

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА СУММИРОВАНИЯ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА КОРРЕЛЯЦИОННОГО ТЕЧЕИСКАТЕЛЯ

**ON THE APPLICATION
OF THE SUMMATION METHOD
IN THE TIME DOMAIN FOR SPATIAL
FILTERING OF THE ACOUSTIC SIGNAL
OF THE CORRELATION LEAK DETECTOR**

**P. Bunakov
V. Aksenov**

Summary. The solution of the problem of spatial signal allocation in pipeline systems based on the method of delay and summation of the signal in the time domain is considered. The proposed method allows you to eliminate a significant part of unwanted signals, which increases the accuracy of determining the location of a liquid leak.

Keywords: leak detection, correlation analysis, correlation, correlation leak detector, pipeline, coordinates.

Бунаков Павел Юрьевич

*Д.т.н., доцент, Государственный социально-гуманитарный университет, г. Коломна
pavel_jb@mail.ru*

Аксенов Василий Сергеевич

*Аспирант, Государственный социально-гуманитарный университет, г. Коломна
vasilyaksenov@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается решение задачи пространственного выделения сигнала в трубопроводных системах на основе метода задержки и суммирования сигнала во временной области. Предлагаемый метод позволяет устранить значительную часть нежелательных сигналов, что повышает точность определения места утечки жидкости.

Ключевые слова: обнаружение утечек, корреляционный анализ, корреляция, корреляционный течеискатель, трубопровод, координаты.

Проблема поиска и обнаружения утечек в трубопроводах систем водоснабжения, а также транспортировки газа и нефти продолжает оставаться актуальной [1]. По официальной информации Минэнерго РФ доля тепловых сетей, нуждающихся в замене, стабильно нарастает и, как следствие, потери в них достигают 30% [2].

На настоящий момент разработано значительное количество методов поиска утечек, наиболее распространенными из которых являются акустический и корреляционно-акустический. В первом варианте производится последовательное прослушивание трубопровода с целью выявления более высокого уровня шума, сигнализирующего об утечке. Его основным недостатком является сложность отделения сигнала большого количества посторонних шумов. Корреляционно-акустический метод дает более точную картину за счет определения места утечки на основе корреляционной функции, построенной по данным от распределенных по трубопроводу датчиков. Для его применения используются два и более сигнала, получаемых с разнесенных друг от друга, расположенных на трубопроводе датчиков. Данный ме-

тод в совокупности с частотной фильтрацией позволяет получать достаточно точные результаты даже при наличии городского и промышленного шума [3]. Однако при его использовании могут возникнуть сложности с точным определением координат утечки, если на участке исследуемого трубопровода есть компенсаторы или запорная арматура. Кроме того, определенные затруднения может создать характер акустической эмиссии генерируемой жидкостью, если она вытекает в образованную рядом с трубопроводом полость [4]. Все эти помехи приводят к появлению дополнительных пиков на графике взаимной корреляционной функции, вследствие чего уменьшается точность определения координат утечки.

Для повышения точности метода предлагается применить метод пространственной фильтрации сигналов, основанный на суммировании двух дискретных сигналов во временной области. Данный метод фильтрации с некоторыми ограничениями позволяет выделить сигнал определённого участка трубопровода и может быть использован в корреляционных и схожих с ними системах неразрушающего контроля для более точного определения координат утечки.

