

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЧЕИСКАТЕЛЯ ТАК-2005 В ГОРОДСКОМ ТРУБОПРОВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

*А.Л. Овчинников, Б.М. Лапшин, А.С. Чекалин, А.С. Евсиков
Томск, Россия*

В настоящее время для контроля герметичности трубопроводов широкое применение находят акустические течеискатели с корреляционной обработкой сигналов. Принцип действия этих приборов основан на пассивной локализации акустического шума (акустической эмиссии), возникающего при истечении жидкости через несплошность при наличии в трубе избыточного давления. Местоположение утечки определяется с помощью двух преобразователей, установленных на стенку трубопровода по обе стороны от предполагаемого места утечки. Время распространения сигнала до каждого из преобразователей различно и зависит от местоположения повреждения. Разность времен прихода шумовых сигналов (время задержки) может быть определена по максимуму функции взаимной корреляции, которая характеризует вероятностную связь значений процессов, разделенных интервалом времени.

Рис. 1 иллюстрирует принцип работы корреляционного течеискателя.

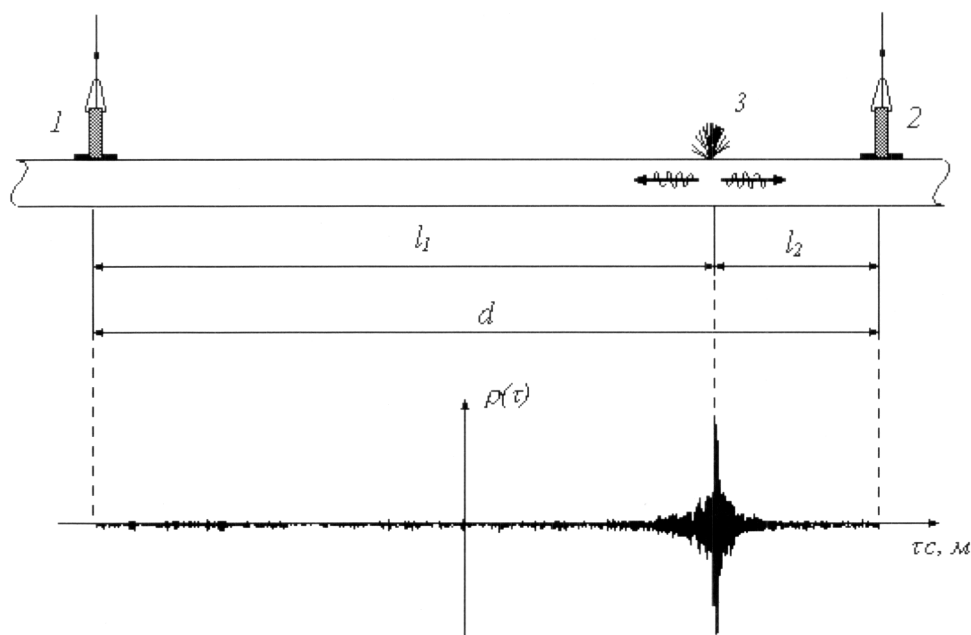


Рис. 1. Схема обнаружения утечки корреляционным методом

1, 2 – приемные преобразователи;

3 – утечка, l_1, l_2 – расстояние до утечки от датчиков 1 и 2 соответственно;

$\rho(\tau)$ – нормированная взаимокорреляционная функция, d – расстояние между датчиками;

τ – время задержки; c – скорость звука в трубопроводе

В соответствии с рис. 1 при известной скорости распространения акустических сигналов в трубопроводе и заданном базовом расстоянии между датчиками, расстояние до утечки определяется из простого соотношения:

$$l_{1,2} = \frac{d}{2} \pm \frac{c\tau}{2} \quad (1)$$

где величина задержки τ находится по максимальному значению функции взаимной корреляции:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2} (T - \tau)} \int_0^{T-\tau} x_1(t) x_2(t + \tau) dt \quad (2)$$

Здесь: T – время регистрации; $x_1(t)$ и $x_2(t)$ – сигналы, регистрируемые датчиками 1 и 2 соответственно, σ_{x_1} и σ_{x_2} – дисперсии сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$.

