

УДК 620.179

Способ акустического определения размера щелей, возникающих в подземных водопроводах

Гусейнли Э.И., аспирант
 Азербайджанский государственный научно-исследовательский институт водных проблем
 Тарвердиева У.Х., инженер,
 Научно-производственный центр «ОЗОН», г.Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация. Статья посвящена исследованию точности акустического метода определения площади щелей, возникающих в подземных трубопроводах, предназначенных для транспортировки жидких веществ. Проанализирована методическая погрешность определения площади щели, образовавшейся на стенке трубопровода. Рассмотрена методическая погрешность определения скорости потока, возникающая из-за совместного применения теоремы Котельникова для определения частоты отсчетов и методики вычисления шага дискретизации по среднеквадратичному критерию.

В качестве исходных данных при разработке методики вычисления методической погрешности взята известная формула для вычисления наивысшей величины частоты дискретизации амплитудно – частотного спектра сигнала вибро-акустического измерителя. Согласно полученному результату, абсолютная величина исследуемой методической погрешности определения площади щели прямо пропорциональна площади самой щели и растет с увеличением радиуса трубопровода, а также показателя корреляционных связей в сигнале виброакустического измерителя.

Ключевые слова: трубопровод, щель, погрешность, виброизмеритель, утечки

1. Введение

Как отмечается в работе [1] утечка с подземных водопроводов приводит к генерированию акустического шума, который может быть использован для локализации места утечки. Для обнаружения места утечки также могут быть использованы такие методы как использование следовывделяющих газов с термографированием [2], моделирование потока и давления [3], георадар [4]. Классическая схема определения места утечки с подземных пластиковых труб приведена на рис. 1.

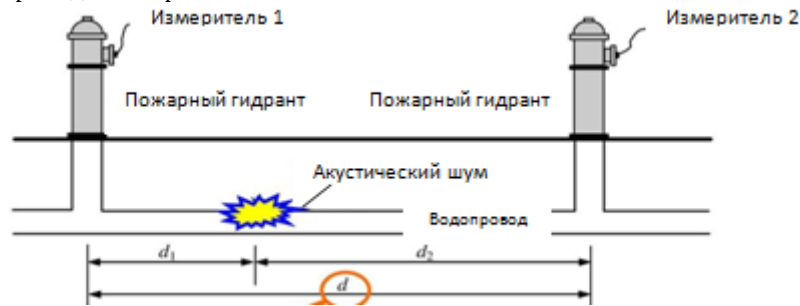


Рис. 1. Схема реализации акустического определения места щели на подземном трубопроводе

Согласно [1], для обнаружения места утечки акустическим методом могут быть использованы акселерометры или гидрофоны. Они, например, могут быть установлены на гидрантах. Согласно акустическому методу расстояние до места утечки d_1 может быть определено как

$$d_1 = \frac{d - c \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

где d – расстояние между измерителями; c – скорость распространения акустического шума по трубе; Δt – разница во временах прибытия акустического шума на измерители.

Согласно работе [5], существует такой тип утечки как фоновая утечка, где транспортируемая жидкость вытекает с трубы через несколько мелких щелей и трещин. Результирующая утечка с трубопровода в этом случае имеет диффузный характер и не приводит к резкому изменению давления в трубе. Согласно [5] скорость утечки с водопровода определяется по формуле

$$Q = C_d \cdot h^n = C_d \cdot A \cdot (2gh)^n \quad (1)$$

где Q – скорость утечки; C_d – коэффициент утечки; h – давление в трубе; n – показатель, равный обычно 0.5.

В случае, если параметр A имеет постоянную и переменные составляющие, формула (1) принимает следующий вид

$$Q = C_d \cdot A^f (2gh)^n + C_d \cdot A^v \cdot (2gh)^n \quad (2)$$

где A_f и A^v – соответственно постоянный и переменный составляющие A .

Экспериментальные исследования, проведенные в многочисленных работах (см. например, [6,8]) показали наличие линейной зависимости между средним квадратическим отклонением амплитуды вибраций, возникающих на стенке трубы и скоростью утечки. Соответствующий график зависимости среднеквадратической величины сигнала виброизмерительной установки от скорости утечки показан на рис. 2 [8].

В общем случае между показателями Q и среднеквадратической величиной амплитуды вибрации стенки трубы V имеется следующая линейная зависимость

$$Q = a_1 \cdot V + a_2$$

где a_1, a_2 – постоянные величины.