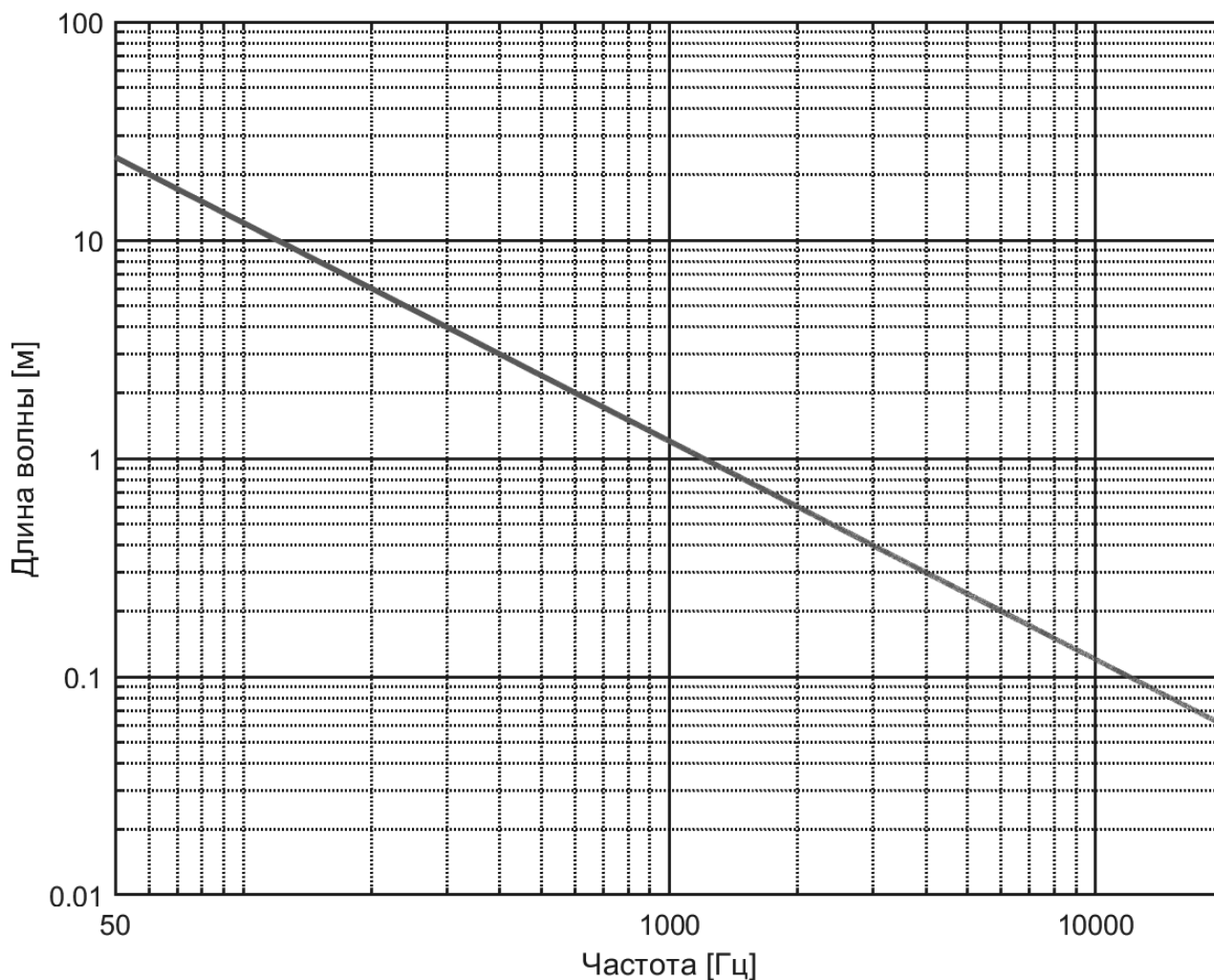


Рис. 1. График зависимости длины волны от скорости звука в трубопроводе

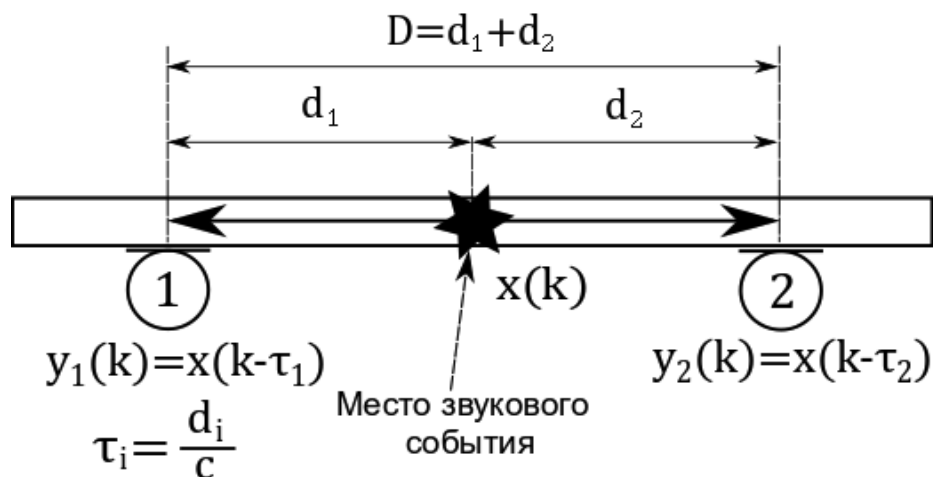


Рис. 2. Схема расположения акустических