

Перейдем к решению этой задачи на основе корреляционного частотно-временного подхода. На рис. 6 приведено отображение этой функции в виде двух вертикальных линий. Первая из них соответствует нулевой задержке; она свидетельствует о наличии собственных шумов аппаратуры, используемой для получения экспериментальных данных. Вторая линия соответствует величине $\Delta t \approx 33,8$ мс и расстоянию до утечки, равному 3,02 м. Точность расчета повысилась на порядок, что свидетельствует о преимуществах предложенного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кармазинов Ф.В., Махнев П.П., Юдин М.Ю. Методика определения неучтенных расходов и потерь воды в системах коммунального водоснабжения // Вода Magazine. – 2004. URL: http://www.watermagazine.ru/spravky/pravo/398-2010-01-17-10-13-48.html?format=html&Itemid=49&option=com_content&id=398:2010-01-17-10-13-48&view=article&layout=default&month=2&year=2010 (дата обращения: 18.06.2010).
2. Иоффе О. Подземный город // ТехСовет. 2007. URL: <http://www.tehsovet.ru/article-2007-4-1-862> (дата обращения: 18.06.2010).

Выводы

1. На основе анализа частотно-временной корреляционной функции решена задача обнаружения утечек в трубопроводных сетях.
2. Предлагаемое решение можно рассматривать как развитие корреляционного метода в задачах анализа сигналов, в частности, в задачах определения мест утечек в трубопроводных сетях.
3. Подход позволяет установить взаимосвязь частотных составляющих спектров двух сигналов и по этой взаимосвязи выявить наличие утечки и место ее расположения.

3. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 992 с.
4. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свертки. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.
5. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры / под ред. проф. А.М. Трахмана. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.
6. Чан Вьет Тьяу, Аврамчук В.С. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 112–115.

Поступила 25.03.2010 г.

УДК 53.082.4;621.64

ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ВНУТРИТРУБНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.А. Курочкин, Н.Н. Бочкарев*

ОАО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск
*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск
E-mail: kuroch74@mail.ru

Представлены результаты полевых измерений спектральных характеристик вибраций магистрального газопровода при движении очистного скребка. Эксперименты проведены с использованием акселерометра, подключаемого к портативному спектроанализатору. Полученные данные демонстрируют возможность определения местоположения и скорости движения внутритрубного объекта.

Ключевые слова:

Магистральный газопровод, очистной скребок, вибрации, эксперимент, спектральные характеристики, местоположение, скорость.

Key words:

Gas-main pipeline, cleaning gear, vibrations, experiment, spectral characteristics, location, speed.

При эксплуатации магистральных нефтегазопроводов происходит загрязнение внутренней поверхности трубы продуктами транспортирования и конденсатом, что приводит к снижению скорости потока нефти или газа, уменьшению пропускной способности нефтегазопровода и ускорению коррозионных процессов.

С целью механической очистки и контроля состояния трубопровода в него запускают очистные устройства и дефектоскопы – внутритрубные объекты (ВТО). В некоторых случаях они застревают внутри трубы. Если не удастся заставить ВТО

продолжить движение, то устанавливают его местоположение и извлекают с нарушением целостности трубы.

Местоположение застрявшего в трубе объекта определяют с помощью специальных приборов – сигнализаторов перемещения ВТО в потоке газа или нефти. Одни приборы регистрируют внутритрубный шум, возбуждаемый движущимся объектом в звуковой или ультразвуковой области спектра [1], другие – измеряют интенсивность звука газоструйных излучателей, устанавливаемых на ВТО [2], третьи – фиксируют изменения электромаг-

нитного и магнитного полей при прохождении объекта в местах установки измерительных датчиков [3]. При этом датчик врезается в трубу или устанавливается на ее поверхности с помощью специальных устройств. Общее функциональное ограничение для таких сигнализаторов – индикация только момента прохождения ВТО вблизи датчика. Определять в реальном времени скорость и местоположение движущегося объекта такие устройства не могут, так как располагаются на расстоянии 10...25 км друг от друга.