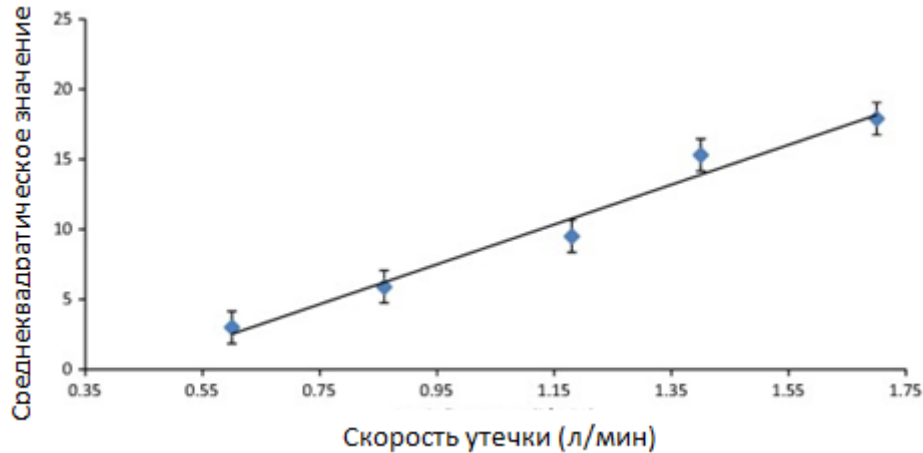


Рис. 2. Линейная зависимость между скоростью утечки и среднеквадратической величиной амплитуды вибрации стенки трубы

Целью настоящей статьи является определение потенциальной точности определения площади щели возникающей на стенке трубы по результатам проводимых акусто – вибрационных измерений.

2. Предлагаемый метод

Согласно работе [9], при возникновении утечек в водопроводной трубе из-за образования щелей или трещин, вода вырывающаяся из трубы создает турбулентный поток. В результате, на стенке трубы генерируются акустические сигналы, которые распространяются вдоль трубы.

Согласно [9], при возникновении утечек, в металлических трубах возникают вибрации на частотах 500-1500 Гц и в пластиковых трубах на частотах 300-1000 Гц.

Согласно [10], наивысокая по частоте компонента спектра вибрации на стенке трубопровода определяется по формуле

$$f_b = \frac{1.84C}{2\pi \cdot \varphi} \quad (3)$$

где скорость распространения звука по трубе; φ – радиус трубы.

В таблице 1 приведены значения скорости распространения звука в различных типах труб [9].

Табл. 1

Диаметр	Чугунная труба (м/с)	Стальная труба (м/с)	Цементовая труба (м/с)
300	1010	1-70	1080
500	1000	1030	1020
600	1000	990	980
800	980	960	970
100	980	930	960
1200	980	920	960

Согласно известной теореме Котельникова, если восстанавливать дискретизированный сигнал используя базовые сигналы типа $A \cdot \frac{\sin x}{x}$, где A – амплитуда выборки, то достаточно точное восстановление исходного сигнала возможно при выборе шага дискретизации Δt по формуле

$$\Delta t = \frac{1}{2f_b} \quad (4)$$

Однако, в реальном случае, в системах цифро – аналогового восстановления сигнала используются ступенчатые функции. Примем, что огибающая суммарного акустического сигнала является нормальным Марковским процессом, коэффициент корреляции которого определяется как [10].

$$R = e^{-\alpha|\tau|} \quad (5)$$

где α – постоянная корреляции; τ – интервал выборки.

Рассмотрим элементарный временной интервал дискретизации, т.е. дискрету

$$\Delta t = t_{i-1} \div t_i \quad (6)$$

Если допустить, что виброизмеритель безошибочно измеряет скорость утечки Q , то в интервале Δt получим разницу

$$\Delta Q = Q(t_{i-1}) - Q(t_i) \quad (7)$$

На основе (7) имеем

$$\Delta Q^2 = [Q(t_{i-1}) - Q(t_i)]^2 \quad (8)$$

Осуществим усреднение (8) получат

$$\overline{\Delta Q^2} = \overline{[Q(t_{i-1}) - Q(t_i)]^2} \quad (9)$$

Выражение (9) перепишем как

$$\overline{\Delta Q^2} = \overline{Q(t_{i-1})^2 - 2Q(t_{i-1}) \cdot Q(t_i) + Q(t_i)^2} = \overline{2Q(t_{i-1})^2 - 2Q(t_{i-1}) \cdot Q(t_i)} = 2D(Q)[1 - R(Q)] \quad (10)$$

где $R(Q)$ – коэффициент корреляции сигнала вибро – акустического измерителя.

