2. Elke Van de Casteele et al. X-ray microtomography as a non-destructive tool for stone characterization in a conservation study //4th international conference on NDT –Crete, Greece, 2010
3. A.V. Batranin, S.V. Chakhlov, D.V. Grinev, B.I. Kapranov, V.A. Klimenov Design of the X-Ray Micro-CT Scanner TOLMI-150-10 and its Perspective Application in Non-Destructive Evaluation //Applied Mechanics and Materials. 2013, 379, P. 3-10.
4. A. Batranin, D. Ivashkov, S. Stuchebrov Performance Evaluation of Micro-CT Scanners as Visualization Systems //Advanced Materials Research. 2015, 1084, P. 694-697.
5. D.R. Baker An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks //Elsevier –Lithos 148. – 2012. – P. 262-276
6. Bruker microCT home page, available on: http://bruker-microct.com/home.htm
7. R.A. Ketcham, W. D. Carlson Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences //Computers & Geosciences. 2001, 27(4), P. 381-400.
8. P. Westenberger et al. Fiber Orientation Visualization with Avizo Fire //Conference on Industrial Computed Tomography (ICT) – Wels, Austria, 2012.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Овчинников А.Л., Лапшин Б.М.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Введение

В последнее время основные исследования в области акустического течеискания были направлены на решение, задач связанных с исследованием характеристик акустического тракта распространения сигнала, главным образом с исследованием модовой структуры поля, а также задач направленных на повышение точности локализации. Так в [1–3] проведены теоретические исследования распространения волноводных мод в подземных трубопроводах перекачивающих жидкость, рассчитаны спектры фазовых скоростей и распределение энергии по модам в трубопроводе. Полученные в [3] теоретические результаты распространения сигналов АЭ в пластиковых трубах экспериментально подтверждены в работе [4]. Для эффективного выделения сигналов АЭ из помех в работе [5] предложен алгоритм использования Wavelet преобразования. В [6-8] рассмотрены различные способы повышения точности локализации утечки с использованием метода взаимной корреляции.

Целью настоящей работы является исследование распространения низкочастотных акустических сигналов в трубах с жидкостью и оценка ослабления сигнала. Данные исследования представляют определенный интерес и для разработки аппаратуры дальнего обнаружения внутритрубных объектов перемещаемых с потоком перекачиваемой жидкости.

В опубликованных к настоящему времени работах по исследованию ослабления звука в трубах ограничиваются рассмотрением затухания в области частот от 10 до 100 кГц. Из [9] известно, что для большинства жидкостей в широком диапазоне изменения частот имеет место квадратичная зависимость коэффициента затухания звука от частоты. С другой стороны по данным работы [10] коэффициенты затухания, измеренные на реальном нефтепроводе в диапазоне частот 10-50 кГц достаточно точно аппроксимируются линейными зависимостями. Полученные в [10] значения значительно превосходят теоретически рассчитанные коэффициенты ослабления, вызванные наличием вязкости и теплопроводности и трением жидкости о стенку трубы.

В [1] на основе численного решения уравнений гидродинамики, и динамической теории упругости для трехслойной среды: перекачиваемая жидкость – стенка

трубопровода – грунт, показано, что при определенных условиях кроме ослабления сигнала за счет внутренних потерь, акустические сигналы могут ослабляться за счет излучения энергии во внешнюю среду. К настоящему времени точных аналитических и численных решений, позволяющих оценить ослабление сигнала за счет излучения, при его распространении в сложной трехслойной среде, не получено. Вместе с тем имеется ряд работ посвященных излучению звука цилиндрической оболочкой в более простых условиях [11–13]. Так в [13] теоретически и экспериментально показано, что излучаемая цилиндрической оболочкой мощность увеличивается с увеличением диаметра оболочки, а коэффициент излучения в области низких частот растет с увеличением частоты. На взгляд авторов эти закономерности будут выполняться и при распространении сигналов в сложных слоистых средах, однако количественные оценки по полученным в этих работах соотношениях будут давать неверные результаты.

