 - \frac{1}{150\chi + 31}, \quad (7)$$

При подстановке (6) в (4) с использованием (1) получаем:

$$t_p = \frac{2L - 0.108 \frac{\pi D^2}{\lambda} + 0.63D}{c} = \frac{2L + 0.63D}{c} - \frac{0.108\pi D^2 f}{c^2}. \quad (8)$$

Если проводить измерение времени распространения звука на двух разных частотах, исходя из (8) можно получить:

$$\Delta t_p = t_{p2} - t_{p1} = \frac{0.108\pi D^2 (f_1 - f_2)}{c^2}, \quad (9)$$

Отсюда диаметр трубы может быть получен как:

$$D = \sqrt{\frac{(t_{p2} - t_{p1})c^2}{0.108\pi(f_1 - f_2)}}. \quad (10)$$

Длина трубы с учётом известного диаметра может быть получена из (8):

$$L = \frac{ct_{p1}}{2} - 0.315D + \frac{0.054\pi D^2 f_1}{c}. \quad (11)$$

Формулы (10)-(11) позволяют обеспечить измерение длины и диаметра в автоматическом режиме без ввода дополнительных данных.

Другим важным параметром, необходимым для исследования, является затухание зондирующего акустического сигнала, которое состоит из затухания при распространении звука по трубе и затухания при отражении от открытого конца трубы. Амплитуда акустической волны,

вернувшейся к прибору, может быть описана выражением:

$$A = A_0 e^{-2\alpha L} Ko(\chi), \quad (12)$$

где A_0 – амплитуда зондирующего импульса;

α – коэффициент затухания волны при распространении по трубе;

$Ko(\chi)$ – коэффициент отражения акустической волны от открытого конца трубы.

Затухание звука при распространении в условиях реальной эксплуатации труб является крайне непостоянным параметром. В чистых металлических трубах при длине 12 м и частотах 2–5 кГц величина $e^{-2\alpha L}$ может достигать значений вплоть до 0.95. При загрязнении трубы парафиновыми фракциями нефти данное значение может составлять 0.3 и менее. Кроме того, на затухание влияет материал трубы и его шероховатость. Сильное влияние вышеперечисленных факторов не позволяет контролировать длину труб методом измерения затухания, однако, при ранее измеренных параметрах D и L появляется возможность контроля загрязнения внутренней полости трубы, для чего в выражении (12) необходимо вычислить коэффициент отражения акустической волны от открытого конца трубы $Ko(\chi)$. Данный коэффициент может быть получен по формулам [11]:

$$Ko(\chi) = e^{M(\chi)}, \quad (13)$$

$$M(\chi) = \frac{-2\chi}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\psi(\sqrt{\chi^2 - y^2})}{\chi^2 - y^2} dy.$$

На рисунке 2 показан рассчитанный численными методами график $Ko(\chi)$. Данные на графике ограничены диапазоном $\chi < 3$, поскольку при значениях параметра $\chi > 3$ амплитуда отражённого сигнала мала, что усложняет фиксацию времени отражённого импульса и делает метод контроля слишком зависимым от шумов.

При использовании в реальных приборах для вычисления коэффициента отражения также может использоваться интерполяция, обеспечивающая в диапазоне $0.3 < \chi < 3$ погрешность не более 2%

$$Ko_1(\chi) = 0.035\chi^3 - 0.118\chi^2 - 0.246\chi + 1.02. \quad (14)$$

Полученные формулы позволяют разработать алгоритм функционирования прибора. Для переносных приборов с учётом различного ассортимента труб оптимально остановиться на измеряемых диаметрах до $D_{max} = 160$ мм.

Исходя из полученных закономерностей, сформулируем алгоритм проведения акустических измерений длины и диаметра трубы с контролем ее внутренней полости.