Представленная на рис. 1 корреляционная функция, имеет один четкий максимум, позволяющий однозначно с высокой точностью определить местоположение утечки. Однако на практике такой вид корреляционной функции встречается крайне редко, например, при регистрации сигналов распространяющихся по воздуху при отсутствии отражающих поверхностей. В большинстве же практических случаев корреляционная функция содержит много корреляционных максимумов, которые могут накладываться друг на друга, амплитуды отдельных максимумов могут изменяться во времени и зависеть от места установки датчика на трубе [1]. Таким образом, корреляционный максимум оказывается размытым. Это влечет за собой ошибку в измерении времени задержки, что приводит к снижению точности локализации, а иногда и к грубым просчетам.

Для точной локализации утечки в корреляционных течеискателях предусмотрена возможность фильтрации сигналов. В простейшем случае это набор полосовых фильтров с заданными характеристиками, как например, в приборах MicroCorr6 и LC2500, в более современных течеискателях характеристики фильтров устанавливаются на основе анализа спектров сигналов (Коршун-9) или взаимного спектра и функции когерентности (Т-2001, Correlux-P1). Не смотря на это, как показывают сравнительные испытания, проведенные АО «Мосводопровод», АО «Мосэнерго» и др. организациями, точность локализации приборов оказывается не всегда приемлемой, особенно при обнаружении утечки с небольшим расходом (десятки литров в час) [2].

Анализ особенностей распространения сигналов в трубах с жидкостью, показывает, что основными причинами размытия корреляционного максимума являются, наличие внешнего шума, возникновение в трубе стоячей волны, дисперсия скорости звука в трубопроводе и возбуждения в трубе нескольких мод колебаний. В разработанном нами корреляционном течеискателе ТАК-2005 реализована методика фильтрации акустических сигналов, позволяющая минимизировать эту составляющую погрешности. Суть предложенного метода заключается в выделении в спектрах сигналов узкой спектральной полосы, в которой функция когерентности максимальна и не имеет значительных провалов, а фаза взаимной спектральной плотности представляет собой пилообразную функцию, содержащую несколько звеньев, хорошо аппроксимирующихся линейной зависимостью. То есть в отличие от большинства современных течеискателей, в которых полоса пропускания фильтра устанавливается только по максимуму функции когерентности, нами анализируется еще и фаза взаимного спектра. Это позволяет минимизировать влияние многомодового характера распространения и наличия дисперсии скорости звука в трубе. Достигается это следующим образом. Как известно [3], в случае одного бездисперсионного тракта фаза взаимного спектра имеет вид линейной пилообразной функции. Поэтому, выделяя участки с линейной фазой, мы выбираем для анализа полосу частот, в которой сигнал утечки распространяется преимущественно по одному тракту.

Проверка предложенной методики проводилась на экспериментальной установке, которая состояла из заглушенного с торцов участка трубы длиной 68 м диаметром 100 мм. Утечка находилась на расстоянии 30 м от одного из торцов и моделировалась сквозным цилиндрическим отверстием диаметром 0,8 мм. Давление в трубопроводе создавалось путем подачи через буферный резервуар сжатого газа (азота). Давление в трубопроводе контролировалось манометром и во всех экспериментах поддерживалось равным 2 атм. Расход жидкости при этом составил 12 л/час. Во всех экспериментах расстояние между датчиками оставалось фиксированным и равнялось 34,5 м, а рас-

стояние от датчиков до утечки варьировалось от 0,5 до 27,5 м с шагом 1 м. На рис. 2 показана типичная корреляционная функция не фильтрованного сигнала.