датчиков на трубопроводе и распространение акустической волны

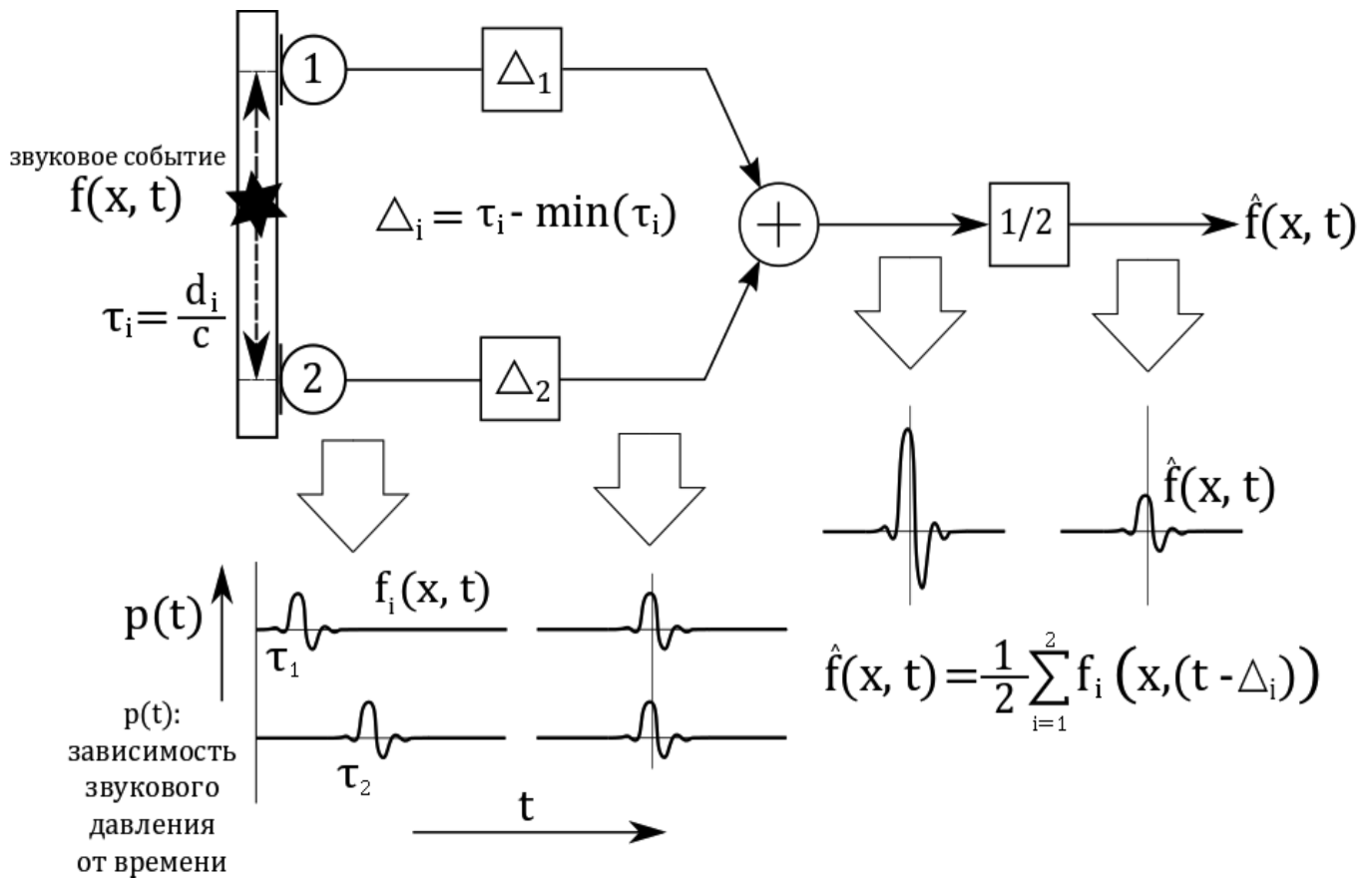


Рис. 3. Схема пространственной фильтрации методом суммирования во временной области