Экспериментальная установка

Схема проведения исследований возбуждения и распространения акустических сигналов представлена на рис. 1. Основной элемент этой схемы – участок магистрального нефтепровода диаметром 1220 мм и толщиной стенки 15,2 мм. Это максимальный диаметр трубопровода, используемый для транспорта нефти. Конструкция нефтепровода выполнена по строительным нормам и правилам действующим в России. Труба заполнена Западно-Сибирской нефтью, которая двигалась со скоростью 0,85 м/с.

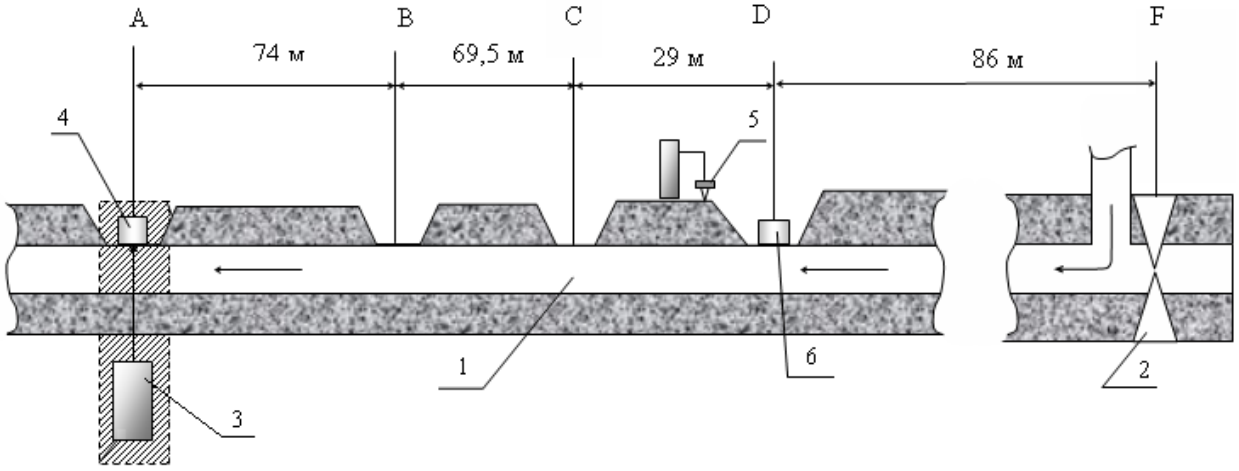

Рис. 1. Схема исследований распространения низкочастотных акустических сигналов на действующем нефтепроводе.
1 – нефтепровод; 2 – задвижка; 3 – генератор электрического сигнала; 4 – излучатель; 5, 6 – приемные преобразователи; A, B, C, D – шурфы; F – задвижка

Для непосредственного доступа к трубе были оставлены участки не засыпанные грунтом (шурфы). Изоляционное покрытие – пленочное усиленное из полимерных лент (грунтовка; полимерная изоляционная лента 2 слоя, толщина каждой 0,6 мм и защитная обертка, толщиной 0,6 мм). Грунт обратной засыпки обводненный песок. Уровень грунтовых вод до середины трубы. С одной стороны участка трубопровода находилась задвижка и поворот трубы на 90^0, с другой стороны ближайшая задвижка - на удалении 4,0 км. Давление в трубе на период испытаний составляло 1,7 МПа.

Акустические колебания возбуждались с использованием, разработанного авторами, излучателя электромагнитного типа. Регистрация сигналов осуществлялась с использованием двух преобразователей разного типа: преобразователя электродинамического типа промышленного изготовления марки СВ-10Ц и пьезоэлектрического преобразователя, разработанного авторами. Приемный преобразователь промышленного изготовления СВ-10Ц имел следующие характеристики: собственная частота 10Гц; частота второго резонанса 70Гц; коэффициент преобразования 18 $В{\cdot}м^{-1}с$. Омическое сопротивление катушки индуктивности составляло 285 Ом.

