

УДК 620.179.16

## УТОЧНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕЧЕЙСКАНИЯ

А. А. ВЛАДИМИРСКИЙ\*, И. А. ВЛАДИМИРСКИЙ\*\*, Д. Н. СЕМЕНЮК\*\*

\*Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины, Киев

\*\* Филиал “Энергоналадка” АК “Киевэнерго”,

Служба научно-технических разработок и диагностики энергооборудования

Получено 03.10.2005

Статья посвящена повышению достоверности определения мест утечек в подземных трубопроводах городских теплосетей с помощью корреляционных теческателей. Проанализирована диагностическая модель трубопровода, соответствующая алгоритмам работы и методике применения корреляционных теческателей. Приведены результаты поиска утечек, которые не поддаются объяснению в рамках этой модели. Представлены результаты экспериментов, направленных на выявление диагностически значимых особенностей распространения акустических волн по трубопроводам. На основе этих данных уточнена диагностическая модель трубопровода и представлены практические результаты ее использования, направленные на повышение достоверности результатов течейскания.

Статтю присвячено підвищенню достовірності визначення місць витоків у підземних трубопроводах міських тепломереж за допомогою кореляційних течешукачів. Проаналізовано діагностичну модель трубопроводу, яка відповідає алгоритмам роботи й методикам застосування кореляційних течешукачів. Наведені результати пошуку витоків, які не можна пояснити у рамках цієї моделі. Представлені результати експериментів, спрямованих на виявлення діагностично значимих особливостей поширення акустичних хвиль по трубопроводах. На базі цих даних уточнено діагностичну модель трубопроводу, представлені практичні результати її використання, спрямовані на підвищення достовірності результатів течешукування.

The paper deals with increasing reliability of leakage detection for underground municipal heat supply systems by the correlation leakage indicators. A diagnostic model of the pipe-line corresponding to operation algorithms and and techniques of leakage indicator use is analyzed. The results of leakage detection, which cannot be explained within this model, are shown. The results of the experiments intended for discovering the diagnostically significant features of acoustic wave propagation in the pipe-lines are presented. The diagnostic model of the pipe-line is improved on the basis of these data and practical results concerning its use for increasing the leakage detection reliability are presented.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных методов определения координат утечек в трубопроводах под давлением является корреляционный метод, который положен в основу работы теческателей, называемых корреляционными (КТ). Он обладает множеством достоинств [1–3], причем современный технический уровень приборостроения позволяет реализовывать простой базовый алгоритм измерений без существенных инструментальных погрешностей [4, 5]. Вместе с тем, несмотря на впечатляющую универсальность корреляционного метода, его применение нередко сопровождается существенными погрешностями определения координат утечек.

Ряд физических явлений, сопровождающих распространение волн по трубопроводам, акустические помехи снижают достоверность КТ [2, 3, 6, 7]. Математические модели распространения волн в цилиндрических оболочках с жидкостью представ-

лены в ряде известных работ [8–12]. Они также показывают, что между реальными физическими процессами и упрощенной моделью, подразумевающей успешное применение корреляционного метода, действительно существует значительный разрыв. Это приводит к наблюдаемым при работе с КТ декорреляции сигналов утечек, существенным вариациям в показаниях КТ при незначительной перестройке частотных фильтров, несоответствию изменений показаний КТ изменениям местоположения вибродатчиков и другим нежелательным, “непонятным” эффектам. Ввиду сложности приводящих к ним причин и многообразия условий применения КТ, развитие последних идет путем постепенного уточнения и усложнения диагностических моделей акустической обстановки и соответствующих им алгоритмов работы приборов.

Данная статья посвящена исследованиям в этом направлении повышения достоверности применения корреляционного метода.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 1.1. Исходная диагностическая модель акустической обстановки

Обычно при работе с КТ два его вибродатчика располагаются на поверхности диагностируемого участка трубопровода по обе стороны от утечки. Как правило, датчики размещают в имеющихся штатных местах доступа к трубопроводу, расстояние между которыми достигает нескольких сотен метров. Результатом поиска утечки с помощью КТ является расстояние  $L_u$  от одного из датчиков до утечки. В приборе оно вычисляется по формуле

$$L_u = \frac{L}{2} - \frac{\tau_0 v}{2}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между датчиками;  $v$  – скорость распространения вибросигналов по трубопроводу;  $\tau_0$  – разность времен прихода вибросигналов от утечки к датчикам. Величина  $\tau_0$  определяется по взаимной корреляционной функции (ВКФ)  $R_{AB}(\tau)$  сигналов от датчиков “А” и “В”, например, исходя из условия

$$R_{AB}(\tau_0) = \max_{\tau} (R_{AB}(\tau)). \quad (2)$$

Обычно диагностическая модель акустической обстановки и соответствующие ей характеристики КТ имеют следующие черты.

1. Полагается, что в месте истечения вырабатывается широкополосный стационарный случайный акустический шумоподобный сигнал. С этим связано удобство применения ВКФ шума утечки для определения величины  $\tau_0$ .
2. С ростом расстояния от утечки мощность сигнала на высоких частотах значительно затухает. Поэтому рабочий частотный диапазон КТ, пригодных для диагностики протяженных участков теплосетей, сверху обычно не выходит за пределы 15 кГц.
3. Как правило, при поиске утечки исходят из того, что доля мощности ее сигнала в регистрируемых вибросигналах превышает мощность сигнала от любого другого источника, имеющего постоянные координаты, т. е. именно утечка обеспечивает формирование выразительного статистически устойчивого максимального всплеска ВКФ. Исключение составляют случаи присутствия на поверхности трубопровода мощного акустического шума, поступающего с соседнего с диагностируемым

участка трубопровода. Часто такой шум приводит к появлению всплеска ВКФ, соответствующего области установки одного из датчиков, и по этому признаку источник шума классифицируется как “запредельный”.

4. Скорость  $v$  распространения вибросигналов утечек полагается известной. При работе на трубопроводах теплосетей учитывается зависимость скорости от диаметра и материала трубы, а также от температуры воды. Для уточнения скорости или длины диагностируемого участка трубопровода методиками применения КТ рекомендуется искусственное формирование вибросигналов на трубопроводе в месте с известной координатой  $L_u$ . При этом  $v$  либо  $L$  получают из соотношения (1).
5. В общем случае мощности вибросигналов утечек и помех в пределах рабочего диапазона частот течеискателя распределены неравномерно. Поэтому для получения выразительного всплеска ВКФ в течеискателях реализована возможность поиска диапазонов частот сигналов с наибольшим отношением сигнал/помеха. Для этого применяется частотная фильтрация сигналов и их ВКФ [13].
6. Алгоритмы обработки вибросигналов в основном ориентированы на учет и подавление присутствующих в двух приемных каналах КТ мощных (по сравнению с сигналами утечки) статистически слабо связанных между собой и с сигналами утечек помех, а также коррелирующих между собой узкополосных помех и помех с характерными спектрами (например, от вращающегося оборудования). Для этого применяются спектральный анализ, аналоговая и цифровая фильтрация, функция когерентности, алгоритмы автоматической настройки фильтров [13, 14].