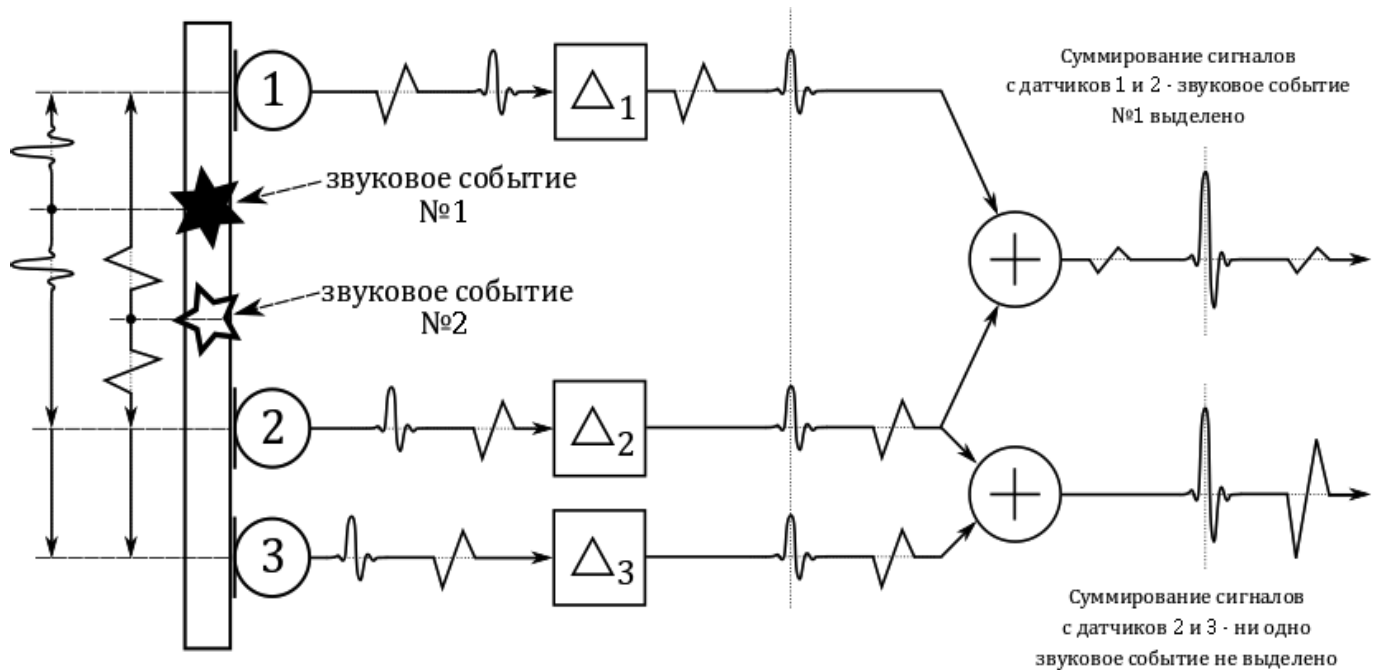


Рис. 4. Схема фильтрации при размещении двух акустических датчиков на одном из концов трубопровода