Пьезопреобразователь, разработанный авторами имел полосу регистрируемых частот от 5 до 2000 Гц и чувствительность равную 100 – 150 мкВ·Па$^{-1}$.

Приемные преобразователи устанавливались на стенку трубы непосредственно через слой пленочной изоляции или на грунт вблизи нефтепровода.

Сигнал с выхода пьзопреобразователей поступал на предварительный усилитель. Уровень собственных шумов усилителя, приведенных ко входу, в полосе 1кГц не превышал 0,3 мкВ. Коэффициент усиления по напряжению – 10 (20дБ). Сигнал с выхода предварительного усилителя поступал на регистрирующее устройство.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При проведении исследований приемный преобразователь устанавливался на стенку трубы (рис. 1) в шурфе Д, а излучатель акустического сигнала вместе с генератором поочередно устанавливался в шурфах С, В и А. При этом в трубу излучались одиночные импульсы с полосой частот от единиц герц до единиц килогерц.

Испытывались несколько способов приема сигнала на фиксированном удалении от излучателя: с чистой стенки трубопровода, без контактной смазки; со стенки трубопровода с контактной смазкой; через два слоя пленочной изоляции без контактной смазки; через два слоя пленочной изоляции при наличии контактной смазки. Во всех этих случаях мы не наблюдали заметного изменения амплитуды или фазы сигнала. Поэтому в дальнейшем приемный преобразователь устанавливали на трубу через два слоя пленочной изоляции без смазки.

Осциллограммы и рассчитанные по ним частотные спектры, полученные в ходе испытаний при контактном вводе сигнала при расположении излучателя зондирующего сигнала в шурфах С, В и А приведены на рис. 2, 3.

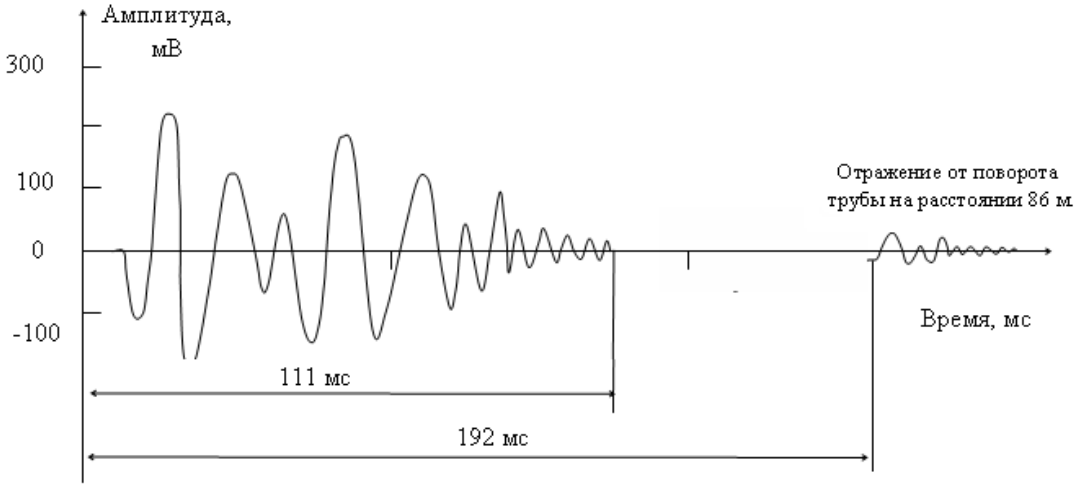

Рис. 2 Осциллограмма сигнала при удалении излучателя на 29 м от приемного преобразователя