На рис. 1 представлена схема типичного диагностируемого участка с канальной прокладкой. Как известно, ВКФ вибросигналов при поиске утечек предназначена для определения пространственного распределения мощности акустического шума участка между датчиками. Идеальную в этом смысле модель диагностируемого участка можно представить, как на рис. 2. Символ  $T$  обозначает фиксированную временную задержку распространения вибросигналов по трубопроводу;  $S_i(t)$  – собственные шумы трубопровода, источники которых равномерно распределены вдоль диагностируемого участка с интервалом  $\Delta_L = L/N$  метров;

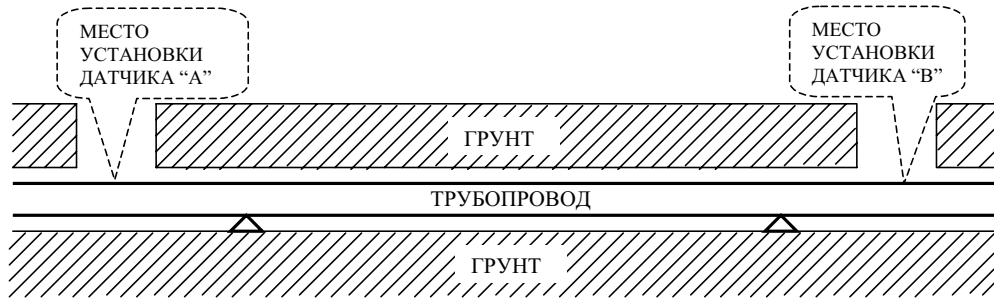


Рис. 1. Схема диагностируемого участка теплосетей

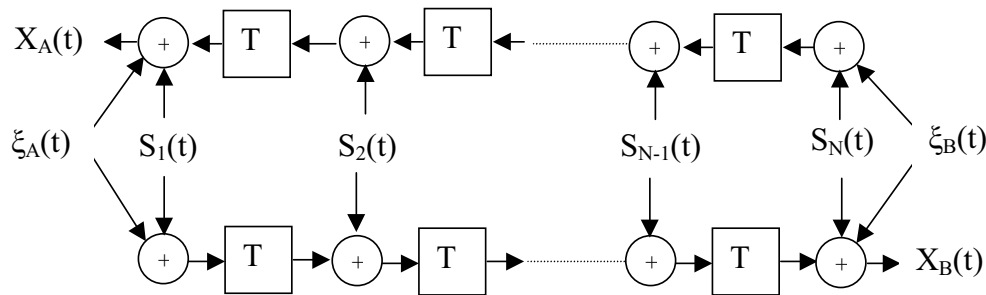


Рис. 2. Идеальная модель диагностируемого участка теплосетей

$\xi_A(t)$  и  $\xi_B(t)$  – шумы, поступающие на участок с соседних участков теплосетей соответственно слева и справа;  $X_A(t)$  и  $X_B(t)$  – вибросигналы, регистрируемые в местах установки датчиков “А” и “В” (рис. 1). Полагая все сигналы случайными (типа белого шума), ВКФ регистрируемых вибросигналов представим в виде

$$R_{AB}\left(\frac{L-2i\Delta_L}{v}\right) = \begin{cases} m(P_1+P_A) & \text{при } i=1, \\ mP_i & \text{при } i=2, \dots, N-1, \\ m(P_N+P_B) & \text{при } i=N. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $P_i$  – мощность шума  $S_i(t)$ ;  $L$  – длина диагностируемого участка между датчиками;  $v$  – скорость распространения вибросигналов по трубопроводу;  $P_A$  и  $P_B$  – мощности шумов  $\xi_A(t)$  и  $\xi_B(t)$  соответственно;  $m$  – постоянный коэффициент.

В отсутствие повреждения трубопровода ВКФ, соответствующая участку между датчиками “А” и “В”, имеет равномерно осциллирующий вид. Появление же сквозного свища в каком-либо месте  $j$  ( $1 \leq j \leq N$ ) трубопровода с избыточным давлени-

ем резко меняет акустическую обстановку и вносит дополнительную мощность в сигнал  $S_j(t)$ . Это приводит к тому, что  $P_j > P_i$  и, как следствие,

$$R_{AB}(j) > R_{AB}(i) \quad \text{для } i = \begin{cases} 2, \dots, j-1, \\ j+1, \dots, N-1. \end{cases} \quad (4)$$

Координаты  $i=2$  и  $i=N-1$  соответствуют доступным для визуального контроля диагностируемого участка местам установки датчиков. В результате координата утечки определяется как расстояние  $L_A$  от датчика “А”:

$$L_A = \frac{L}{2} - \frac{jTv}{2}, \quad (5)$$

где для  $j$  выполняется условие

$$R_{AB}(j) = \max_i R_{AB}(i) \quad \text{для } i=2, \dots, N-1. \quad (6)$$

Превышение значений  $R_{AB}(1)$  или  $R_{AB}(N)$  над основным уровнем ВКФ означает поступление на диагностируемый участок акустического шума с соседних участков трубопровода. При поиске утечек регистрация наличия такого “запредельного” шума важна по следующим причинам.

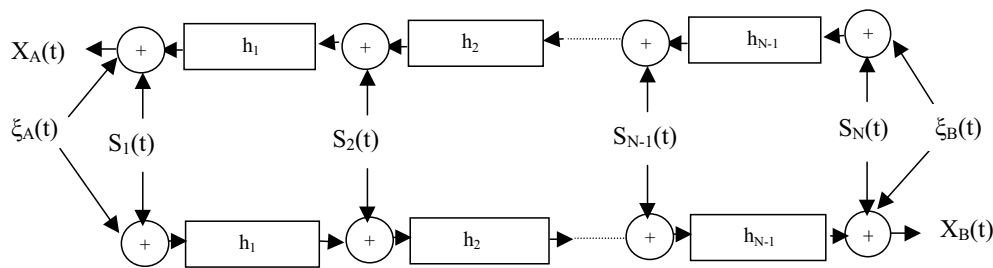


Рис. 3. Модель диагностируемого участка теплосетей с учетом частотной зависимости параметров канала распространения вибросигналов

- Диагностируемый участок может быть выбран неверно и утечка находится на соседнем участке трубопровода со стороны того из двух датчиков, месту установки которого соответствует всплеск ВКФ шума от “запредельного” источника.
- На соседнем с диагностируемым участке тоже могут быть утечки либо посторонние источники шума. Учитывая ограниченность динамического диапазона входных сигналов КТ, из-за мощного “запредельного” шума прибор может оказаться нечувствительным к более слабым акустическим шумам утечек в пределах диагностируемого участка. В этих случаях “запредельные” шумы устраняются, после чего ВКФ вибросигналов вновь определяется и анализируется.

Рис. 2 совместно с формулами (3) – (6) отражает идею применения ВКФ как средства определения мощности источника шума в зависимости от его пространственной координаты.

Практическое применение корреляционного метода приводит к необходимости учета отличий реального диагностируемого участка от его идеальной модели, например, в виде, приведенном на рис. 3. Здесь символом  $h_i$  обозначено действие линейной фильтрации. Полагается, что неоднородности на пути распространения вибросигналов от утечки к датчикам не должны приводить к нарушению условия

$$\eta_i(w) \approx \eta_j(w) \approx Tw$$

для всех  $i, j = 1, \dots, N - 1, T = \text{const},$

где  $\eta_i(w)$  – фазо-частотная характеристика (ФЧХ) в общих для всех фильтров полосах пропускания. При этом  $\eta_i(w)$  во всем рабочем диапазоне частот КТ могут быть нелинейными.