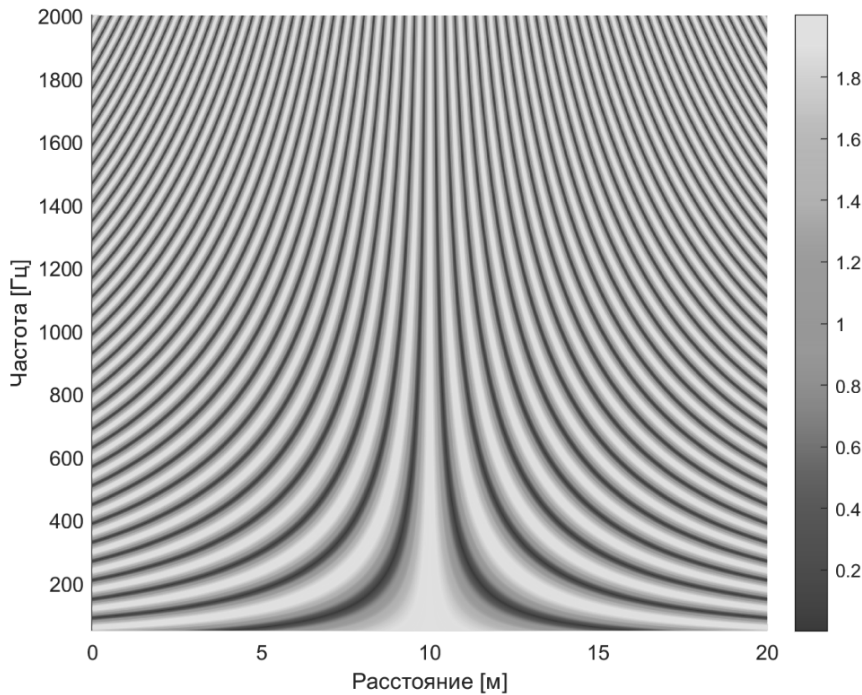


Рис. 5. Зависимость амплитуды сигнала от частоты и положения источника

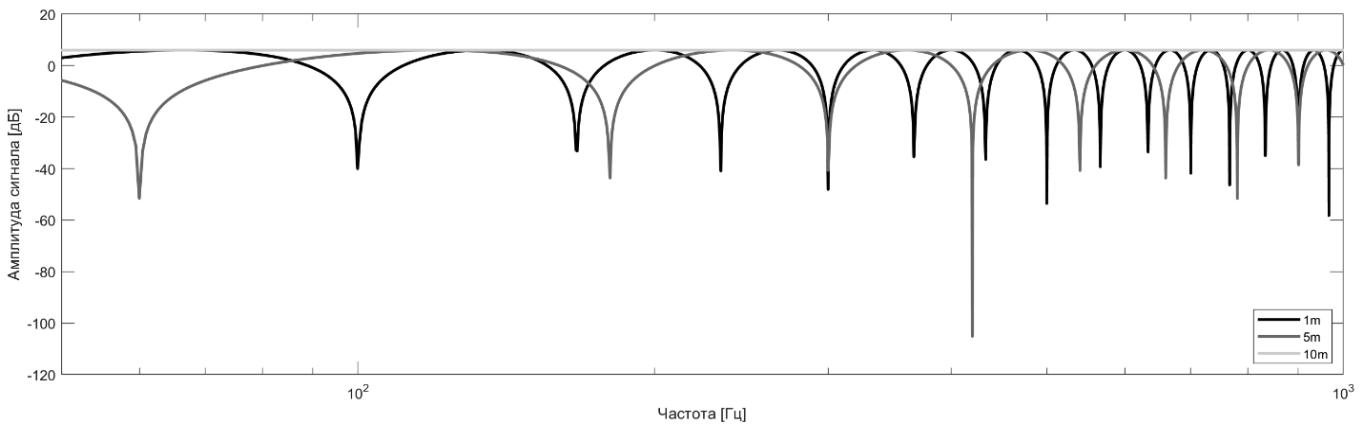


Рис. 6. АЧХ фильтра в зависимости от расстояния до первого датчика

Описание метода

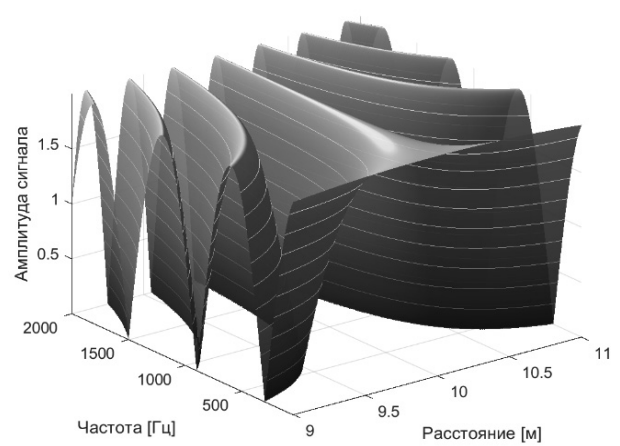
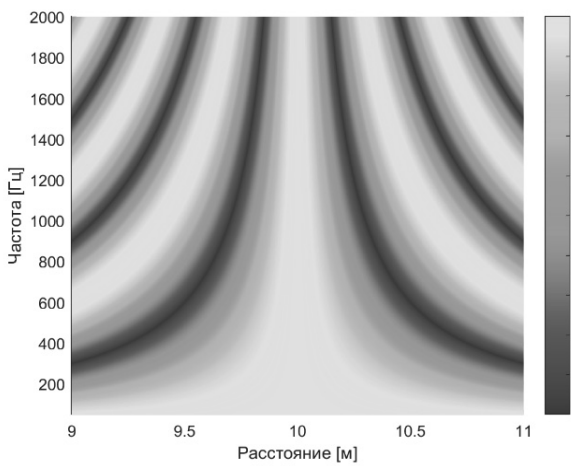
Во всех приведенных ниже расчетах используется соотношение, где скорость звука принята равной 1200 м/с. На рисунке 1 показано соотношение длины волны (λ) и частоты (f) при данной скорости звука.

Для упрощения представления затухание акустических волн при их распространении в трубопроводе и разница в частотной характеристике акустических датчиков в формулах не учитываются.

