

А.А. Владимирский, Киев

И.А. Владимирский, Киев

О РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ПРИМЕНЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОИСКЕ УТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДОВ

Abstract. Various schemes of acoustic measurements are considered – with sensors on the pipeline, on the ground and their combinations when searching for leaks of underground pipelines with the calculation of the correlation functions of the received signals. The application features of these schemes, the corresponding informative parameters of the correlation functions, and the developed instrumentation are presented.

Актуальность, постановка задачи

Корреляционная обработка акустических данных при поиске утечек в трубопроводах под давлением широко известна, в первую очередь, благодаря распространению, которое получили, так называемые, корреляционные течеискатели (correlation leak detectors). Их выпускают в США, Германии, Франции, Великобритании, Украине, России, Японии более чем 10 фирм-производителей. Методика применения всех этих приборов основана на одной и той же, общей схеме (рис. 1), которую можно называть классической.

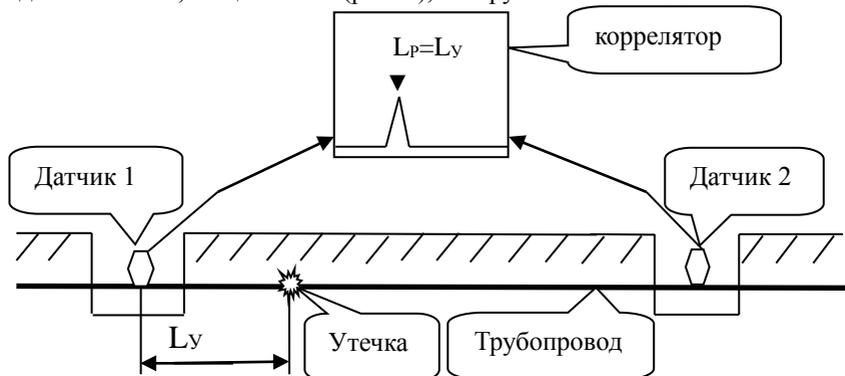


Рис. 1. Классическая схема с датчиками на трубопроводе
по обе стороны от утечки

два вибродатчика располагаются на трубопроводе в местах доступа по обе стороны от места утечки, расстояние до которой от одного из датчиков определяется по максимуму взаимной корреляционной функции (ВКФ) принимаемых сигналов. Координата определяется по известной формуле

$$L_y = \frac{L}{2} - \frac{V \cdot \Delta T}{2} \quad (1)$$

где: L и L_y – длина трубопровода между датчиками и координата утечки соответственно, V – скорость распространения акустических сигналов от утечки к датчикам, ΔT – разность времен прихода акустических сигналов к одному и ко второму датчикам.

Классическая схема обладает рядом достоинств, о которых много сказано [1, 2]. Однако у нее есть и недостатки: необходимость обеспечения двух мест доступа к поверхности трубопровода по обе стороны от предполагаемого повреждения, высокая чувствительность к помехам от источников, акустически связанных с трубопроводом – от насосов, от сопел элеваторов, от протечек в сальниковых компенсаторах и т.п. Поэтому применение корреляционных течеискателей в соответствии с классической схемой обычно совмещают с применением акустических течеискателей по уровню шума течи в грунте над трубопроводом. Однако, из-за разнообразия условий поиска утечек, особенно в крупных городах с высокой степенью износа подземных трубопроводов, применение и такой комбинации приборов бывает не достаточным для оперативного и точного выявления повреждений. Вместе с тем, полезный потенциал взаимной корреляционной обработки (КО) доступных для регистрации акустических данных с двух датчиков о местоположении течи не ограничивается применением классической схемы. Существуют и другие схемы КО, применение которых может оказаться полезным в той или иной ситуации. Учитывая актуальность задачи повышения оперативности и достоверности поиска утечек в городских подземных трубопроводах, в данной статье представлен краткий обзор "не классических" схем применения КО с анализом целесообразности их практического применения. Представлено диагностическое оборудование, разработанное в ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, которое может применяться по различным схемам взаимной корреляционной обработки акустических данных при поиске утечек.