Рассматриваемая модель, в отличие от модели рис. 2, в простейшем виде отражает реальные фи-

зические особенности канала распространения вибросигналов, такие как зависимость скорости от частоты, резонансные свойства, затухание и размывание во времени формы вибросигналов с их удалением от источника акустического шума. Указанные свойства, а также пространственная распределенность повреждения, акустическая связь между ближайшими источниками шумов  $S_i$  и их частотная окраска приводят к влиянию на  $R_{AB}(j)$  не только шума  $S_j(t)$ , но и шумов от ближайших источников, что нарушает строгость выполнения свойства (3) и следственной связи в формуле (4). В связи с этим важным для течеискания признаком действительного выполнения условия (4) является выразительность максимума ВКФ  $R_{AB}(j)$ . Ее можно представить в виде отношения сигнал/помеха, принимая в качестве сигнала величину  $R_{AB}(j)$ , соответствующую результату линейной фильтрации ВКФ, для которого выполняется зависимость (6), а в качестве помехи – остальные ее значения. Тогда можно воспользоваться формулировкой классической задачи радиотехники о синтезе согласованного фильтра [15]: необходимо синтезировать такой фильтр, который бы обеспечивал на выходе наибольшее возможное отношение пикового значения сигнала к среднему квадрату помехи. В КТ задача в подобной формулировке решается либо с помощью ручной настройки частотных фильтров (в рамках наложенных на их характеристики ограничений), либо путем автоматического выполнения процедуры синтеза фильтра в специальных режимах работы приборов [14]. Следует, однако, отметить, что наряду с привлекательностью реализации в КТ автоматических процедур настройки фильтров, их применение при поиске утечек носит весьма ограниченный характер. Среди основных следует назвать две причины, приводящие к неверным результатам работы “автоматов”:

- “ложные” утечки в виде источников шумов с

характеристиками, подобными характеристикам шумов утечек (шумы в задвижках, элеваторах, сальниковых компенсаторах);

- распространение вибросигналов по трубопроводам в виде нескольких соизмеримых по мощности волн.

Ни в одном из известных авторов КТ автоматическая настройка фильтров полностью не заменяет ручную или полуавтоматическую.

Далее будет показано, что при диагностике отечественных теплотрасс принципиальным преимуществом перед частотной фильтрацией вибросигналов обладает пространственная селекция полезных сигналов, даже в простейшем ее виде.

## 1.2. Особенности поиска утечек в теплосетях и связанная с ними неточность КТ

Вновь обратимся к рис. 1, на котором представлена схема типичной канальной прокладки трубопровода тепловых сетей в г. Киеве. Трубопровод проложен в каналах из железобетонных коробов или блоков и покоится на подвижных и неподвижных опорах. Отсутствие демпфирования трубопровода грунтом (за исключением мест заиливания канала) способствует распространению вибросигналов утечки на значительные дистанции. Как правило, избыточное давление в трубопроводе составляет не менее 2 атм. Для магистральных теплосетей типичное давление в подающем трубопроводе составляет около 9 атм, а в обратном – 3 ÷ 6 атм. Расстояние между местами доступа к трубопроводу обычно не превышает 300 м. Данные особенности теплосетей приводят к тому, что шумы течи, как правило, отчетливо регистрируются вибродатчиками КТ на практически необходимых расстояниях. Однако ВКФ вибросигнала часто имеет размытый, многоэкстремальный вид. Интервал корреляции в пересчете на расстояние достигает нескольких десятков метров. Реальная ВКФ имеет сложную частотно-временную структуру, как бы состоящую из нескольких ВКФ, в разной степени перекрывающих друг друга по частоте. Определяемая по ее максимуму координата утечки может существенно меняться при незначительной перестройке фильтров КТ или изменении положения вибродатчиков на трубопроводе. В некоторых случаях ВКФ вообще не имеет выраженного интервала корреляции (см. ниже в разделе 2.2).

Все это говорит в пользу того, что в составе регистрируемых вибросигналов кроме сигналов, присутствие которых предусматривает обычная

модель диагностируемого участка (раздел 1.1), присутствуют другие мощные шумы, вызванные утечкой. В зависимости от каких-то условий они либо образуют свои ВКФ в составе ВКФ вибросигнала, либо способствуют его декорреляции. В любом случае, речь идет о мощных коррелированных помехах, которые серьезно затрудняют поиск утечек в тепловых сетях.

Представленная в разделе 1.1 модель диагностируемого участка не учитывает этих особенностей и нуждается в уточнении и развитии.

## 2. ПРИЧИНЫ НЕТОЧНОСТИ КТ

### 2.1. Отклик участка трубопровода на удар

Для выяснения причин неточности КТ рассмотрим результаты некоторых экспериментов, проведенных на действующих трубопроводах теплосетей г. Киева.

На рис. 4 представлены зарегистрированные вибродатчиками сигналы – отклики участка трубопровода на механический удар [7]. Верхний отклик зарегистрирован на расстоянии 2.45 м, а нижний – 152 м от места удара. Вид дальнего отклика указывает на сложную частотно-временную структуру и позволяет предположить присутствие нескольких негармонических волн.

На рис. 5 представлен результат линейной фильтрации дальнего отклика двумя полосовыми фильтрами с линейной фазо-частотной характеристикой. Полосы пропускания фильтров не пересекаются по частоте и занимают диапазоны частот 2920÷3820 Гц и 680÷820 Гц. Степень подавления сигнала за пределами полос пропускания фильтров не хуже –60 дБ. Результаты представлены с компенсацией задержек, внесенных в исходные сигналы групповыми задержками фильтров, а максимумы откликов и основные части энергий результатов фильтрации разнесены во времени. С увеличением расстояния от места удара задержка между максимумами растет.

По известному определению [16] “... любую негармоническую волну можно представить в виде группы эквивалентных гармонических волн, которую, если она в каждый момент времени занимает ограниченную область пространства, называют волновым пакетом”. Известно также, что “суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, называется волновым пакетом или группой волн” [17]. Картины, наблюдаемые на рис. 5, отвечают определениям волновых пакетов, если не слишком строго понимать условие “... мало отличающихся друг от друга по частоте...” [16].