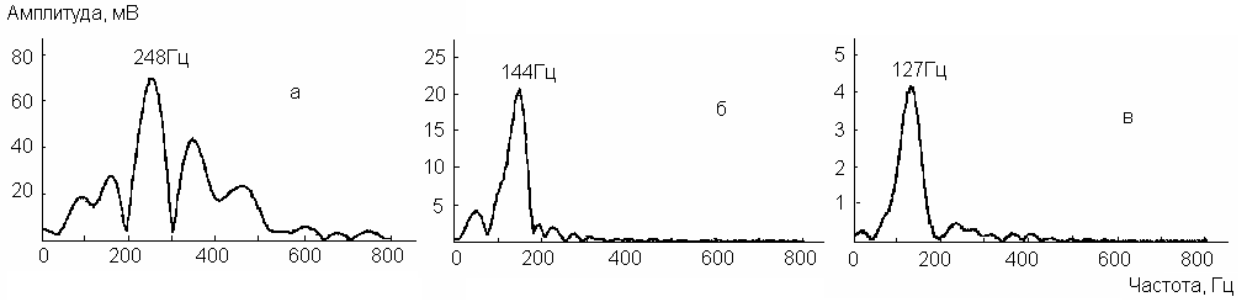

Рис. 3 Частотный спектр сигнала при различных расстояниях между излучателем и приемником (а- 29 м; б - 98,5 м; в - 72,5 м)

При расположении излучателя в шурфах В и С имели место случаи отражения сигнала от задвижки *F* (рис. 2). Это позволило оценить скорость распространения сигнала

$$V = \frac{2S}{\Delta t} = \frac{86 \times 2}{(192 - 27.4) \times 10^{-3}} = 1045\,\text{м/с}$$

Здесь *S*– расстояние от приемного преобразователя до задвижки, м.

Значение полученной скорости звука совпадает со скоростью волны давления получаемой по известной формуле Кортевега:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}\left(\sqrt{1 + \frac{Kd}{E\delta}}\right)^{-1} = \sqrt{\frac{1.35 \cdot 10^9}{810}}\left(\sqrt{1 + \frac{1.35 \cdot 10^9 \cdot 1.2}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0.0152}}\right)^{-1} = 1042{,}8\,\text{м/с}$$

Здесь *K*– модуль объемной упругости жидкости (нефти) – $1{,}35 \cdot 10^9$ Па; *E* – модуль упругости материала трубы (стали) – $2{,}0 \cdot 10^{11}$ Па; ρ – плотность жидкости (нефти)–810 кг/м^3; *d*, δ – внутренний диаметр и толщина стенки трубы 1,2 м и 0,0152 м соответственно.

Совпадение расчетной и экспериментально измеренной скоростей подтверждает, что акустические сигналы в трубе распространяются по жидкости. Сигналы с другими скоростями распространения не наблюдались.

Из рис. 3 видно, что труба с нефтью при передаче низкочастотных акустических колебаний ведет себя как фильтр нижних частот. Это прослеживается при сравнении частотных характеристик сигналов. Если при расположении излучателя в шурфе *C* (рис. 3а, удаление 29 м) в спектре частот преобладали составляющие 248 Гц ± ΔF то при положении излучателя в шурфах А и В (удаление 172,5м и 98,5м) эти составляющие уже отсутствовали. Это соответствует опубликованным теоретическим и экспериментальным результатам о более сильном ослаблении высокочастотных сигналов.