Схема с двумя датчиками на грунте по обе стороны от повреждения

На рис. 2 представлена схема корреляционного определения координаты утечки, как и в "классической" схеме, по разности времен ΔT . Отличие схемы 2 – датчики устанавливаются не на трубопровод, а на грунт. Схема в контексте заявленной конструкции специального датчика описана в [3]: Датчик снабжен заглубляемым в грунт зондом, соединенным с поршневой диафрагмой, которые совместно образуют акустическую антенну. Как преимущество перед классической схемой в [3] говорится об отсутствии необходимости контакта датчиков с поверхностью трубопровода, однако вопрос о том, какую скорость подставлять в (1) не раскрыт.

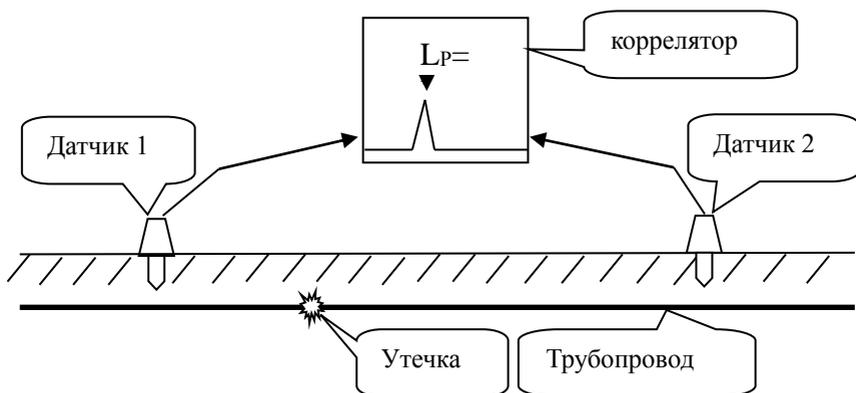


Рис. 2. Схема с датчиками на грунте по обе стороны от утечки

Практически грунт может включать множество компонент – песок, щебень, строительный мусор, земляной глинистый грунт и т.п. Скорость распространения звука в песке на частотах 1-2кГц составляют 80-200 м/с [4] и сильно зависит от водонасыщенности. В [5] сказано, что скорость звука в песке сильно зависит от размеров частиц, и, по этой причине, может находиться в пределах 300-800м/с. Согласно [6] гравий, щебень, песок могут иметь диапазон скоростей 100-1000 м/с. Согласно [7] скорость продольных волн в сухой песчаной почве увеличивается с глубиной особенно быстро в верхних слоях в пределах первых 2-4 метров, постепенно замедляясь в росте [8]: с увеличивается от 20-30 м/с в самом верхнем слое толщиной 2-3 см до 200-250 м/с на глубине 1,5 м., далее скорость увеличивается с глубиной z по степенному закону с показателем скорости 0,5-0,6; на глубине 6-7 м она примерно равна 600 м/с [9]; в слоях, где песок насыщен подземными водами, скорость резко возрастает: по сравнению с сухим песком скорость звука в водонасыщенном песке примерно в два раза больше и, кроме того, она слабо зависит от глубины [7].

Другая особенность схемы – вопрос о пути и среде, по которым к датчикам поступают акустические шумы от утечки: утечка-грунт-датчик или утечка-трубопровод-грунт-датчик. Если условия прокладки трубопровода и свойства грунта способствуют первому пути, то тогда появляется неопределенность в точном определении величины L в (1), так как она становится функцией искомой координаты утечки. Практически, в большинстве случаев, это не приведет к существенной ошибке, однако влияние неопределенности скорости на результат поиска утечки остается высокой. Для работы в данной ситуации можно было бы использовать корреляционный трехточечный метод [11] в расчете на постоянство скорости в грунте в пределах диагностируемого участка труб. Однако эксперименты в данной области вряд ли целесообразны из-за слишком большого затухания

звука в грунте: коэффициент поглощения по [7] продольных волн в однородном грунте на глубинах, превышающих 1 м, пропорционален частоте. Для сухого песчаного грунта коэффициент поглощения на частоте 100 Гц в среднем равен 3-4 дБ/м; для глинистых почв ~ 4-12 дБ/м; для лессового грунта ~ 8-10 дБ/м [7, 10]. Для сравнения, коэффициент затухания для волн гидравлического удара по трубопроводу с канальной прокладкой составляет величину порядка 0,2дВ/м. При таком затухании по грунту дистанционность корреляционного метода по схеме 2 крайне мала и вряд ли перекроет 100 м участка подземного трубопровода. Практически схему на рис. 2 можно использовать в случаях распространения акустических сигналов утечки преимущественно по пути утечка-трубопровод-грунт-датчик. Такие ситуации возможны при наличии жесткой связи между трубопроводом и грунтом в месте установки датчика, например в виде неподвижной опоры. В этом случае в качестве скорости в (1), ориентировочно, может быть использована та же скорость, что и в схеме 1.