В работе [4] описана система для определения местоположения ВТО в реальном времени на расстояниях до 100 км с точностью 3 %. Автономный акустический излучатель устанавливается на последний фланец очистительного устройства, а измерительный микрофон через муфту закрепляется во внутритрубном пространстве. Недостатки этой системы очевидны: низкая точность, нарушение целостности трубопровода и необходимость в дополнительном устройстве – акустическом излучателе.

Для определения местоположения ВТО с высокой точностью необходимо непрерывно контролировать его скорость на протяжении всего участка движения. Нами разработан вибрационный метод контроля, относящийся к технической диагностике, цель которой – выявление возможностей и условий дальнейшей эксплуатации диагностируемого оборудования и в конечном итоге повышение промышленной и экологической безопасности.

Вибрации являются неотъемлемым показателем работы многих природных и техногенных систем, в том числе и трубопроводного транспорта. При движении ВТО воздействует на стенки и внутренние сварные швы трубопровода, возбуждая волновой процесс и ударные импульсы, рис. 1.

Ударные импульсы распространяются по стенке трубы на значительные расстояния. Их форма и амплитуда зависят от скорости движения ВТО, размеров внутренних выступов сварных швов и демпфирующих свойств внешней среды, трубопровода.

Возникающие ударные импульсы возбуждают колебательные процессы: а) во внутреннем про-

странстве трубы – нормальные волны, соответствующие модам поперечного резонанса, решение уравнения для которых (обобщенное уравнение Бесселя) хорошо известно для бегущих и стоячих волн [5]; б) в стенке трубопровода – волны Лэмба нулевого порядка (продольная волна и волна сдвига), а также волны Лэмба ненулевого порядка, крутильные волны, которые экспоненциально быстро затухают.

Вибрационные характеристики трубопровода во время и при отсутствии движения ВТО должны отличаться по форме и спектру вибросигнала. Для установления этих отличий требуется определение частотной области вибраций трубопровода при воздействии на него движущегося ВТО.

В настоящей работе приведены результаты натурных исследований во время очистки участка газопровода Юрга – Новосибирск (Юргинского ЛПУ МГ) очистным скребком в летний период. Датчик-акселерометр (размерность экспериментальных данных – виброускорение, A в относительных единицах) был установлен на крановом узле, диаметр труб которого 0,72 м, на расстоянии 674 м от камеры запуска очистного скребка. Средняя длина пролета труб, из которых изготовлен трубопровод, 11,5 м.

Эксперимент начался измерением вибрации трубопровода без очистного скребка в режиме штатной транспортировки газа. На рис. 2, а, представлена записанная для этого случая виброграмма, на рис. 2, б – рассчитанный по ней спектр. Спектр вибросигнала имеет максимальные амплитуды по виброускорению в частотном диапазоне 2...6 Гц (рис. 2, б). Это собственные частоты колебаний кранового узла, возбуждаемые работой газоперекачивающего оборудования.

Для уменьшения влияния микросейсмических волн на измеряемые характеристики все вибросигналы отфильтрованы аналоговым фильтром ВЧ с частотой среза 2 Гц. Таким образом, полный частотный диапазон расчетного спектра 2...5000 Гц. Верхняя граница диапазона обусловлена способом крепления акселерометра ДН-4 с использованием магнита.

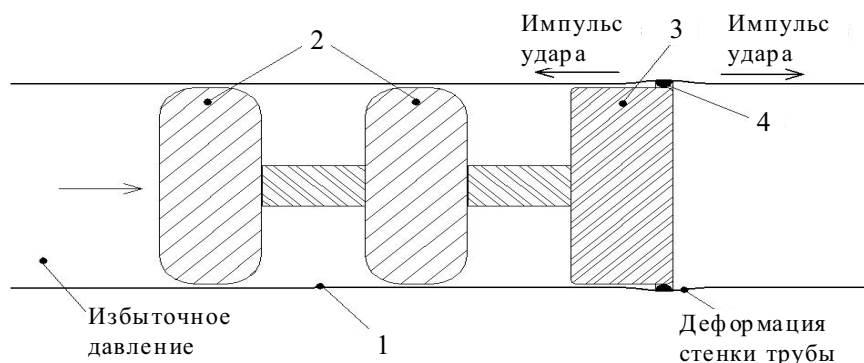


Рис. 1. Схема движения ВТО: 1) трубопровод; 2) центрирующие манжеты; 3) головной фланец; 4) внутренний сварной шов трубопровода

После начала движения очистного скребка по магистральному газопроводу формы виброграмм изменились, что обусловлено ударами головного фланца скребка о сварные швы (рис. 1). Создаваемые при этом ударные импульсы (виброудары) распространяются как по ходу движения (рис. 3, а), так и в обратном направлении.