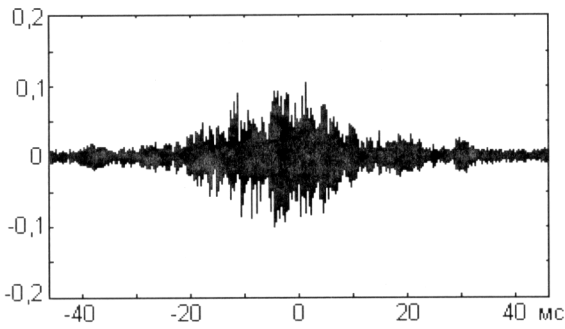


Рис. 2. Нормированная функция взаимной корреляции не фильтрованного сигнала

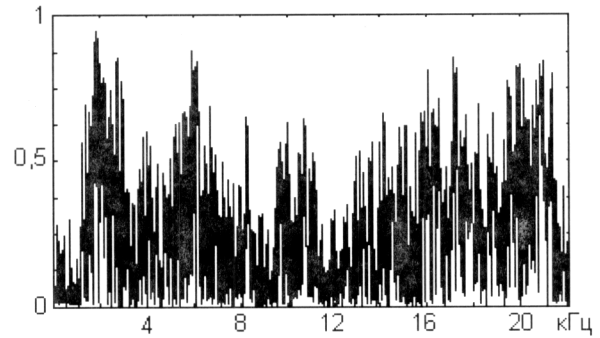


Рис. 3. Функция когерентности

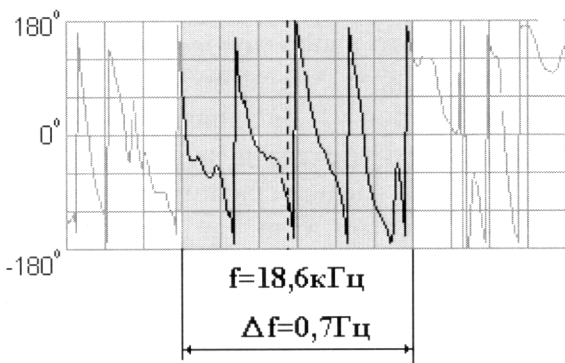


Рис. 4. Участок фазы взаимного спектра

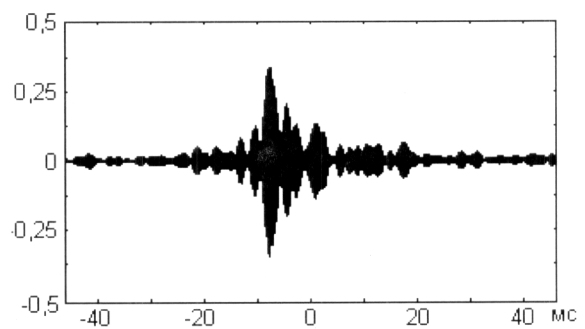


Рис. 5. Нормированная функция взаимной корреляции после фильтрации

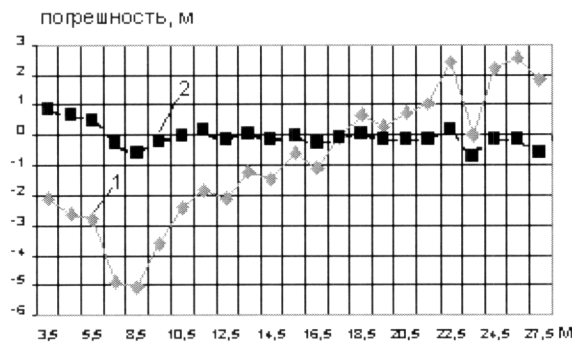


Рис. 6. Зависимость погрешности локализации от расстояния до утечки при различных значениях скорости звука (1 – $c=1250\text{м/с}$, 2 $c=1108\text{м/с}$)

Как и ожидалось, функция взаимной корреляции не фильтрованного сигнала содержит много максимумов, выделить среди которых максимум соответствующий точному местоположению утечки не представляется возможным. Применение полосовой фильтрации сигналов в полосе, в которой функция когерентности имеет максимальное значение, также не приведет к желаемому результату и лишено всякого смысла. Поскольку, как видно из рис. 3, зарегистрированные сигналы когерентны практически во всем частотном диапазоне. При анализе фазы взаимного спектра была найдена полоса (рис. 4), в которой фаза взаимной спектральной плотности представляла собой пилообразную функцию, содержащую несколько звеньев, которые хорошо аппроксимируются

линейной функцией. После проведения фильтрации сигналов в этой полосе корреляционная функция стала иметь один четкий максимум (рис. 5).

На рис. 6 представлены графики зависимости точности определения местоположения утечки от расстояния до нее, рассчитанные по формуле (1) при скорости звука определяемой скоростью Жуковского и экспериментальной скоростью полученной усреднением экспериментальных скоростей определенных в каждом опыте. Как видно из графика 1 (рис. 6) использование в расчетах теоретического значения скорости приводит к большой методической погрешности. В то время как при расчетах с использованием экспериментально измеренного значения скорости, погрешность локализации определяется случайными факторами (график 2, рис. 6). При этом в большинстве случаев погрешность не превышает 20 см. Исключение имеет место на больших расстояниях до утечки, что обусловлено наличием отражающих поверхностей.