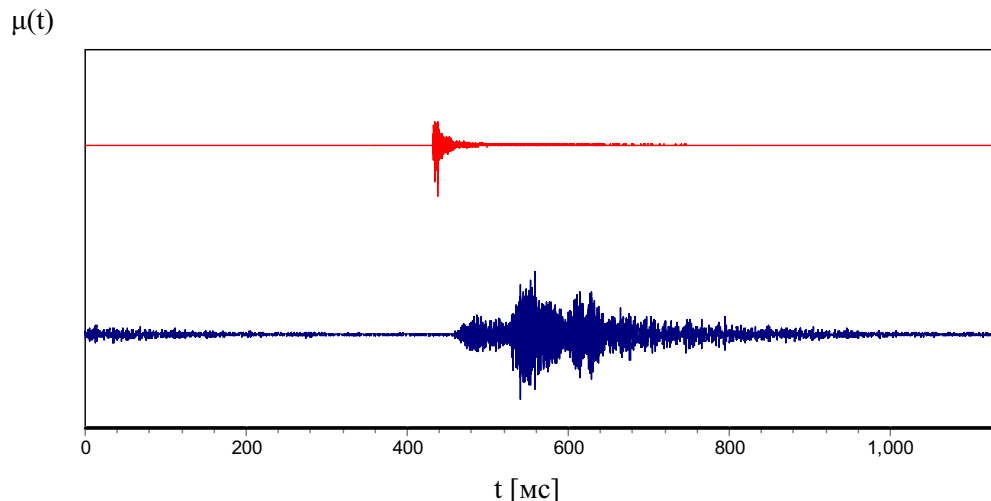


Рис. 4. Отклики участка трубопровода на механический удар

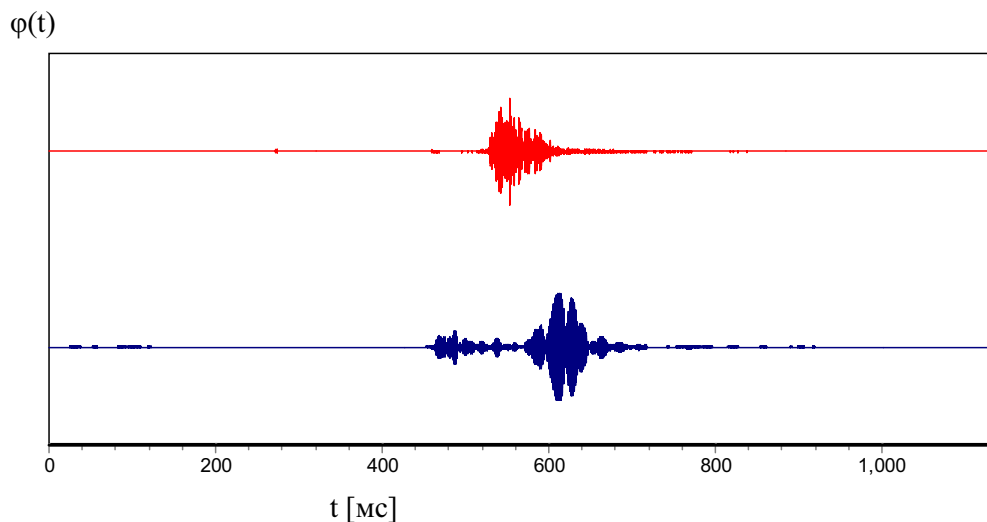


Рис. 5. Результат линейной фильтрации далекого отклика двумя полосовыми фильтрами с линейной ФЧХ

Признаком достоверного показания корреляционного течеискателя является статистическая устойчивость и выразительность экстремума ВКФ. В наибольшей степени выполнить эти условия можно с помощью обработки широкополосных волновых пакетов. Под волновым пакетом будем понимать некоторые компактные в частотном и временном измерениях образования, которые присутствуют в регистрируемых вибросигналах и обуславливают вид ВКФ этих сигналов. Волновой пакет характеризуется двумя основными наблюдаемыми параметрами – полосой занимаемых

частот и групповой задержкой. Допускается существование постоянной групповой скорости волнового пакета на протяжении всего времени его распространения вдоль диагностируемого участка. Эксперименты подтверждают это предположение.

Известно, что “при волновом движении различают... скорость перемещения фронта волны, которую называют волновой или фазовой скоростью; групповую скорость нескольких волн (волнового пакета), определяемую как скорость распространения амплитуды максимума наложения этих

волн” [16]. Важнейшим для корреляционного те-  
чеискания, по-видимому, является понятие груп-  
повой скорости, поскольку именно она характери-  
зует распространение основной мощности, сосре-  
доточенной вокруг максимумов волнового пакета,  
на достаточные для практического применения  
КТ расстояния.

В проведенных экспериментах в вибросигнале  
присутствовало несколько соизмеримых по мощ-  
ности волновых пакетов с разными значениями  
групповых скоростей. Вследствие этого ВКФ при-  
обретала размытый вид. В сигналах фиксирова-  
лось до четырех соизмеримых по мощности вол-  
новых пакетов, определяющих вид откликов диа-  
гностируемого участка на удар. Скорости распро-  
странения волновых пакетов различались до 40 %,  
вследствие чего задание в формуле (1) средней  
для всех волновых пакетов скорости  $v$  приводило  
к значительным погрешностям при определе-  
нии координат источника. Отметим также, что со-  
отношение мощностей волновых пакетов в реги-  
стрируемых откликах зависит от местоположения  
вибродатчика. Это может служить причиной чув-  
ствительности показаний КТ к месту съема вибро-  
сигнала с поверхности трубопровода.

Для определения связи между структурой си-  
гнала и отклика трубопровода на удар и корреля-  
ционной функцией вибросигналов допустим, что  
вибродатчики установлены на трубопроводе на  
расстоянии  $L$  один от другого, а источник находи-  
тся на трубопроводе между датчиками. Предста-  
вим зарегистрированные отклики на удар в виде

$$\mu_A(t) = \sum_{j=1}^J \varphi_{Aj} \left( t - \frac{L_A}{v_j} \right),$$

$$\mu_B(t) = \sum_{j=1}^J \varphi_{Bj} \left( t - \frac{L_B}{v_j} \right),$$

где  $\varphi_{Aj}(t = L_A/v_j)$  и  $\varphi_{Bj}(t = L_B/v_j)$  – зареги-  
стрированный соответственно на расстоянии  $L_A$  и  $L_B$   
от источника волновой пакет; для  $L_A$  и  $L_B$  выпол-  
няется условие  $L_A + L_B = L$ .

Если источником является утечка, то регистри-  
руемые вибросигналы можно представить в виде

$$x_A(t) = \sum_{j=1}^J \int_0^{\infty} U \left( t - T_A - \frac{L_A}{v_j} \right) \varphi_{Aj}(T_A) dT_A, \quad (7)$$

$$x_B(t) = \sum_{j=1}^J \int_0^{\infty} U \left( t - T_B - \frac{L_B}{v_j} \right) \varphi_{Bj}(T_B) dT_B, \quad (8)$$

где  $U(t)$  – широкополосный случайный сигнал уте-  
чки.

Предположим, что волновые пакеты не пере-  
крывают друг друга по частоте. В этом случае  
связь корреляционной функции сигнала утечки  
 $R_U(\tau)$  с ВКФ регистрируемых сигналов, с учетом  
соотношений (7) и (8), можно представить в виде

$$R_{AB}(\tau) = E[x_A(t)x_B(t+\tau)] =$$

$$= \sum_{j=1}^J \int_0^{\infty} \varphi_{Aj}(T_A) \int_0^{\infty} \varphi_{Bj}(T_B) \times$$

$$\times R_U \left( T_A - T_B + \frac{L_A - L_B}{v_j} + \tau \right) dT_A dT_B. \quad (9)$$

Поскольку полоса частот, которую занимает  
 $R_U(\tau)$ , значительно больше ширины полос частот,  
занимаемых  $\varphi_{Aj}(T_A)$  и  $\varphi_{Bj}(T_B)$ , то, вследствие  
малого интервала корреляции,  $R_U(\tau)$  слабо влия-  
ет на форму функции  $R_{AB}(\tau)$ . Поэтому уравне-  
ние (9) можно представить в виде

$$R_{AB}(\tau) \approx \sum_{j=1}^J \psi_j \left( \frac{L_A - L_B}{v_j} + \tau \right),$$

$$\psi_j \left( \frac{L_A - L_B}{v_j} + \tau \right) = P_u \int_0^{\infty} \varphi_{Aj}(T_x) \times$$

$$\times \varphi_{Bj} \left( T_A + \frac{L_A - L_B}{v_j} + \tau \right) dT_A, \quad (10)$$

где  $P_u$  – мощность сигнала утечки.