Проанализируем полученные виброудары на разном расстоянии до места установки датчика.

На виброграмме (рис. 3, а) представлены первые 27 с движения очистного скребка от камеры запуска, расстояние от которой до места установки датчика 674 м.

Видно, что на виброграмме появились устойчиво различные периодические импульсы от виброударов, среднее время повторения которых 2,31 с. На частотном спектре (рис. 3, б), соответствующем первым 27 с, можно выделить спектральные диапазоны максимальных амплитуд: 2,5...6,8; 588...595; 567...570; 290...320; 168...205; 120...135; 69...75; 660...705 Гц.

Для вычисления спектров отдельных виброударов из виброграмм выделялись временные участки по 0,2 с, поскольку время затухания виброудара близко к этому значению. Например, из виброграммы (рис. 3, а) выбран участок на 1-й секунде, который в развернутом виде показан на рис. 4, а.

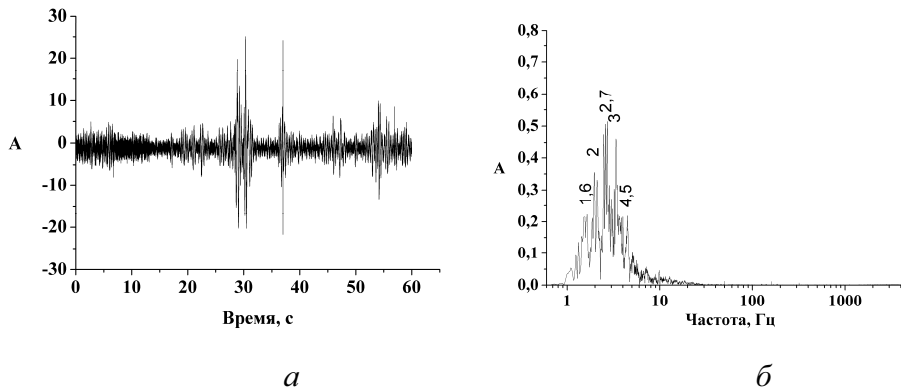


Рис. 2. Виброграмма (а) и спектрограмма (б) трубопровода без движения очистного скребка в режиме стандартной транспортировки

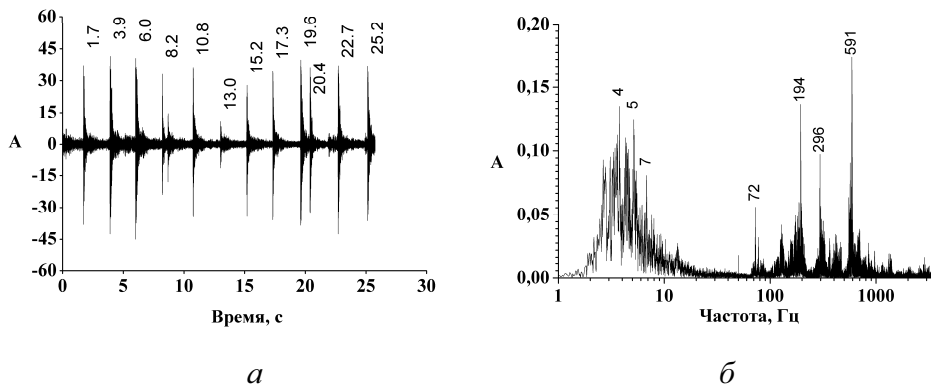


Рис. 3. Виброграмма (а) и спектрограмма (б) трубопровода с движущимся ВТО на расстоянии 674 м до места установки датчика (за первые 27 с)