Для определения акустической мощности вводимой в трубу определим акустическую мощность, регистрируемую преобразователем на расстояниях 29, 98,5 и 172,5 м от излучателя, а затем аппроксимируем полученные значения на точку ввода сигнала в трубу. При этом волну в трубопроводе будем считать плоской, а стенку трубопровода тонкой. С учетом чего давление, регистрируемое преобразователем с внешней стенки трубы, примем равным давлению в жидкости внутри нее. Мгновенная интенсивность (мгновенная плотность потока мощности) акустической волны определяется по известному соотношению [9]:

$$I(t) = (\rho c)^{-1} p(t)^2, \qquad (1)$$

Мгновенная интенсивность связана с мощность акустического импульса выражением:

$$P_x = \frac{1}{T}\int_0^T \int_S I(t)\,dt\,ds = \frac{1}{\rho c T}\int_0^T \int_S p(t)^2\,dt\,ds, \qquad (2)$$

Проинтегрировав (2) по времени и площади, полагая, что волна плоская, для акустической мощности на удалении *x* от излучателя получим:

$$P_x = \frac{\pi R^2}{\rho c T}\int_0^T p(t)^2\,dt = \frac{\pi R^2}{\rho c T}(\gamma K_u)^{-2}\int_0^T U(t)^2\,dt \qquad (3)$$

Здесь ρ, *c*– плотность и скорость звука в жидкости; *R*– радиус трубопровода; *T* – длительность импульса давления; γ – чувствительность преобразователя (в нашем случае 100-150 мкВ/Па); K_u– коэффициент усиления предусилителя по напряжению; *U(t)* – зависимость напряжения на приемном преобразователе от времени.

Подставив в соотношение (3) для акустической мощности следующие параметры *R*=0,6м; *c*=1045м/с; ρ=810кг/м^3; K_u=10; γ=10^{-4} В/Па; и проинтегрировав численно зависимости напряжения изображенные на рис.3, в результате чего на расстояниях 29, 98,5 и 172,5 м от излучателя получим следующие значения акустической мощности:

P_{29}= 77,75 мВт; $P_{98,5}$= 5,91 мВт; $P_{172,5}$= 0,26 мВт;

Аппроксимировав эти данные с помощью кубической сплайн-интерполяции, в точке ввода сигнала в трубу получим следующее значение акустической мощности:

P_0=140,46 мВт

Интегральные коэффициенты ослабления по мощности сигнала найдем по формуле

$$\alpha = \left| \frac{10\lg\left(P_{s1}/P_{s2}\right)}{s1 - s2} \right|, \text{ дБ/м} \qquad (4)$$

где *s1, s2* – расстояния от излучателя до точки приема. Результаты расчетов по формуле (4) представлены в таблице

1. Экспериментально полученные коэффициенты ослабления низкочастотных акустических сигналов в трубопроводе

s1-s2	69,5	74	143,5	172,5	98,5	29
α, Дб/м	0,16	0,18	0.17	0.16	0,14	0,089

Как видно из таблицы 1 коэффициенты ослабления, полученные на основе экспериментальных данных (первые три точки) имеют близкие величины, отличие составляет 0,01 дБ/м (~6%). Примерно такие же значения получаются при расчете с использованием аппроксимированного значения акустической мощности в точке ввода сигнала в трубу (наибольшее расхождение имеет последняя точка что связано, с погрешностью аппроксимации). Это говорит о том, что полученное значение P_0 примерно соответствует реальной мощности вводимой в трубу. Коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую составляет при этом $\eta=(140{,}46\ 10^{-3})/860=1{,}6\ 10^{-4}$

Проведенные расчеты показывают, что при механическом ударе очень незначительная часть энергии удара трансформируется в энергию акустического сигнала, который может быть зарегистрирован с внешней стенки трубопровода. Вероятно, основная энергия удара трансформируется в энергию волн, которые отражаются от внешней и внутренней стенки трубопровода и внутрь трубопровода не проникают. При ударе с внутренней стороны трубопровода, можно ожидать, что основная энергия удара будет сосредоточена внутри трубопровода, однако из-за сильного различия акустических импедансов стенки трубы и перекачиваемой жидкости, лишь незначительная часть энергии будет трансформирована в волны, регистрируемые с внешней стороны. Более точное значение коэффициента преобразования может быть получено путем решения трехмерных уравнений движения цилиндрической оболочки и уравнений гидродинамики.