Как следует из полученных результатов, недостатком данной методики локализации является неопределенность скорости звука в трубопроводе. Обусловлено это тем, что априорно неизвестно какая мода наиболее эффективно возбуждается и распространяется в трубопроводе. Поэтому при проведении контроля скорость звука необходимо предварительно измерить. Сделать это можно одним из трех известных способов: 1) расположить датчики по одну сторону от утечки, при этом измеренное время задержки будет равно времени прохождения сигналом базового расстояния; 2) провести два измерения при различных базовых расстояниях; 3) использовать внешний источник шума, который следует расположить на известном расстоянии. Все три рассмотренных способа измерения скорости звука реализованы в программном обеспечении прибора ТАК-2005.

Рассмотренная методика фильтрации сигнала неоднократно применялась нами в период испытаний прибора для поиска утечек в тепловых сетях ОАО «Томскэнерго». Ниже приведены результаты обнаружения утечек в наиболее типичных случаях.

1. Протяженный линейный участок с одним повреждением.

На рис. 7, *а-б* представлены взаимно-корреляционная функция и функция когерентности, полученные при поиске утечки на участке теплотрассы, расположенной на ул. Гоголя между улицами Никитина и Плеханова (г. Томск). Диаметр трубопровода – 500 мм длина обследуемого участка 132 м. Как видно из графиков, корреляционная функция имеет один четкий максимум, а функция когерентности отлична от нуля в диапазоне частот от 200 Гц до 2 кГц с максимумом на частоте 1 кГц. Фаза взаимного спектра хорошо аппроксимируется пилообразной функцией в диапазоне частот от 600 Гц до 1,5 кГц. После проведения фильтрации сигналов в указанных полосах смещение максимума корреляционной функции не происходит, однако увеличивается его амплитуда. Таким образом, применение рассмотренной методики фильтрации и методики основанной на анализе только функции когерентности не приводит к каким либо дополнительным преимуществам. Более того, в данном случае проведение фильтрации вообще не требуется.

2. Отвод от магистрального трубопровода.

В результате опрессовки тепловых сетей ООО «ТомскСтройТранс» был установлен факт разгерметизации системы. Для определения местоположения дефекта было проведено комплексное обследование всей сети и было обнаружено два повреждения (свищи диаметром менее 2 мм). Первое повреждение находилось на участке магистральной трубы длиной 126 м. Второе на отводе от магистрального трубопровода. Рассмотрим второй случай подробно. Отвод имел общую протяженность 60 м. Из них 33 м – подземный участок, 6 м – вертикальный участок внутри здания, 21 м – горизонтальный участок внутри здания. Диаметр трубы – 219 мм. Обследовался подземный участок. При этом один датчик устанавливался в камере, а второй – на вертикальный участок внутри здания, расстояние между датчиками составило 36 м. На рис. 8, *а* и *б* соответственно представлены полученные графики функции взаимной корреляции и функции когерентности.

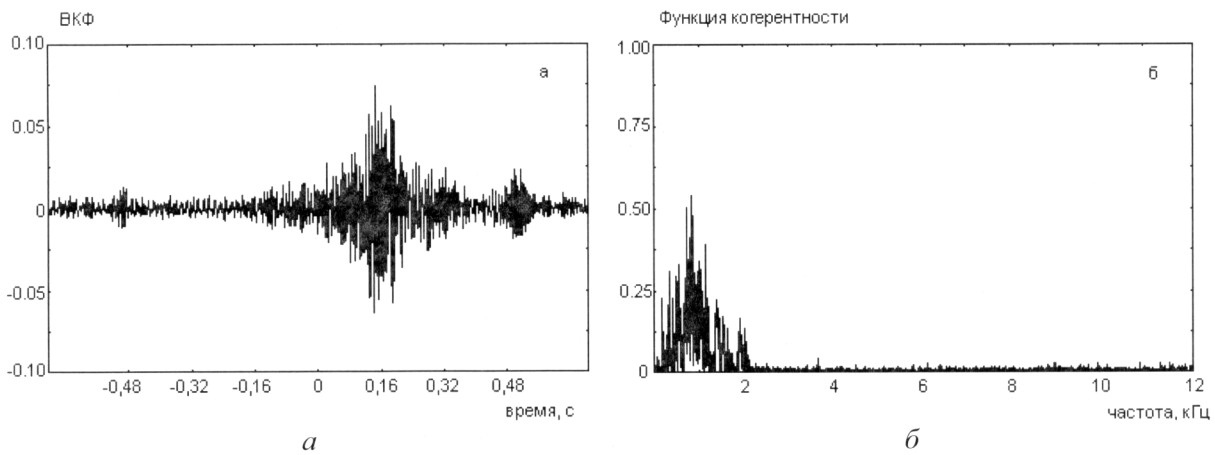


Рис. 7. Результаты поиска утечки на протяженном участке
a – функция взаимной корреляции; *б* – функция когерентности