Из последнего соотношения следует, что опреде-  
ление задержек между вибросигналами, которые  
принимаются двумя вибродатчиками, можно осу-  
ществлять по максимуму  $\psi_j(\tau)$  для любого  $j$  [7]:

$$\psi_j(\tau_{j0}) = \max_{\tau} \{ \psi_j(\tau) \}.$$

При этом координата источника формирования  
вибросигналов вычисляется по формуле, подобной  
выражению (1):

$$L_j = \frac{L}{2} - \frac{\tau_{j0} v_j}{2}.$$

Вычисление координаты утечки по нескольким  
волнам дало бы возможность уточнить местопо-  
ложение источника вибросигналов. Это можно сде-  
лать, например, путем усреднения величин  $L_A$ , со-  
ответствующих каждой из ВКФ волновых пакето-  
в. Однако реализация этого подхода затрудне-  
на отсутствием практического способа определения  
и однозначного соотношения конкретной величины  
скорости распространения с каждым из наблюдае-  
мых волновых пакетов. Вместе с тем, как правило,

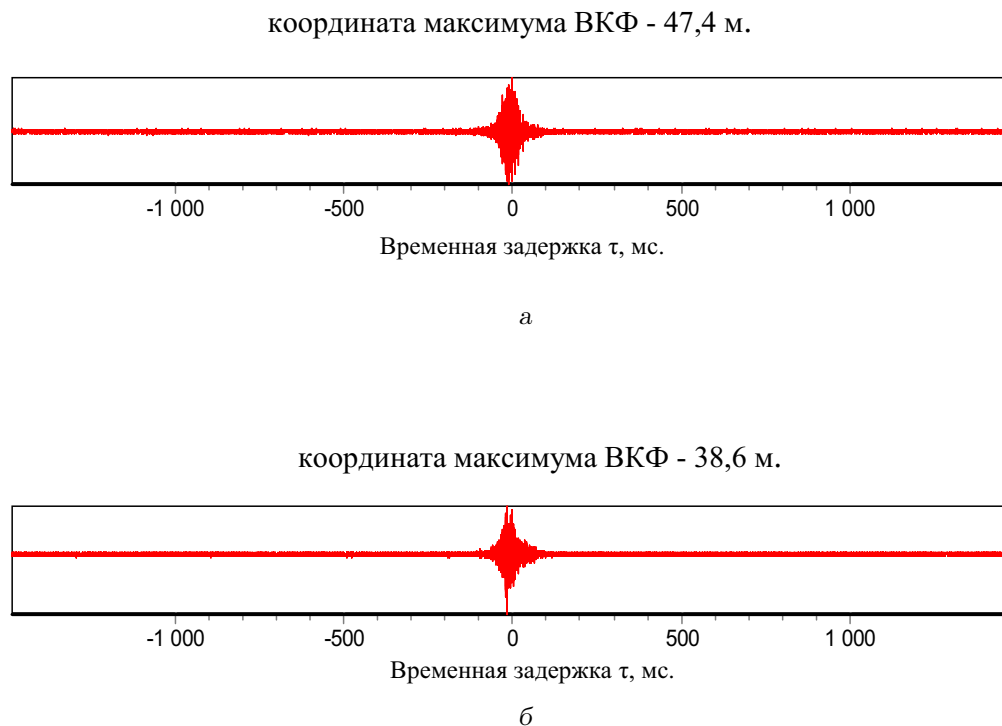


Рис. 6. ВКФ вибросигналов при различных положениях вибродатчиков на концах диагностируемого участка

удается выделить ВКФ вибросигналов, формируемых широкополосной и наиболее мощной акустической волной, распространяющейся с известной скоростью, используя неравномерность пространственного распределения волновых пакетов (и мощностей соответствующих акустических волн) в области, доступной для установки датчика. Сделать это можно, вычисляя несколько ВКФ для различных положений датчиков с последующим выбором наиболее достоверного результата. Приведем примеры.

## 2.2. Примеры повышения достоверности определения координат утечек

### Пример 1

Поиск утечки производился 30.03.2001 в г. Киеве, на участке теплотрассы по адресу Краснозвездный проспект, 115. Диаметр трубопровода составлял 800 мм, давление в подающей трубе – 9 атм, в обратной – 6 атм, температура теплоносителя в подающей трубе 70°С, в обратной – 45°С. Каждая из труб проложена в своем коробе. Участок теплотрассы имел два поворота на 120°. На каждой трубе на обоих концах диагностируемого участка в теплокамерах подготовлены по два места для вибродатчиков. На рис. 6, а и б показаны графики ВКФ

вибросигналов, полученные с помощью течеискателя К-10.2 при различных положениях вибродатчиков в теплокамерах по обе стороны от утечки. Друг от друга эти результаты отличаются выразительностью максимального всплеска ВКФ, шириной занимаемой им полосы частот и ее положением на оси частот. Видно, что смещение вибродатчика от первоначального положения не более чем на 1 м привело к смещению координаты максимума ВКФ на расстояние более 8 м. Координата утечки 38,6 – истинная, что подтверждено разрытием теплотрассы. Координата – 47,4 м ложная. Это значит, что при поиске утечек по обычной методике, включающей одно измерение, попадание или непопадание указанной координаты на утечку случайным образом зависит от того, в какие места на трубопроводе установлены вибродатчики!

Выбор ВКФ с наиболее достоверной координатой из вычисленных при разных положениях вибродатчиков ВКФ осуществлялся по наибольшей выразительности корреляции (по наибольшему отношению сигнал/помеха, раздел 1.1).

### Пример 2

Поиск утечки происходил 22.10.2001 в г. Киеве на участке теплотрассы по адресу ул. Ереванская, 29.



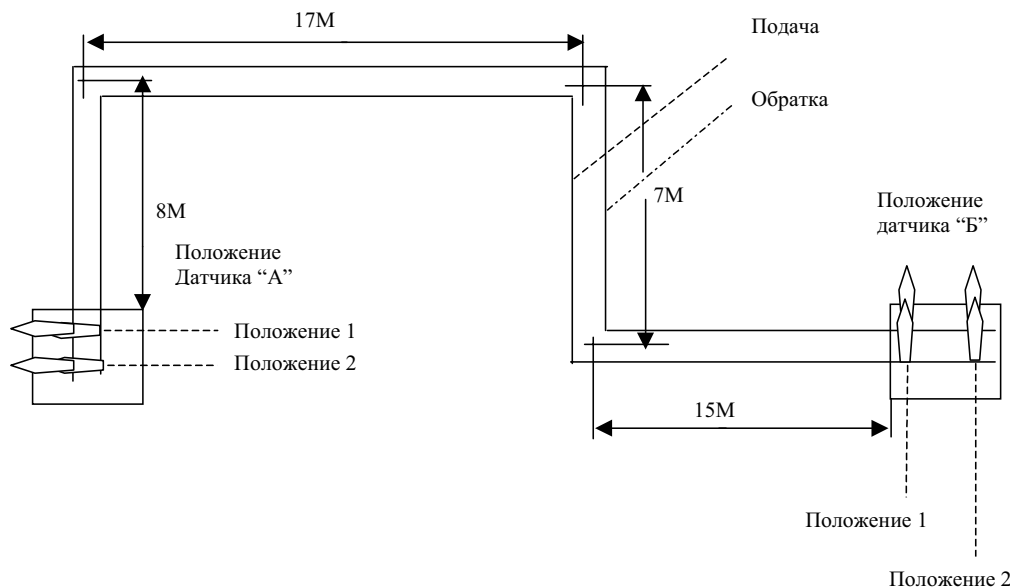


Рис. 7. План диагностируемого участка трубопровода

Диаметр труб составлял 89 мм, давление в подающем трубопроводе – 8.6 атм, в обратном – 3.5 атм. Трубы проложены в общем коробе. Участок имеет три поворота на 90°, в теплокамерах трубы идут вплотную к грунту и частично покрыты землей. На каждой трубе подготовлены по два места для датчиков в обеих теплокамерах (рис. 7).

На рис. 8 представлены ВКФ вибросигналов, полученные с помощью корреляционного течеискателя К-10.2 при различных положениях вибродатчиков на трубопроводе (рис. 6). Расстояние между позициями датчиков в теплокамерах составляет 1 и 1.5 м. На рис. 8, а – в показаны ВКФ, соответствующие неудачным позициям датчиков. На рис. 8, г показан результат цифровой фильтрации ВКФ с рис. 8, в. Несмотря на более точное значение координаты утечки, эта ВКФ также не имеет четко выраженного интервала корреляции и поэтому непригодна для принятия окончательного решения. Совершенно иная картина наблюдается на рис. 8, д, где представлена ВКФ, полученная после сдвига датчиков к дальним друг от друга стенкам теплокамер.