1. Изначально выбираются две частоты зондирующего импульса, $0.3 < \chi < 3$. Для максимального измеряемого диаметра $D_{max} = 160$ мм можно выбрать $f_1 = 2000$ Гц ($\chi_1 = 3.04$), $f_2 = 500$ Гц ($\chi_2 = 0.76$). Происходит излучение периода синусоиды с

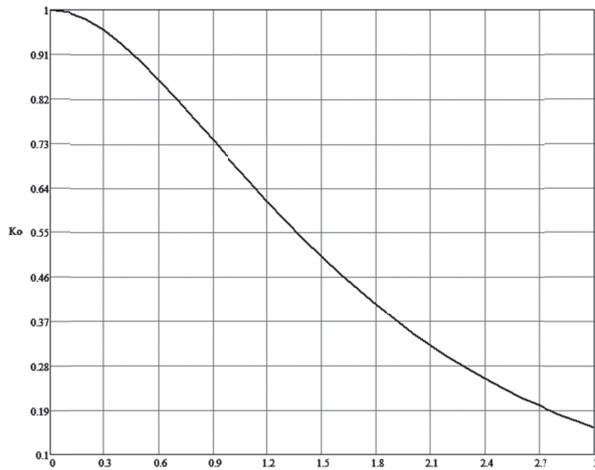


Рис. 2. График зависимости коэффициента отражения $Ko(\chi)$

частотой f_1 , затем прибор ожидает отражённый импульс, чтобы измерить его амплитуду и время распространения t_{p1} . Для определения начала импульса можно использовать методы, описанные в литературе [11]. После некоторой паузы, необходимой для затухания волны из-за многократного переотражения от концов трубы, происходит излучение на частоте f_2 и определение времени распространения t_{p2} .

2. По формуле (10) определяется диаметр трубы D . Метрологический анализ формулы показывает, что максимальная точность измерения диаметра обеспечивается при максимальной разнице частот f_1 и f_2 . Первое измерение диаметра с выбранными в предыдущем пункте частотами можно использовать как предварительное, чтобы затем выбрать f_1 таким образом, чтобы параметр χ_1 при предварительно измеренном диаметре стремился к трём, частота f_2 выбирается так, чтобы $0.3 < \chi_1 < 0.5$. На практике частоты f_1 и f_2 выбирались как несколько значений из таблицы, что облегчает формирование зондирующего сигнала с помощью микроконтроллера. Кроме того, в таблице отсутствуют все нежелательные частоты, например резонансные частоты акустической части прибора.

3. Аналогично п.1 происходит измерение диаметра трубы с новыми частотами f_1 и f_2 , затем по формуле (10) снова определяются более

точный диаметр D , используемый в дальнейших расчётах.

4. По (11) определяется длина трубы. Обычно имеет смысл брать для расчёта время распространения t_{p1} , так как при более высокой частоте обеспечивается меньшая погрешность определения фронта прихода импульса. В случае низкой амплитуды отражённого импульса лучше использовать t_{p2} , так как это обеспечивает лучшую помехозащищённость. Следует отметить, что (11) даёт основные преимущества по точности перед классической формулой ($L=ct/2$) на коротких трубах, при длине $L > 20$ м нестабильность скорости звука формирует погрешность, которая оказывается намного больше влияния эффектов отражения от открытого конца.

5. Определяется коэффициент затухания α из формулы (12), который показывает состояние акустического канала и является информацией о состоянии внутренней полости трубы. Для этого по (14) определяется Ko , а затем по известным A, A_0, L из выражения (12) определяется искомый коэффициент α . Для определения α на практике лучше использовать данные более низкой частоты f_2 , поскольку отражение от открытого конца на более низкой частоте будет иметь более высокую амплитуду.

С учётом разработанного алгоритма был проведён эксперимент, направленный на подтверждение эффективности предложенного метода. В качестве объекта исследования были выбраны три трубы диаметром 40, 65 и 110 мм и длиной 3 м. В качестве измерительной аппаратуры был выбран разработанный авторами данной статьи прибор для акустического измерения длины труб «Питон» (Сертификат РФ об утверждении типа средств измерений №29726). Общая структурная схема полученного экспериментального стенда приведена на рисунке 3.

Было создано программное обеспечение, позволяющее для дальнейшего анализа записывать принятый микрофоном акустический сигнал в файл. В качестве излучаемого сигнала использовался полупериод синусоидальной формы частотой от 1 до 5 кГц. Выбор данной полосы частот обусловлен техническими ограничениями имеющейся аппаратуры, для повышения точности измерения диаметра в широком

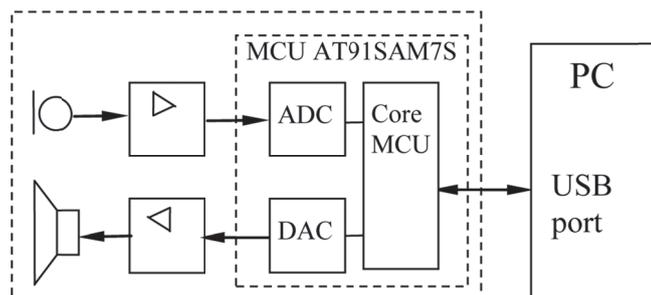


Рис. 3. Структурная схема экспериментального стенда

диапазоне желательного иметь частотный диапазон 500 Гц – 10 кГц. Приёмный тракт на основе конденсаторного микрофона имеет полосу пропускания от 100 Гц до 50 кГц, скорость работы АЦП была выбрана 150 кГц. На рисунке 4 приведен пришедший в прибор отражённый сигнал.