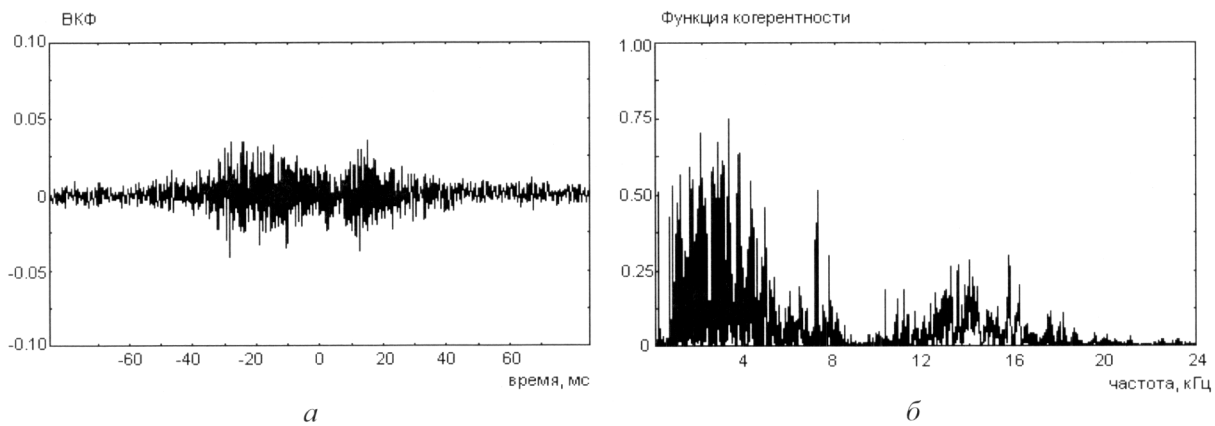


Рис. 8. Результаты поиска утечки на небольшом участке
a – функция взаимной корреляции; *б* – функция когерентности

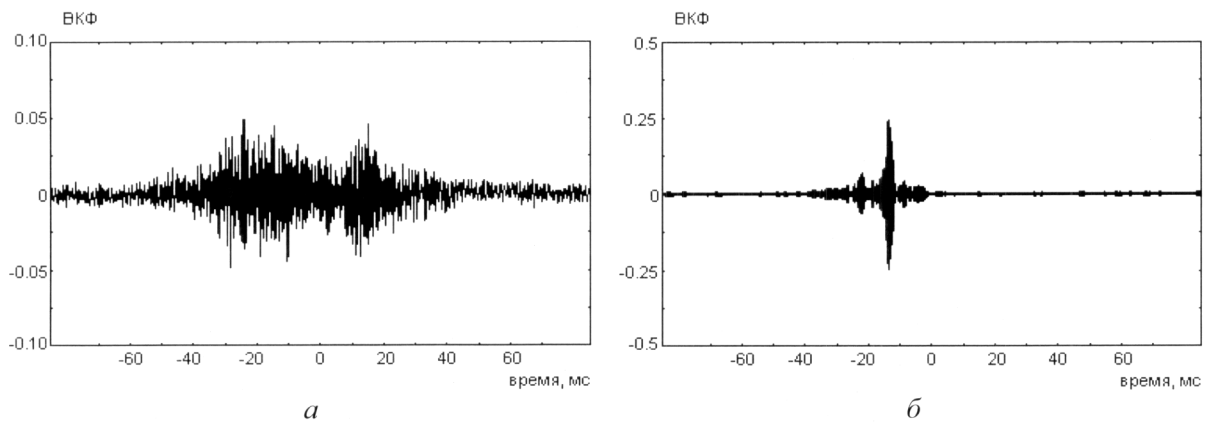


Рис. 9. Взаимно-корреляционные функции после фильтрации
a – в полосе 200–5000 Гц; *б* – в полосе 12–16 кГц