Схема с двумя переставляемыми датчиками на грунте и поиском утечки по направлению на нее

Из приведенных особенностей применения КО по схеме 2 следует, что для пути распространения утечка-грунт-датчик у схемы 2 есть два основных недостатка: неопределенность и вариабельность от случая к случаю скорости распространения акустических сигналов утечки по грунту и значительное затухание сигналов при расстояниях между датчиком и утечкой, подобных расстояниям между тепловыми камерами или колодцами. Однако, в значительной мере снизить зависимость от данных факторов результата поиска утечки с помощью сигналов с датчиков на грунте можно путем изменения схемы применения КО и используемых параметров ВКФ. На рис. 3 представлен вид сверху поиска утечки с помощью двух переставляемых на грунте датчиков А и В по соответствующей им вычисленной ВКФ. Датчики устанавливаются на расстоянии 1-5м. друг от друга. Номера обозначают позиции датчиков на грунте относительно искомой течи. При этом ориентировочное минимальное значение скорости используется только для определения диапазона задержек dT вычисляемой ВКФ, а значительное затухание сигналов с расстоянием компенсируется возможностью приблизиться по грунту к месту течи. На направление для выбора позиции датчика указывает знак при вычисленной величине dT .

Схема с одним датчиком на трубопроводе и одним, переставляемым датчиком на грунте

При наличии одного места доступа к поврежденному участку трубопровода можно воспользоваться схемой КО, представленной на рис. 4.

Схема с двумя датчиками на трубопроводе в теплокамере при определении поврежденного участка (направления на повреждение)

Перед определением места повреждения всегда определяется поврежденный участок трубопровода. Если его признаки не очевидны (нет поступления воды в теплокамеры или колодцы, низкие уровни шума на трубах) то можно воспользоваться схемой применения КО, представленной на рис. 5. При поиске поврежденного участка оба датчика корреляционного течеискателя устанавливаются поочередно в соседние места доступа и по знаку временной задержки, (точнее по его изменению, см. рис. 5.) при которой наблюдается максимум ВКФ, определяется направление прихода шумов утечки и соответственно на участок с повреждением.

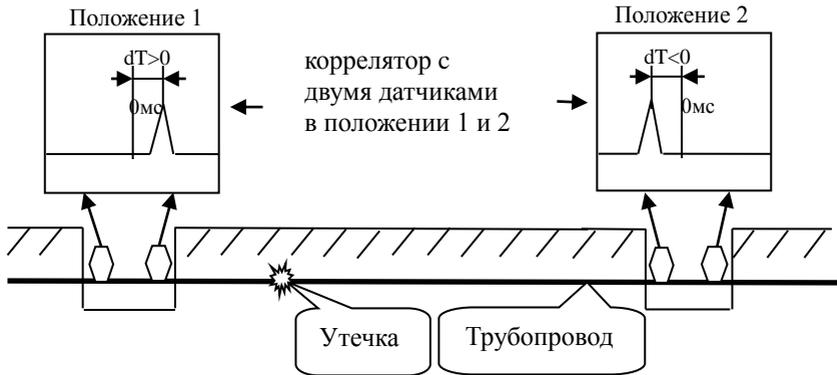


Рис. 5. Схема с датчиками на трубопроводе в одной теплокамере, затем во второй при определении поврежденного участка

Приборное обеспечение для реализации поиска утечек с помощью различных схем применения корреляционной обработки акустических данных

Возможность практического использования приведенных схем применения КО акустических данных предъявляет ряд технических требований к диагностической аппаратуре. Прежде всего, это возможность подключения к корреляционному вычислителю датчиков, как для грунта, так и для трубопровода. На рис. 6 представлен двухканальный акустический течеискатель А-20 с комплектом датчиков для грунта [13]. На рис. 7 представлен корреляционный течеискатель К-10.5 с комплектом датчиков с магнитным держателем для установки на трубопровод [14]. Каждый течеискатель может использовать датчики из обоих комплектов.