С учетом (5) и (10) получим:

$$\overline{\Delta Q^2} = 2D(Q)[1 - e^{-\alpha|\tau|}] \quad (11)$$

Относительную погрешность восстановления $Q(t)$ ступенчатым сигналом определим как

$$\gamma = \sqrt{\frac{\overline{\Delta Q^2}}{2D(Q)}} = \sqrt{1 - e^{-\alpha|\tau|}} \quad (12)$$

Приняв $\Delta t = \tau$, с учетом (3), (4) и (12) напомним

$$\gamma = \sqrt{1 - \exp\left[-\alpha \left(\frac{2\pi\phi}{2 \cdot 1.84 \cdot C}\right)\right]} = \sqrt{1 - \exp\left[-\frac{\alpha\pi\phi}{1.84C}\right]} \quad (13)$$

Таким образом, согласно (13) при увеличении радиуса труб погрешность восстановления значения Q увеличивается.

Если прологарифмировать (1) получим

$$\ln Q = \ln C_d + \ln A + n \cdot \ln 2g + n \ln h \quad (14)$$

Из (14) находим

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta C_d}{C_d} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{2n \cdot \Delta g}{g} + \frac{n \cdot \ln \Delta h}{h} \quad (15)$$

Приняв $\Delta g = \Delta h = \Delta C_d = 0$, а также

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \gamma \cdot k \quad (16)$$

где k – коэффициент пропорциональности, с учетом (13) и (16) напомним

$$k \cdot \sqrt{1 - \exp\left[-\frac{\alpha\pi\phi}{1.84C}\right]} = \frac{\Delta A}{A} \quad (17)$$

Таким образом, согласно (17) абсолютная величина методической погрешности определения площади щели может быть определена как

$$\Delta A = A \cdot k \cdot \sqrt{1 - \exp\left[-\frac{\alpha\pi\phi}{1.84C}\right]} = \frac{\Delta A}{A} \quad (18)$$

3. Заключение

Таким образом, проанализирована методическая погрешность определения площади щели, образовавшейся на стенке трубопровода. Конкретно рассмотрена методическая погрешность, возникающая из-за применения теоремы Котельникова для определения частоты опроса и методики вычисления погрешности восстановления по среднеквадратичному критерию.

В качестве исходных данных при разработке методики вычисления методической погрешности взята известная формула для вычисления наивысшей величины частоты дискретизации амплитудно – частотного спектра сигнала виброакустического измерителя. Согласно, полученному результату, абсолютная величина исследуемой методической погрешности определения площади щели прямо пропорциональна площади самой щели и растет с увеличением радиуса трубопровода, а также показателя корреляционных связей в сигнале виброакустического измерителя.

Литература:

1. Berman M. J., Joseph P. F., Muggleton J. M., Gao Y. Some recent research results on the use of acoustic methods to detect water leaks in buried plastic water pipes.

2. Weil G. J. Non contact, remote sensing of buried water pipeline leaks using infrared thermography// Water resources Planning and Management and Urban Water Resources. 1993. Pp. 404-407.
3. Pudar R. S., Liggett J. A. Leaks in pipe networks// Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers. 1992. Vol. 118. Pp. 1031-1046.
4. Sneddon K. W., Olhoeft G. R., Powers M. H. Determining and mapping DNAPL saturation values from noninvasive GPR measurements// Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, Arlington, Virginia. 2000. Pp. 293-302.
5. Adedeji K. B., Hamam Y., Abe B. T., Abu-Mahfouz A. M. Leakage detection and estimation algorithm for loss reduction in water piping networks// Water. 2017. Vol. 0. Pp. 773.
6. Dinardo G., Fabbiano L., Vacca G., Ekuakille L. A. Flow evaluation from the energy of pipe wall vibrations.
7. Butterfield J. D., Meyers G., Meruane V. Collins R. P., Beck S. B. M. Experimental investigation into techniques to predict leak shapes in water distribution systems using vibration measurements.
8. Butterfield J. D., Krynkin A., Collins R. P., Beck S. B. M. Experimental investigation into vibro – acoustic emission signal processing techniques to quantify leak flow rate in plastic water distribution pipes// Applied Acoustic. 2017. Vol. 119. Pp. 146-155.
9. Zhang L., Wu Y., Guo L., Cai P. Design and implementation of leak acoustic signal correlator for water pipelines// Information Technology Journal. 2013. Vol. 12(11). Pp. 2195-2200. ISSN 1812-5638. DOI10.3923/itj.2013.2195.2200.
10. Wang Y. Z. The research and development of portable wireless correlation instrument for leak detection based on DSP// Jilin University Press, Jilin.