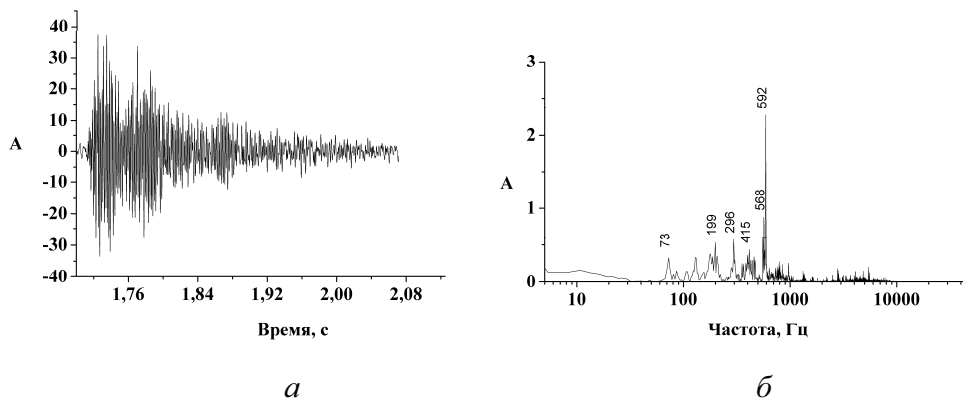


Рис. 4. Виброудар (а) и его спектр (б) на 1-й секунде движения ВТО

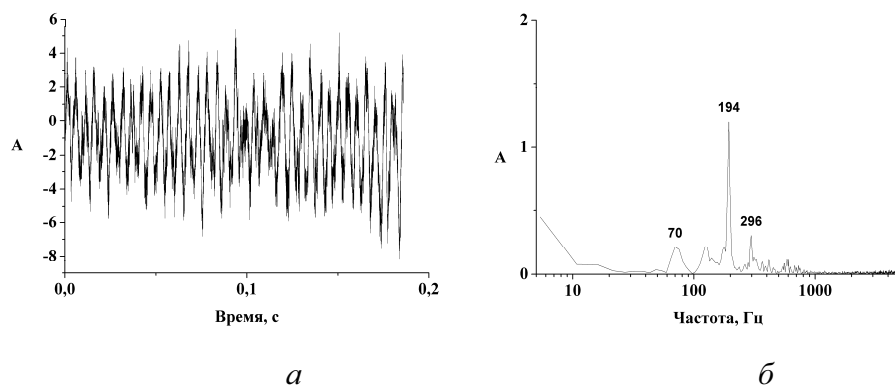


Рис. 5. Фоновый уровень сигнала (а) и его спектр (б)