Для проверки ослабления сигнала вызванного излучением энергии в грунт приемный преобразователь устанавливался на трубу через слой грунта, и затем удалялся от оси трубы по поверхности грунта. Измерения проводились при положении излучателя в точке В (100м). Исчезновение сигнала наблюдалось только при расположении приемного преобразователя на расстоянии более 10м от оси трубопровода. По мере приближения к трубе сигнал возрастал до максимума над осью нефтепровода. При этом резко возрастало запаздывание сигнала по сравнению с тем, которое имело место при расположении приемного преобразователя на стенке трубы. При установке зондирующего излучателя в шурфе С (29м) активная зона вокруг трубы увеличивалась до 12–13м. И в этом случае на регистрирующем устройстве имел место только один сигнал. Это свидетельствует о том, что сигнал, распространяясь по трубопроводу излучает акустическую энергию в окружающую среду (в грунт), чем на взгляд авторов и вызвано сильное ослабление сигнала.

Список использованных источников

1. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распространения упругих волн в трубах с жидкостью при акустико-эмиссионном обнаружении утечек. – Дефектоскопия, 1998, № 7, с. 25-32.
2. Long R., Cawley P., Lowe M., Acoustic wave propagation in buried iron water pipes. -

Proc. R. Soc. Lond., 2003, vol. 459 no. 2039. p. 2749-2770
3. Muggleton J. M., Brennan M. J., Pinnington R. J. Wave number prediction of waves in buried pipes for water leak detection. - Journal of Sound and Vibration, 2002, vol. 249, no. 5, p. 939-954.
4. Muggleton J. M., Brennan M. J., Linford P. W. Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wave number measurements in invacuo and buried pipes. - Journal of Sound and Vibration, 2004, vol. 270, no. 1, p. 171-190.
5. Majid Ahadi, Mehrdad Sharif Bakhtiar, Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals. - Applied Acoustics, 2010, vol. 71, no 7, p. 634-639.
6. Gao Y., Brennan M.J., Joseph P.F. On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes. Journal of Sound and Vibration, 2009, vol 325, no 3, p. 649-663
7. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Чекалин А.С. Особенности поиска утечек в трубопроводах тепловых сетей методом акустической эмиссии. – Дефектоскопия, 2011, № 10, с. 81-91.
8. Didem Ozevin, James Harding. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, vol. 92, no. 4, p 63-69
9. Ультразвук: маленькая энциклопедия/ Главный ред. И.П. Голямина. -М. Сов. Энцикл., 1979 г. 400с.
10. Николаева Е.Д. Разработка акустико-эмиссионного метода непрерывного контроля герметичности подводных трубопроводов: канд. дисс. - Томск, НИИ интроскопии ТПУ 1991.-220с.
11. Вовк И.В. Излучение звука коаксиальными цилиндрическими оболочками. - Акустический журнал. 1982. Том 28. №4. С. 470–473.
12. Кремлева О.А., Шкундин С.З. Метод расчета акустического поля внутри конечного цилиндрического канала с потоком. - Акустический журнал. 1998. Том 44. №1 С. 84–88.
13. Ретлинг Э. В. О излучении звука цилиндрической оболочкой // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 1(20) С.1–6

МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА КОНСТРУКЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РАДИАЦИОННУЮ ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ

Ахмеджанов О.А., Беспалов В.И., Зыков В.М. Московченко А
Томский политехнический университет

Исходные данные для проведения оценки возможностей метода рентгеновской спектрометрии для контроля максимального поверхностного потенциала конструкционных высокоомных диэлектриков:

1. Диапазон первичной энергией электронов E_0: 20 – 100 кэВ;
2. Плотность тока электронов на поверхности диэлектрика – 1 нА/см2;
3. Диаметр пластины диэлектрика – 80 мм;
4. Толщина пластины диэлектрика – 5 мм;
5. Потенциал необходимо измерять в зависимости от времени и пространственной координаты на поверхности пластины;