Результаты обследования шума на поверхности грунта над диагностируемым участком с помощью акустического течеискателя А-10 подтвердили координату утечки, вычисленную по ВКФ на рис. 8, д. По отзывам персонала филиала «Тепловые сети» АК «Киевэнерго» местоположение утечки было указано верно.

### 3. УТОЧНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

Одним из характерных препятствий на пути распространения вибросигналов утечек в практике течеискания считаются разъединения сплошной связи между секциями труб. В тепловых сетях разъединения применяются в конструкциях компенсаторов, представляющих собой вставку секции трубы в разрыв основной магистрали с уплотнителем из упругого материала (например, резины). Компенсаторы достигают нескольких метров в длину, предназначены для компенсации температурных колебаний длины секций трубопроводов и присутствуют в местах доступа почти во всех случаях диагностики магистральных теплотрасс. При фиксации вибродатчиков на трубопроводе стремятся исключить попадание компенсаторов в диагностируемый участок. Это резко ограничивает физически доступное для установки датчиков место, поскольку в пределах теплокамеры компенсатор занимает до 80 % поверхности трубопровода. При благоприятных температурных условиях выбор и подготовка места установки датчика в теплокамере, в зависимости от вида теплоизоляции и удобства доступа к выбранному месту, занимает 2 ÷ 10 мин. Заметим, что при порыве теплотрассы температура окружающей среды в теплокамере может достигать 70°C и более. Это делает опасным присутствие человека внутри камеры

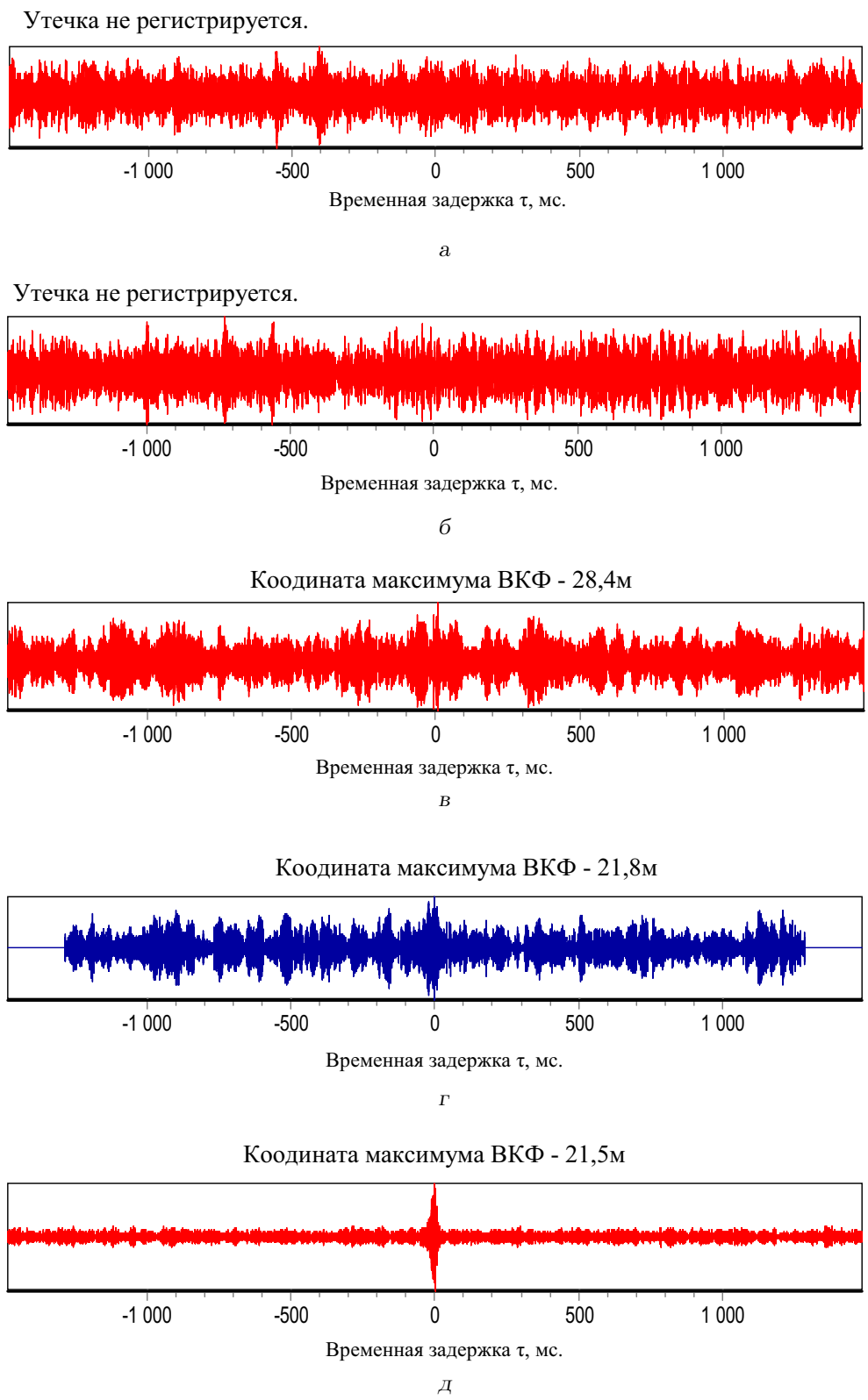


Рис. 8. Виды ВКФ вибросигналов, полученные при различных положениях вибродатчиков в теплокамерах:  
а-г – промежуточные результаты, д – конечный результат



Рис. 9. Схема эксперимента по изучению прохождения волн через сальниковый компенсатор

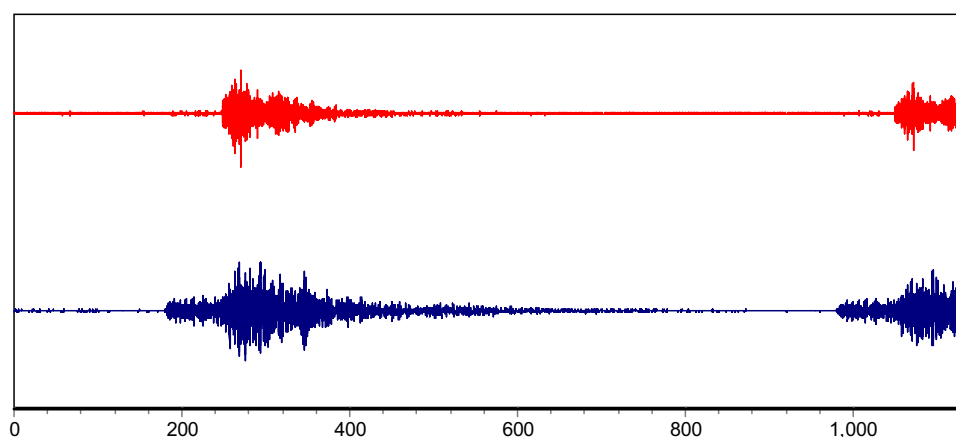


Рис. 10. Отклики диагностируемого участка на удар: до и после компенсатора

и резко ограничивает время, отводимое на выбор мест для датчиков. Поэтому возникает вопрос о допустимости в критических условиях включения компенсатора в диагностируемый участок, между датчиками КТ.

В связи с этим 18.06.1998 года в г. Киеве по ул. Красногвардейской был поставлен эксперимент, целью которого являлось изучение влияния компенсатора на параметры вибросигналов и их ВКФ [18]. Диаметр трубопровода составлял 800 мм. В первом случае два датчика разместили в одной теплокамере по обе стороны от компенсатора. Для того, чтобы избежать влияния ближней зоны ударов на форму откликов, источник вибросигналов был размещен в другой теплокамере на расстоянии 152 м. Схема эксперимента приведена на рис. 9. Вид сигналов-откликов представлен на рис. 10. Усиление обоих сигналов одинаковое.