Рис. 6. Двухканальный акустический течеискатель А-20 с двумя датчиками для грунта



Рис. 7. Корреляционный течеискатель К-10.5 с возможностью подключения как магнитных датчиков, так и датчиков для грунта, рис. 6.

Заключение

Приведенные "не классические" схемы применения корреляционной обработки акустических данных, по сравнению с "классической" схемой в основном не требуют обязательного доступа к обоим концам трубопровода (кроме схемы на рис. 5). По сравнению с применением акустического течеискателя по максимуму шума в грунте (слухачами), данные схемы могут обладать более высокой чувствительностью, поскольку определение места течи ведется по взаимной корреляционной функции с подавлением в сигналах

не коррелированных друг с другом помех. В этом смысле особого внимания заслуживает комбинированная схема – один датчик на трубопроводе и один, переставляемый датчик на грунте, рис. 4. При такой схеме оба датчика регистрируют один и тот же акустический сигнал утечки, но распространяющийся по физически разным каналам – по грунту и по трубе, которые подвержены, в основном, влиянию физически разных, никак не связанных друг с другом источников помех.

1. Коллакот Р. Диагностика повреждений [пер. с англ.]. М.: Мир, 1989. 512 с.
2. Владимирский А.А., Владимирский И.А., Семенюк Д.Н. Уточнение диагностической модели трубопровода для повышения достоверности течеискания. *Акустичний вісник Інституту гідромеханіки НАН України*. 2005. 3 (8). С. 3-16.
3. Датчик для корреляционного течеискателя. Патент РФ на полезную модель № 74469 опубл. 27.06.2008 Бюл.№18.
4. Ю.И. Колесников, Д.А. Медных. О некоторых особенностях распространения акустических волн во влажном песке. // *Физическая мезомеханика* №7 1 (2004) -с.69-74.
5. Е.Б. Сибиряков, В.А. Куликов, Г.В. Егоров. Распространение сейсмических волн в песчаных отложениях. // *Физическая мезомеханика* №б 1 (2003) -с.13-22.
6. В.К. Хмелевской Геологические методы исследования земной коры. Международный университет природы, общества и человека Дубна 1997г. file:///D:/Статьи%20по%20диагностике/Геофизические%20методы%20исследования%20земной%20коры%20Все%20о%20Геологии%20(gео. web.ru).html
7. О.В. Кудрявцев. Сейсмоакустические поля в верхних слоях грунта. http://sound-theory.ru/izmereniya_sejsmopoloj.pdf
8. А.А. Романчук, Р.Р. Крижберг. Распространение звуковых волн в верхней части грунта. – *Геология и геофизика*, 1988, №9, 102-104.
9. T.G. Winter. A survey of sound propagation in soils. – *Acoustical holography*, pros. v.1, 1967, 197-216.
10. T.G. Gutowski, C.L. Dym. Propagation of a ground vibration: a review. – *J.Sound and Vibr.*, 1976, 1976, v.49, N2, 179-193.
11. Параметричні методи діагностування підземних трубопроводів з урахуванням багатохвильового поширення інформаційних сигналів *Електронне моделювання*. 2019. 41 (1). С.3-17.
12. Владимирский И.А. Корреляционный метод поиска утечек при одностороннем доступе к трубопроводу. *Моделювання та інформаційні технології* (збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України). 2015. Вип. 74. С. 56-59.
13. Владимирский А.А., Владимирский И.А. Разработка акустического течеискателя А-20. *Моделювання та інформаційні технології* (збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України). 2004. Вип. 28. С. 30-34.
14. Владимирский А.А., Владимирский И.А., Криворучко И.П., Савчук Н.П. Разработка корреляционных течеискателей К-10.5 и К-10.5М. *Моделювання та інформаційні технології* (збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України). 2016. Вип. 76. С. 85-88.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3859635>

Поступила 10.10.2019р.