Как видно из рис. 8, *a* функция взаимной корреляции не имеет четкого максимума, по которому можно однозначно определить расстояние до утечки. Функция когерентности имеет наибольшее значение в диапазоне частот от 200 до 5000 Гц. Кроме этого имеется максимум в диапазоне частот 12–16 кГц. Следуя рекомендациям фирм ООО «Инкотест» и SebaDinatronіc для фильтрации сигнала, надо использовать полосу от 500 до 5000 кГц. Однако в этой полосе фаза взаимного спектра имеет сложную зависимость и весьма далека от линейной. С другой стороны в диапазоне

частот 12–16 кГц фаза хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. На рис. 9, *а* и *б* представлены корреляционные функции после фильтрации сигналов в полосе 500–5000 Гц и в полосе 12–16 кГц.

Как видно из рис. 9, *а* в результате фильтрации в полосе 500–5000 Гц внешний вид корреляционной функции мало изменился, в то время как после фильтрации в полосе 12–16 кГц взаимно-корреляционная функция стала иметь один четкий максимум. Локализация утечки по данному максимуму была проведена с точностью 20 см. Возможная ошибка в этом случае обусловлена не точным замером расстояния между датчиками и ошибкой при задании скорости, которая в процессе проведения контроля не измерялась.

3. Участок с двумя повреждениями

На рис. 10, *а–б* представлены взаимно-корреляционная функция и функция когерентности, полученные при поиске утечки на участке теплотрассы, расположенной на ул. Яковлева (г. Томск). Диаметр трубопровода – 500 мм длина обследуемого участка 110 м.

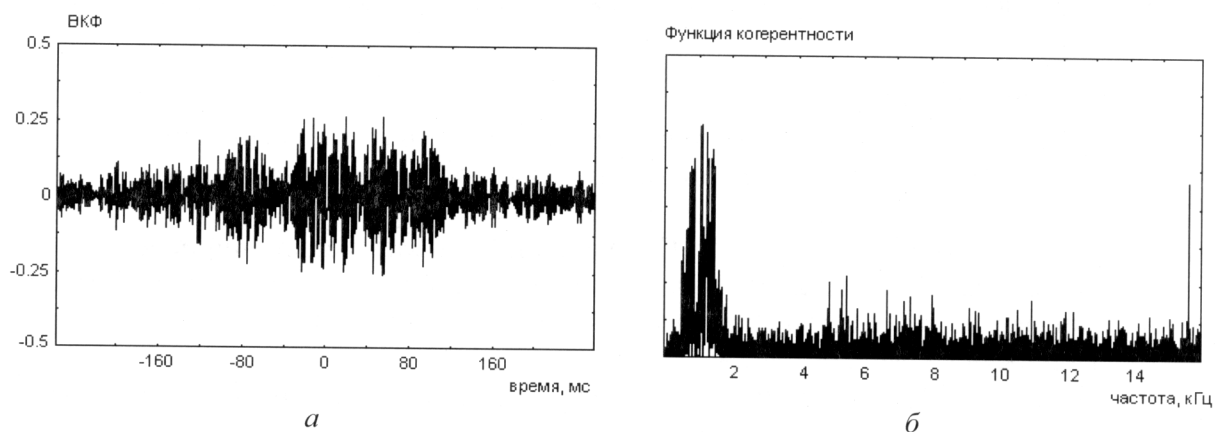


Рис. 10. Результаты контроля участка с двумя повреждениями: *а* – функция взаимной корреляции; *б* – функция когерентности

Как видно из графиков, корреляционная функция сильно размыта. При этом функция когерентности отлична от нуля в довольно узкой полосе частот от 400 Гц до 1600 Гц, что свидетельствует о наличии повреждения. Фаза взаимного спектра в этой полосе имела сложный вид сильно отличный от линейного. После проведения фильтрации в этой полосе внешний вид корреляционной функции не изменился. Однако при более детальном анализе фазы было обнаружено два участка, на которых фаза имела примерно одинаковую длину звеньев. Это участок шириной 240 Гц с центральной частотой 750 Гц и участок шириной 540 Гц с центральной частотой 1240 Гц. Корреляционные функции, полученные после фильтрации сигналов в этих полосах, представлены на рис. 11.