Сравнение откликов показывает, что компенсатор “разделил” волновые пакеты отклика на две группы. Волновые пакеты первой группы плохо преодолевают компенсатор (ослабляются примерно в 5 раз) и распространяются со скоростями,

близкими к скоростям упругих волн в металле. Волновые пакеты второй группы хорошо преодолевают компенсатор (по наблюдениям они ослабли примерно в 1.1 раза) и распространяются с фазовыми скоростями, близкими к скоростям звука в воде. Из-за сильного затухания волны первой группы представляют для поиска утечек незначительный интерес, поэтому при составлении диагностической модели трубопровода учитывать их не будем. Волновые пакеты второй группы можно упрощенно представить как результат линейной фильтрации импульса удара, распространяющегося с фазовой скоростью звука в воде, набором полосовых фильтров с различными групповыми задержками. Величины задержек пропорциональны пройденному импульсом пути, который можно представить как порядок фильтра.

Представление о распространении волн по различным модам как о распространении сигналов по линейным фильтрам опирается на понятия, хорошо знакомые широкому кругу инженерно-технического персонала, занятого разработкой и применением течейскаателей. Несмотря на значи-

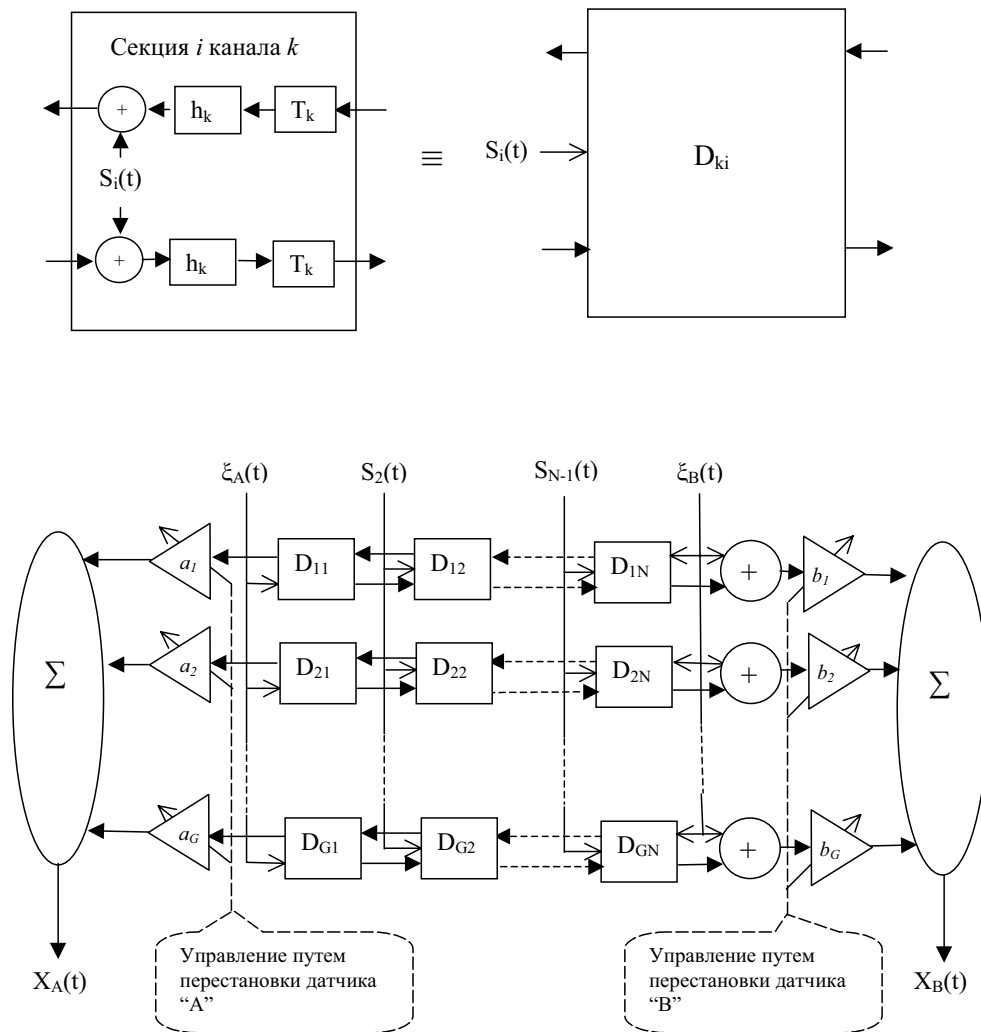


Рис. 11. Модель диагностируемого участка с учетом зависимости скорости от частоты, многоволнового распространения вибросигналов и пространственной неравномерной чувствительности датчиков к различным волнам

тельную упрощенность этого подхода, польза от него еще далеко не полностью используется в широкой практике диагностики трубопроводов. Этим объясняется интерес к разработке в исследуемой области линейных моделей [11, 18].

Развитие диагностической модели рис. 2, учитывающее распространение шума течи в виде нескольких волн и неоднородную пространственную чувствительность датчиков к ним, приводит к модели, изображенной на рис. 11. Символом  $T_k$  обозначена временная задержка. В этой модели собственные шумы диагностируемого участка в местах установки датчиков не приняты во внимание из-за их незначительности. Неравномерная про-

странственная чувствительность датчиков к разным волнам отражена в виде коэффициентов передачи  $a_i$  и  $b_i$  между  $i$ -ой волной (“строкой” фильтров) и датчиком. Связь между “строками” фильтров, имитирующими распространение отдельных волн, в данной модели присутствует только в местах съема вибросигналов по следующим двум причинам:

- этой связью можно “управлять” путем пространственной селекции вибросигналов;
- при сильном перемешивании волн в процессе их распространения различия между ними на

концах диагностируемого участка не наблюдались бы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований важных для КТ особенностей распространения виброакустических волн по трубопроводам теплосетей свидетельствуют о целесообразности учета в алгоритмах работы и методиках применения КТ следующих факторов:

- наличие не одной, а нескольких волн, распространяющихся с различными скоростями от утечки к вибродатчикам;
- наличие ярко выраженной пространственной зависимости чувствительности датчиков к разным волнам.

С этой целью при поиске утечек в 1998–2000 гг. отделом технической диагностики Института проблем моделирования в энергетике НАН Украины совместно с филиалом “Энергоналадка” АК “Киевэнерго” разработан приборный комплекс течеискателей К-10.2/А-10 [16, 19, 20]. Он состоит из корреляционного течеискателя К-10.2 на базе ПК “notebook” и акустического течеискателя А-10. Методикой применения и алгоритмами работы К-10.2 предусмотрено проведение нескольких измерений, выполненных при различных положениях вибродатчиков на поверхности трубопровода с последующим частотным анализом параметров полученных ВКФ. Сочетание частотно-временного анализа структуры ВКФ и пространственной селекции наиболее информативных акустических волн, регистрируемых на поверхности трубопровода, позволили в значительной степени адаптировать поиск утечек к рассмотренным в данной работе особенностям акустической обстановки. Об этом свидетельствует пятилетний опыт применения названного комплекса приборов. Его использование позволило не только избегать больших ошибок при определении координат утечек (раздел 2.2, пример 1), но и находить утечки в тех случаях, когда ВКФ, полученная по обычной методике применения КТ, не имеет выраженного интервала корреляции (ВКФ присутствие течи не регистрирует – раздел 2.2, пример 2). Особо подчеркнем, что достичь такого же эффекта с помощью только математических процедур цифровой обработки сигналов без пространственной селекции вибросигналов в общем случае не удается – слишком сильны искажения исходных данных. Это можно пояснить на примере модели диагностируемого

участка рис. 11, составленной по результатам экспериментов, принимая во внимание практически обычные ее свойства.