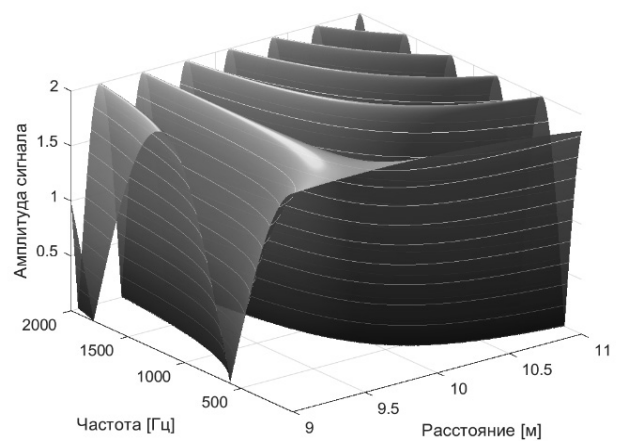
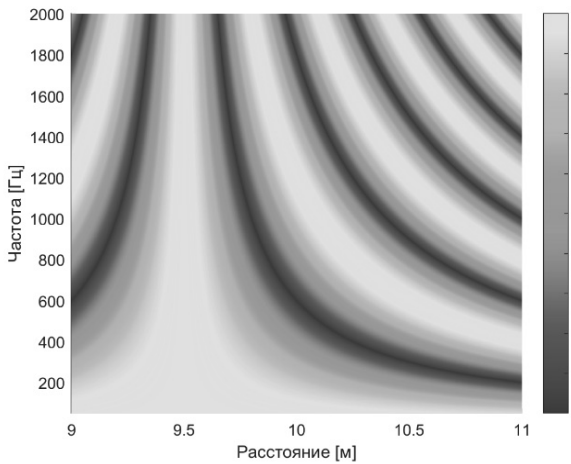
Акустический сигнал, генерируемый одним или несколькими звуковыми событиями, распространяется по трубопроводу, достигая датчиков 1 и 2, расположенных по обе стороны на границе исследуемого участка трубопровода (рис. 2).

Дискретный сигнал, получаемый с акустического датчика, выражается формулой [5]:

$$y_i(k) = x\left(k - \frac{d_i}{c}\right) \tag{1}$$



а)



б)

Рис. 7. Зависимость амплитуды сигнала от расстояния и частоты

где k — индекс дискретного времени; — расстояние от источника звука до акустического датчика; — скорость распространения звука в трубопроводе.