Данный сигнал получен при излучении частоты 1 кГц в трубу диаметром 40 мм, цифрой 1 обозначен излучаемый сигнал, цифрой 2 – принятый. Следует отметить два важных факта:

1. После подачи на динамик полупериода синусоиды излучение сразу не заканчивается – происходит процесс успокоения мембраны, за счёт чего продолжают колебания, обычно на резонансной частоте акустической системы. При проектировании приборов необходимо максимально уменьшать время успокоения, что позволит измерять более короткие трубы.

2. При отражении от открытого конца трубы принятый сигнал 2 меняет полярность, в случае отражения от твёрдого препятствия сигнал приходит в той же полярности, что и излучаемый сигнал. Кроме того, форма принятого сигнала искажается ввиду неравномерного затухания акустического сигнала на разных частотах. Частотный спектр одиночного полупериода синусоиды не является одной линией как у периодического гармонического сигнала, хотя и приближен к нему. Поэтому даже в случае излучения идеального полупериода синусоиды приёмный сигнал растягивается по времени и превращается в несколько гармонических колебаний. Однако, практическим путём получено, что первый пришедший полупериод оказывается фактически не искажённым.

Для проверки полученной формулы (10) были проведены измерения на частотах 1 кГц и 4 кГц. При скорости АЦП 150 кГц для трубы внутренним диаметром 40 мм запаздывание распространения сигнала частотой 1 кГц по сравнению с сигналом частотой 4 кГц составило 4 отсчёта или 26 мкс. Подставив значения в формулу (10), получаем диаметр трубы 53 мм. Для трубы 65 мм запаздывание составило 7 отсчётов, по формуле (10) получаем диаметр 71 мм. Для трубы 110 мм запаздывание составило 15 отсчётов, по формуле (10) получаем диаметр 103 мм. Эксперименты проводились также и на более длинных трубах, в целом были получены схожие результаты.

Кроме того, было экспериментально выявлено, что при установке твёрдого отражателя в конце трубы время распространения сигнала от частоты не зависит. Относительная погрешность измерения длины на трубах длиной 3 м составила не более 0.15% при неизменных климатических показателях, обеспечивающих стабильную скорость звука. В случае измерения более длинных труб относительная погрешность измерения длины будет уменьшаться.

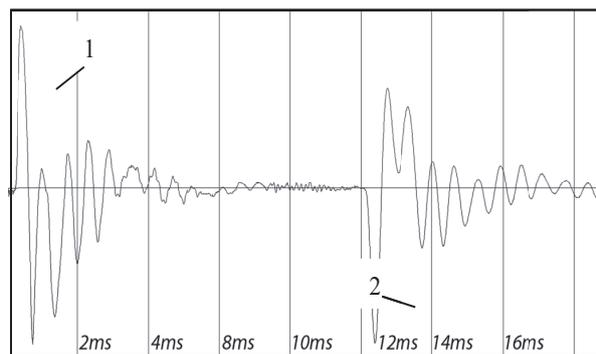


Рис. 4. Амплитуда электрического сигнала с микрофона прибора

Проведенные эксперименты показали возможность измерения длины и диаметра трубы одним датчиком. Однако, полученная в эксперименте погрешность измерения диаметра трубы 40 мм составила 30%, что является очень грубым результатом для любой метрологической системы. Необходимо отметить, что в нашем случае из-за технических ограничений для тонкой трубы использовались слишком низкие частоты излучения и АЦП. Полноценный метрологический анализ выходит за рамки данной статьи, однако исходя из (10) следует, что увеличение разницы частот приводит к увеличению точности измерения. При одновременном увеличении излучаемой частоты и частоты АЦП в пять раз погрешность измерения диаметра данной трубы снизится до 5-6%. Важным достижением является возможность измерять длину труб с высокой точностью без дополнительного ввода в прибор диаметра, что упрощает оператору работу.