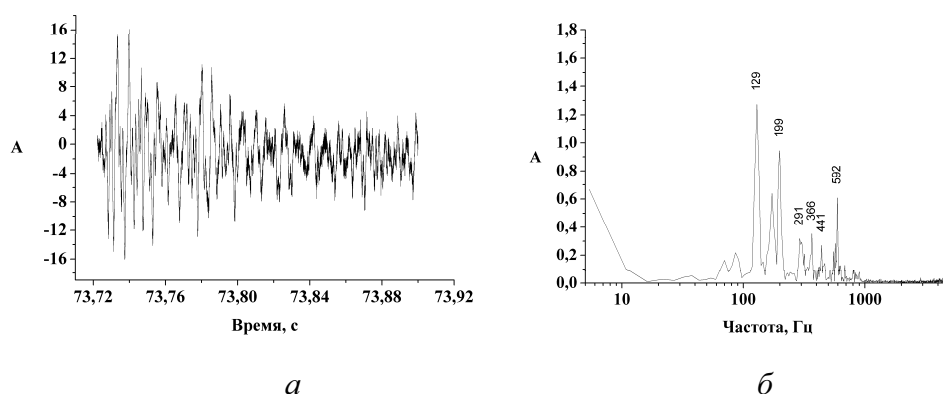


Рис. 6. Виброудар (а) и его спектр (б) на 73-й секунде движения ВТО

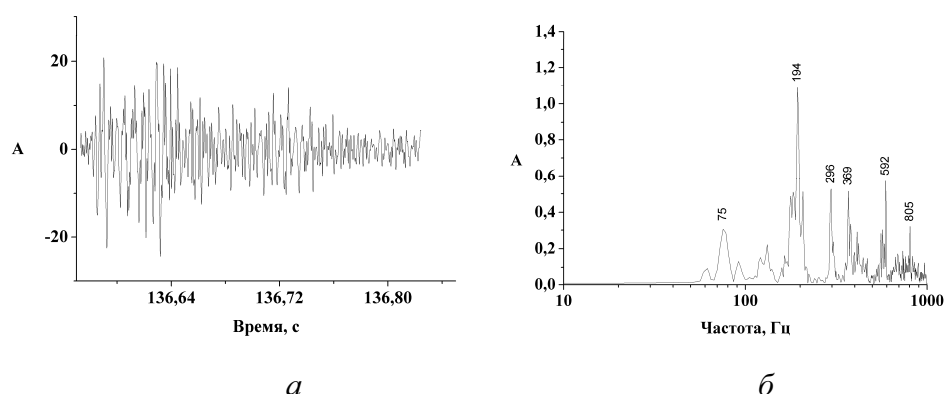


Рис. 7. Виброудар (а) и его спектр (б) на 136-й секунде движения ВТО

Соответствующий спектр виброудара (рис. 4, б) имеет максимальные значения амплитуды на частотах 592; 568; 296; 415; 199; 73; 129; 471 Гц.

Виброграмма (рис. 5) соответствует временному участку между виброударами (фоновый уровень), взятому в начальной части сигнала (рис. 3, а). Спектр вибросигнала (рис. 5, б) имеет максимальные значения амплитуды на частотах 194; 296; 125; 70 Гц.

Следующий виброудар (рис. 6, а) выбран на 73-й секунде, когда очистной скребок находился на расстоянии 181 м от места установки датчика. Время затухания виброудара 0,15 с, соответствующий спектр виброудара (рис. 6, б) имеет максимальные значения амплитуды на частотах 129; 171; 199; 592; 366; 291; 441 Гц.

Следующий виброудар (рис. 7, а) выбран на 136-й секунде, когда очистной скребок находился на расстоянии 10 м от места установки датчика. Время затухания виброудара 0,11 с, соответствующий спектр виброудара (рис. 7, б) имеет максимальные значения амплитуды на частотах 194; 592; 296; 369; 805; 75 Гц.

Виброграмма движения очистного скребка к охранному крану, содержащая такие события, как момент прохождения места установки датчика, временную остановку его на 4 с и последующее продолжение движения показана на рис. 8. Длина пролетов труб в охранном кране составляла 0,5...1,5 м (по трубному журналу газопровода).

Из сравнения спектров виброграмм до и после начала движения очистного скребка в газопроводе

установлено, что спектры в частотном диапазоне 2...7 Гц имеют максимальную амплитуду. В обоих случаях это собственная частота колебаний кранового узла, возбуждаемая работой газоперекачивающего оборудования, а также микросейсмической активностью почвы.

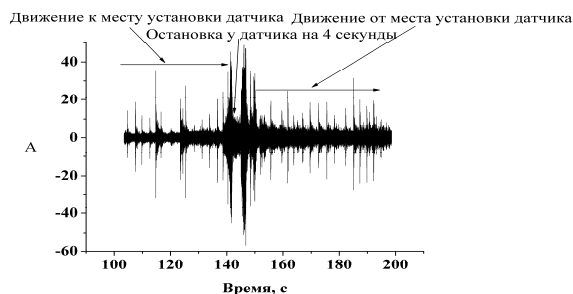


Рис. 8. Виброграмма движения очистного скребка в момент прохождения места установки датчика

Частотные спектры вибросигналов в приведенных примерах отличаются в частотном диапазоне 10...1000 Гц. В спектрах вибраций, вычисленных после начала движения очистного скребка, появляются частоты с максимальными амплитудами в диапазонах 588...595, 567...570, 290...320, 168...205, 120...135, 69...75, 660...705 Гц. Наличие этих частот свидетельствует о движении ВТО по трубопроводу и является диагностической количественной характеристикой.