Предлагаемый способ пространственного выделения сигнала основан на суммировании двух дискретных сигналов, один из которых имеет задержку на определенное количество отсчетов, зависящее от расстояния между одним из датчиков и проблемным участком трубопровода. Получаемый результирующий сигнал содержит усиленную по амплитуде составляющую, характеризующую исследуемый участок трубопровода (рис. 3).

Для того чтобы получить сигнал из определённой точки на участке трубопровода используется формула

формирования луча методом задержки и суммирования во временной области [6]:

$$\hat{f}(x, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 f_i(x, (t - \Delta_i)), \quad (2)$$

$$\Delta_i = \tau_i - \min(\tau_i), \quad (3)$$

$$\tau_i = \frac{d_i}{c} \quad (4)$$

где f_i — временной ряд отсчётов с каждого акустического датчика, d — расстояние от датчика 1 до точки фокусировки, t — время, x — положение звукового события на трубопроводе.

Размещение на одном из двух концов исследуемого участка трубопровода двух и более датчиков представляется избыточным, т.к. при задержке на время сигналы с размещенных на одном конце исследуемого участка датчиков идентичны и не оказывают влияния на выделение сигнала (рис. 4):

$$f_2(x, (t - \Delta_2)) = f_3(x, (t - \Delta_3)),$$

Зависимость амплитуды сигнала, получаемого после применения фильтрации с точкой фокусировки 10 м, от расстояния и частоты для полосы частот от 50 Гц до 2000 Гц на трубопроводе длиной 20 метров приведена на рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра с точкой фокусировки 10 метров для расстояний 1, 5 и 10 метров приведена на рис. 6.

В соответствии с соотношениями (2) — (4) можно варьировать положением точки фокусировки фильтра на трубопроводе, используя выражение:

$$\hat{f}(x, t) = \frac{x_1 \left(t - \frac{d_1}{c} \right) + x_2 \left(t - \frac{D - d_1}{c} \right)}{2}$$

где D — дистанция между датчиками; d_1 — дистанция между первым датчиком и точкой фокусировки.

На рис. 7 представлены графики зависимости амплитуд сигналов от частоты и положения источника сигналов на участке трубопровода длиной 20 м. Рис. 7-а соответствует расположению точки фокусировки на расстоянии 10 метров от первого датчика, а рисунок 7-б — его расположению на расстоянии 9,5 метров от первого датчика.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 6 и 7, показывает, что качество фильтрации и характеристики получаемого после фильтрации сигнала имеют выраженную зависимость от длины исследуемого участка и положения точки фокусировки. Тем не менее, предлагаемый метод фильтрации позволяет устранить значительную часть нежелательных сигналов, что повышает точность определения места утечки жидкости. На его основе реализованы опытные образцы аппаратно-программных средств для промышленных течееискателей. Кроме того, полученные результаты дают возможность определить направления дальнейших исследований в области повышения точности локализации утечек в трубопроводах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов Е.В., Комаров А. С., Мельников Ф. А., Серов А. Е. Утечки в трубопроводах систем внутреннего водоснабжения // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 40–47.
2. Кравченко В. М. Текущее состояние отрасли теплоснабжения // Материалы доклада Министерства Энергетики Российской Федерации. 2016. URL: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/4759/60329> (дата обращения: 10.05.2020).
3. В.С. Аврамчук, В. И. Гончаров, В. Т. Чан Частотно временной корреляционный анализ в задачах определения координат утечек в трубопроводах // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 2 // Стр. 70–73.
4. Самойлов Е.В., Тужилкин Ю. И. Эффективность применения корреляционных течееискателей для определения мест утечек из трубопровода теплоносителя // Новости теплоснабжения, № 7 (11), 2001, Стр. 24–27.
5. Benesty J., Chen J. Study and Design of Differential Microphone Arrays // Springer, 2013, -P. 1–9.
6. Benesty J., Chen J., Huang Y. Microphone Array Signal Processing. // Springer, 2008, -P. 41–42.

© Бунаков Павел Юрьевич (pavel_jb@mail.ru), Аксенов Василий Сергеевич (vasilyaksenov@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»