- По частоте амплитудно-частотные характеристики “строк” фильтров частично либо полностью перекрывают друг друга, причем степень перекрытия зависит от пространственного положения датчиков на трубопроводе.
- Вибропреобразователь КТ регистрирует вибросигналы, порожденные смесью различных акустических волн (суммой сигналов на выходе каждой “строки”), причем степень влияния фазо-частотных характеристик фильтров “строк” на частотно-временную структуру ВКФ определяется пространственными коэффициентами передачи  $a_i$  и  $b_i$  между соответствующей волной и датчиками. Величины коэффициентов могут быть близкими к нулю (см. пример 2, рис. 8,  $a-r$ ).
- Судя по откликам диагностируемого участка на сильный удар, существует общая для всех рассматриваемых в модели волн задержка распространения, определяемая скоростью звука в воде. Об этом, в частности, говорится в [12]. Однако информация об этой задержке скрыта в высокочастотных волнах (выше 10 кГц), которые из-за сильного затухания, как правило, не регистрируются на нужном (порядка 100 м) расстоянии от источника.

Перечисленные свойства модели диагностируемого участка на рис. 11 показывают ограниченность либо неэффективность как средств повышения достоверности корреляционного метода большинства широко известных процедур цифровой обработки сигналов, применяемых в отрыве от пространственной селекции вибросигналов. Вместе с тем, благоприятной для вибродиагностики особенностью отечественных теплосетей является возможность доступа к поверхности трубопровода на протяжении в несколько метров (что составляет несколько длин волн) внутри теплокамер, теплопунктов и пр. Это позволяет вводить в производственную эксплуатацию простую и эффективную методику пространственной селекции вибросигналов [19, 20]. При этом процедуры цифровой обработки сигналов и их ВКФ из основного инструмента повышения достоверности корреляционного метода становятся вспомогательным средством, ориентированным на использование дополнительной информации, которую предоставляет пространственная селекция вибросигналов. В частности, ре-

ализованный в течеискателе К-10.2 режим частотного анализа характеристик ВКФ [21] оказывается наиболее полезным в случаях, когда ни одна из позиций датчиков не обеспечивает четкого, достоверного показания координаты течи. Разложение всех полученных ВКФ на более простые структурные составляющие и анализ их параметров позволяет выявить наиболее вероятную координату повреждения.

Проведение виброакустических измерений на поверхности трубопровода в нескольких местах по обе стороны от утечки позволяет определять всплески ВКФ, вызванные “запредельными” источниками акустических волн. Потребность в этом вызвана тем, что в условиях, описываемых моделью рис. 11, признак поступления на диагностируемый участок шума с соседних участков в виде близости к его краю координаты всплеска ВКФ может не срабатывать. При обычной методике течеискания это приводит к ошибочным координатам повреждений. Поэтому необходимо дополнительно контролировать направление поступления к концам диагностируемого участка акустических волн, формирующих наблюдаемые на разных частотах всплески ВКФ.

Очевидно, что недостатком введения в эксплуатацию методов пространственной селекции вибросигналов является усложнение диагностической аппаратуры и методики ее применения. Вместе с тем, пятилетняя практика определения местоположения более чем 700 утечек с помощью приборного комплекса К-10.2/А-10 показала полную оправданность затрат времени на дополнительные измерения ввиду значительного роста достоверности получаемых результатов диагностики трубопроводов. Поскольку это привело к резкому сокращению объемов земляных работ, общие затраты времени и средств на устранение повреждений изношенных отечественных теплотрасс (включая поиск утечек) существенно сократились.

1. *Каллакот Р.* Диагностика повреждений.– М.: Мир, 1989.– 512 с.
2. *Баранов В. М.* Акустические измерения в ядерной энергетике.– М.: Энергоатомиздат, 1990.– 320 с.
3. *Дробот Ю. Б., Грешников В. А., Бачегов В. Н.* Акустическое контактное течеискание.– М.: Машиностроение, 1989.– 120 с.
4. *Грибанов Ю. И., Веселова Г. П., Андреев В. Н.* Автоматические цифровые корреляторы.– М.: Энергия, 1971.– 240 с.
5. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Оценка некоторых погрешностей корреляционного течеискателя // *Зб. наук. праць. ІПМЕ НАНУ.*– 1999.– Вип. 2.– С. 118–126.
6. *Безпрозванный А. А., Владимирский А. А., Владимирский И. А., Ненюк А. Т.* Повышение достоверности поиска утечек трубопроводов тепловых сетей // *Энергетика и электрификация.*– 2000.– N 2(199).– С. 29–32.
7. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Особенности распространения вибросигналов по трубопроводам тепловых сетей большого диаметра // *Зб. наук. праць. ІПМЕ НАНУ.*– 1999.– Вип. 3.– С. 37–41.
8. *Гринченко В. Т., Комиссарова Г. Л.* Распространение волн в полом упругом цилиндре с жидкостью // *Прикл. мех.*– 1984.– 4, N 1.– С. 21–26.
9. *Гринченко В. Т., Комиссарова Г. Л.* Особенности распространения волн в заполненных жидкостью цилиндрах с податливыми стенками // *Акуст. вісн.*– 2001.– 4, N 3.– С. 22–33.
10. *Кубенко В. Д., Ковальчук П. С., Крук Л. А.* О многомодовых нелинейных колебаниях цилиндрических оболочек, заполненных жидкостью // *Прикл. мех.*– 2003.– N 1.– С. 99–108.
11. *Лашин Б. М., Овчинников А. Л.* Взаимно-спектральный метод обнаружения утечки на трубопроводах с односторонним доступом // *Дефектоскопия.*– 2004.– N 9.– С. 19–26.
12. *Селезов И. Т.* О распространении малых возмущений в упругой цилиндрической оболочке, наполненной жидкостью // *Прикл. мех.*– 1965.– 1 N 3.– С. 10–16.
13. *Владимирский И. А.* Синтез цифровых фильтров для корреляционных течеискателей // *Методы и средства компьютерного моделирования.*– К.: ИПМЭ НАНУ, 1995.– С. 13–15.
14. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* О некоторых способах автоматической настройки фильтров в течеискателях корреляционного типа // *Зб. наук. праць. ІПМЕ НАНУ.*– 1998.– Вип. 4.– С. 179–188.
15. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы.– М.: Радио и связь, 1986.– 512 с.
16. *Дубровский И. М., Егоров Б. В., Рябошапка К. П.* Справочник по физике.– К.: Наук. думка, 1986.– 557 с.
17. *Савельев И. В.* Курс общей физики: том 2.– М.: Наука, 1982.– 496 с.
18. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* К формированию модели диагностируемого участка трубопроводной системы для решения задач течеискания // *Зб. наук. праць. ІПМЕ НАНУ.*– 2001.– Вип. 7.– С. 66–69.
19. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Методика комплексного использования течеискателей К-10 и А-10 при поиске утечек трубопроводов тепловых сетей // *Зб. наук. праць. ІПМЕ НАНУ.*– 2000.– Вип. 9.– С. 3–11.
20. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Совершенствование методики поиска утечек с применением приборного комплекса К-10.2/А-10 // *Зб. наук. праць. ІПМЕ НАНУ.*– 2003.– Вип. 20.– С. 134–138.
21. *Владимирский А. А., Владимирский И. А.* Способ частотного анализа характеристик корреляционных функций вибросигналов // *XX научнотехническая конференция “Моделирование”. Тезисы.*– К.: ИПМЭ НАНУ, 2000.– С. 23–24.