Полученные формулы и алгоритмы позволяют разработать портативный прибор измерения длины и диаметра труб. Кроме того, по затуханию акустического сигнала появляется возможность оценить состояние внутренней полости трубы. Следует отметить, что предложенная методика может быть также использована для определения параметров волновода акустических систем контроля уровня, плотности и вязкости жидких сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A.R.da Silva, G.P.Scavone, A.Lefebvre.* Sound reflection at the open end of axisymmetric ducts issuing a subsonic mean flow: A numerical study. *Journal of Sound and Vibration* Volume 327, Issues 3–5, 13 November 2009, Pages 507-528
2. *K.A. Papadopoulou, M.N. Shamout, B. Lennox, D. Mackay, A.R. Taylor, J.T. Turner, X. Wang.* An evaluation of acoustic reflectometry for leakage and blockage detection // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* Vol 222, Issue 6, 2008., page(s): 959-966.

3. *Wenbo Duan, Ray Kirby, Jevgenija Prisutova, Kirill V. Horoshenkov.* On the use of power reflection ratio and phase change to determine the geometry of a blockage in a pipe // *Applied Acoustics* 87 (2015) 190–197.
4. Lutz Kasper, Patrik Vogt, and Christine Strohmeyer Stationary waves in tubes and the speed of sound / *THE PHYSICS TEACHER*. Vol. 53, JANUARY 2015 pp 523 - 524
5. *Gordon S. Kino - Acoustic waves : devices, imaging, and analog signal processing - : Prentice-Hall, 1987*
6. US Patent US4584676A - Method of and apparatus for pipe length measurement / *JENSEN RAYMOND H*
7. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику М.: Наука, 1984. - 403 с.
8. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. — 736 с.
9. Ванштейн Л.А. Распространение импульсов // *Успехи физических наук.* 1976. Т. 118. Вып. 2. С. 339 - 367.
10. *Ванштейн Л.А.* Дифракция электромагнитных и звуковых волн на открытом конце волновода. М.: Советское радио, 1953.
11. *Солдатов А.И.* Определение временного положения акустического импульса методом аппроксимации огибающей сигнала. / А.И. Солдатов, П.В. Сорокин, В.С. Макаров // *Известия Южного федерального университета. – Технические науки,* 2009. – № 10. – с. 178-184.
12. Патент на полезную модель RU № 52635 Электронно-акустическое устройство измерения уровня жидкости и длины труб. Борминский С.А., Скворцов Б.В.
13. Патент на полезную модель RU № 58694 Электронно-акустическое устройство измерения длины труб и уровни жидкости. Борминский С.А., Скворцов Б.В.
14. Способ акустической дальнометрии: патент РФ на изобретение № 2315335. / Солдатов А.И. и др., заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 20.01.2008 Бюлл. №2. – 3 с.
15. Свидетельство на полезную модель RU № 7492, Электронно-акустическое устройство измерения длины труб./ Скворцов Б.В., Жиганов И.Ю., Ско-робогатов Е.Г./ бюл. № 8 от 16.08.1998.
16. Свидетельство на полезную модель RU № 24550, Электронно-акустическое измерительное устройство. Скворцов Б.В., Жиганов И.Ю., Синников С.Г.

ACOUSTIC METHOD OF MONITORING THE LENGTH, DIAMETER AND CONDITION OF THE INNER CAVITY OF PIPES

© 2018 S.A. Borminskii

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article is devoted to the development of theoretical justification and practical implementation of the acoustic method of control of geometrical parameters of pipes as the main object of pipeline transport used in systems of production, transport and consumption of thermal energy. The method is based on the mathematical processing of the acoustic signal reflected from the open end of the pipe and allows to obtain information simultaneously about the length, diameter of the pipe with quality control of the inner cavity. The proposed algorithm for measuring the diameter extends the functionality of the measuring equipment and allows you to automatically calculate the phase shift of the acoustic signal when reflected from the open end of the pipe, thus fully automates the process of measuring the length of pipes of arbitrary diameter. Experimental studies carried out using the developed algorithm have shown that the relative error in measuring the length of the pipe length of 3 m was not more than 0.15%, the error in measuring the diameter of the pipe equal to 110 mm was not more than 7%.

Keywords: acoustic pulse, pipe, diameter, length.