Амплитуды виброударов на виброграммах (рис. 4, а; 6, а; 7, а) больше амплитуд вибросигнала, измеренного между виброударами (фоновыми уровнями), в 3...6 раз.

Виброграммы всех виброударов имеют сложную форму, однако в них присутствуют характерные детали. Например, приблизительно одинаковы спектральные характеристики коэффициенты затухания, вычисленные для ярко выраженной частоты 592 Гц, имеют следующие значения: 8,1 (виброудар на 1-й секунде); 14,6 (виброудар на 73-й секунде); 14,9 (виброудар на 136-й секунде); время затухания виброудара менее 0,2 с.

Появление на виброграмме виброударов через равные промежутки свидетельствует о том, что очистной снаряд движется по газопроводу с равной скоростью. Измеряя время между виброударами (оно соответствует времени прохождения очистным скребком одного пролета трубы), а также зная среднюю длину пролета (в данном случае 11,5 м), можно определить скорость движения V в любой момент времени.

Длина пролета трубы — величина не постоянная, отклонение составляет до 0,3 м. При расчете скорости движения очистного скребка использовано усредненное время прохождения очистным скребком одного пролета трубы.

Например, среднее время повторения виброударов (рис. 3, а) за первые 50 с составило $t_{cp}=2,31$ с, за 138 с (это время движения скребка от камеры запуска до момента остановки в охранном кране) $t_{cp}=2,45$ с. Таким образом, средняя скорость движения за 138 с равна 4,9 м/с.

Двигаясь с такой скоростью, очистной скребок должен был за 138 с преодолеть расстояние 680 м. Реальное расстояние от камеры запуска до охранного крана равно 674 м согласно трубному журналу. Небольшая разница получилась из-за того, что длина одного пролета трубы на этом участке равна 5,73 м.

Полученные данные демонстрируют возможность определения местоположения и скорости движения очистного скребка в любой момент времени при непрерывной регистрации вибраций трубопровода. Использование предложенного метода с желаемой точностью измерения местоположения ВТО до расстояния между сварными стыками труб требует совмещения данных о длине труб (по трубному журналу) и данных, получаемых по виброграммам движения ВТО. Автоматизация этого процесса проста в реализации и позволит в реальном времени сопровождать движение ВТО по трубопроводу с вычислением текущего значения скорости примерно на расстоянии до 15 км при движении к месту установки датчика и до 6 км от него. Прекращение появления виброударов на виброграмме будет означать то, что ВТО остановился. Если не удастся заставить ВТО продолжить движение, то установить его местоположение и извлечь с нарушением целостности трубы.

Следует отметить, что вибрационный метод позволяет с вероятностью 100 % регистрировать момент прохождения ВТО рядом с датчиком, независимо от конструкции и материала, из которого ВТО изготовлен.

Дополнительными маркерами местоположения ВТО могут быть охранные краны, отводы, трубные пролеты нестандартного размера, поскольку виброграммы на этих участках движения существенно различаются.

Вибрационный метод контроля движения ВТО является технологически простым, т. к. исключает нарушение изоляции трубопровода, проведение сварных работ по установке датчика или специальных приспособлений для его крепления на трубопровод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплекс приборов для оперативного контроля прохождения скребка по трубопроводу «Прибой». — Киев: НПП «КиА-ТОН», 1997. — 18 с.
2. Сигнализатор прохождения разделителей акустический СПРА-4 (датчик прохождения скребка стационарный). — Томск: НИИ ИН ТПУ, 1998. — 11 с.
3. Алексеев В.А., Донченко В.А., Шапарев В.Я., Сынков С.А. Сигнализаторы прохождения внутритрубных объектов // Ди-

агностика трубопроводов: Тез. докл. III Междунар. конф. — М., 2001. — С. 161–166.

4. Супрунчик В.В., Коновалов Н.М., Мызников М.О. Система сопровождения внутритрубных снарядов «ССВС-001» // Трубопроводный транспорт. — 2003. — № 12. — С. 9–12.
5. Скучик Е.Н. Основы акустики. — М.: Мир, 1976. — Т. 1. — 520 с.

Поступила 11.03.2010 г.