Как видно из приведенных графиков корреляционные функции имеют главные максимумы, которые могут быть выделены. Поскольку координаты отдельных максимумов на рис. 11, *а* и *б* не совпадают, было выдвинуто предположение о наличии двух повреждений. Расчеты расстояния до утечки по этим максимумам показали, что повреждения находятся на расстояниях 69 и 60 м. Однако при устранении аварии, поскольку главный корреляционный максимум на рис. 11, *а* не намного превышает боковые максимумы, было принято решение, что этот максимум ложный и имеется только одно повреждение на расстоянии 60 м. Вскрытие грунта в этом месте подтвердило наличие повреждения. Им оказался свищ примерно в 1 см диаметром. При этом по току воды в лотке было подтверждено наличие еще одной утечки. Вскрытие грунта на расстоянии 69 м также подтвердило наличие повреждения, которым оказалось сплошное коррозионное повреждение площадью более 1 м² с большим количеством мелких отверстий.

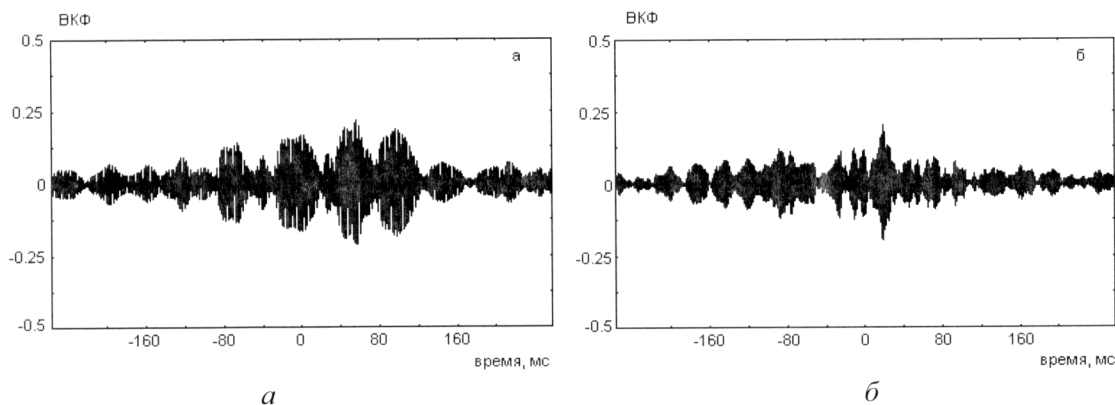


Рис. 11. Взаимно-корреляционные функции после фильтрации
 а – в полосе 630–870 Гц; б – в полосе 970–1510 Гц

Таким образом, проведенные испытания подтвердили эффективность используемой методики.

Список литературы

1. А.А. Владимирский, И.А. Владимирский, Д.Н. Семенов Уточнение диагностической модели трубопровода для повышения достоверности течеискания // Акустический вестник. – 2005. – Том 8. – № 3. – С. 3–16.
2. В.Н. Кольцов, А.Б. Косыгин, А.В. Половинкин Результат испытаний нового высокочувствительного корреляционного течеискателя // Тез. доклд. 3-й международной конференции «Не разрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». – М., 2004. – 246 с.
3. Дж. Бендат, А. Пирсол. Применение корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 240 с.

РАЗРАБОТКА ФОКУСИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НУЖНОЙ ФОРМЫ

*М.Г. Матвеевко, Б.И. Капранов
 г. Томск, Россия*

Статья посвящена вопросу изучения возможности контроля с помощью ультразвука внутренней поверхности обсадных труб с целью обнаружения язвенной коррозии, контроля геометрической формы, измерения остаточной толщины стенки.

При бурении скважин могут происходить аварии, связанные с поломкой элементов обсадной колонны. Установлено, что разрушения труб носят усталостный характер и являются следствием коррозионного износа, утонения, возникновения и развития трещин на этих участках при воздействии на колонну знакопеременных нагрузок.

Ликвидация аварий с обсадными колоннами – весьма сложный и трудоемкий процесс, особенно при большой глубине крепления.

Поэтому необходим контроль обсадных труб:

- необходим контроль коррозионного износа поверхности трубы;
- необходимо знать остаточную толщину трубы;
- необходимо знать искажения формы трубы как в вертикальном так и в горизонтальном направлениях.