АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2016, том 62, № 6, с. 731–737

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 531.756

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ УРОВНЯ И ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ КОНТАКТИРУЮЩИХ СРЕД НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

© 2016 г. Б. В. Скворцов, А. В. Солнцева, С. А. Борминский, Л. В. Родионов

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)
443086 Россия, Самара, Московское ш. 34
E-mail: als063@mail.ru, b80@mail.ru

Поступила в редакцию 11.06.2015 г.

Представлен дистанционный метод контроля физических параметров сред, основанный на обработке акустического сигнала, отраженного от исследуемой среды. Метод позволяет одновременно оперативно измерять уровень и плотность отражающей среды за счет акустического зондирования импульсами заданной формы. Получены аналитические зависимости, связывающие контролируемые параметры с фазовой и амплитудной составляющими спектра отраженного акустического сигнала.

Ключевые слова: измерение, уровень, плотность, жидкая среда, спектр.

DOI: 10.7868/S0320791916060162

ВВЕДЕНИЕ

Акустический контроль физических параметров сред хорошо известен и применяется на предприятиях нефтеперерабатывающей, медицинской, пищевой, химической направленностей для контроля уровня и плотности жидких сред в резервуарах. При контроле плотности принцип действия устройств основан на измерении скорости распространения и затухания зондирующего сигнала в контролируемой среде [1, 2]. Недостатком широко известных акустических методов контроля плотности является необходимость контакта датчика с контролируемой средой, что не всегда возможно в реальных условиях эксплуатации. Измерение уровня основывается на определении времени распространения зондирующего сигнала от датчика до границы раздела сред и обратно.

В статье предлагается новый метод акустического контроля одним датчиком, позволяющим измерить уровень и плотность отражающей среды.

Исследованиями возможности использования акустического метода контроля количественных параметров, в основном уровня, занимаются многие научные группы в России [3–10] и в мире [11–13]. Основным направлением исследований в данных работах является изучение параметров распространения акустических волн и корректировка измеренных данных с учетом реальной скорости распространения зондирующего звукового сигнала [14]. Известны также работы по контролю физических параметров жидкостей на основе ультразвуковых измерений [15], где контролируются в первую очередь плотность и вязкость среды. Однако в настоящее время отсутствуют акустические устройства комплексного бесконтактного контроля уровня и плотности жидких сред, позволяющие производить измерения с помощью одного измерительного преобразователя. Предлагаемый метод импульсного зондирования позволяет производить контроль требуемых параметров на основе анализа комплексных амплитудных спектров акустического импульса, отраженного от контролируемой среды. Информация может быть получена с помощью одного приемопередающего акустического пьезопреобразователя, что упрощает конструкцию, увеличивает надежность и снижает стоимость конечного оборудования.

Для реализации дистанционного акустического контроля уровня и плотности жидкой среды на границе раздела на основе теории распространения импульсных сигналов в средах [16, 17] и законов физической акустики [18] разрабатывается математическая модель распространения направленных импульсов в контролируемых средах. Целью моделирования является получение выражения, связывающего исследуемые параметры контролируемой жидкой среды со спектрами отраженного акустического импульса.

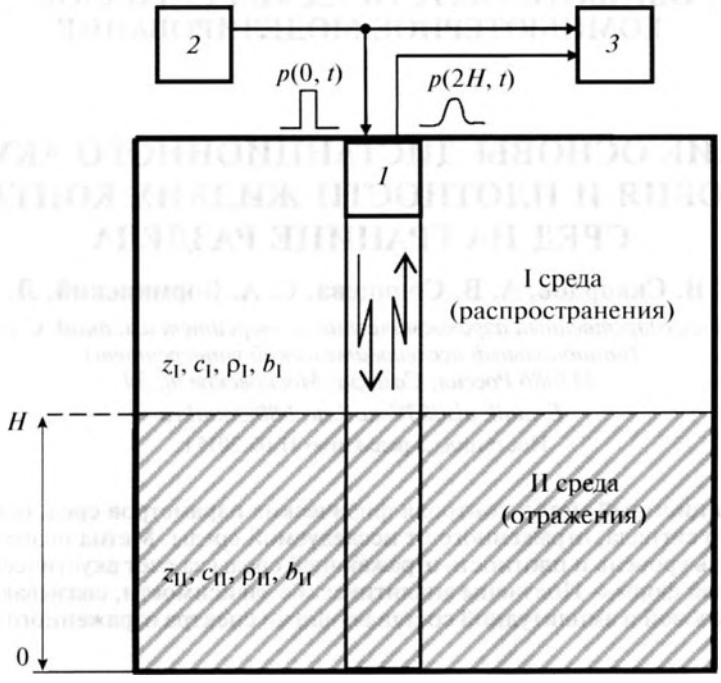

Рис. 1. Емкость с контролируемой жидкой средой: *1* – акустический датчик, *2* – генератор зондирующих импульсов, *3* – устройство сбора и обработки информации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 показана емкость с находящимися внутри нее контактирующими жидкими средами I и II. В полости размещен волновод, на конце которого устанавливается акустический датчик *1*, реализованный на основе пьезоэлектрического преобразователя. Зондирующие импульсы поступают с генератора *2* в среду I и, пройдя по волноводу расстояние H до границы раздела сред, отражаются от среды II и возвращаются на датчик *1* [19].

На рис. 1 показано, что после прохождения импульсом расстояния $2H$ по среде I и отражения от среды II его форма изменяется. Данные о форме зондирующего $p(0, t)$ и отраженного от контролируемой среды (среды II) $p(2H, t)$ импульсов поступают на устройство сбора и обработки информации *3*, где производится дальнейшая математическая обработка данных и вычисление искомой плотности.

В рамках математического моделирования процедуры контроля плотности приняты следующие допущения.

1. Контролируемая отражающая среда однородна, изотропна и стационарна с точки зрения акустических параметров.

2. Распространение акустических сигналов происходит в полости одномерного волновода, т.е. энергия в нем (вектор Пойнтинга) распространяется вдоль одной координаты z.

Зондирующий импульс любой формы $p(0, t)$ представляет собой широкополосный сигнал, комплексный амплитудный спектр которого определяется преобразованием Фурье [17]:

$$\dot{S}(0,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(0,t)\, e^{-j\omega t}. \quad (1)$$

Импульс, дошедший до границы раздела сред, на текущем уровне заполнения резервуара H будет иметь вид [18]

$$p(H,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(0,\omega) e^{j[\omega t - \dot{k}_1(\omega)H]} d\omega, \quad (2)$$

его спектр определится как

$$\dot{S}(H,\omega) = \dot{S}(0,\omega)\, e^{-j\dot{k}_1(\omega)H}, \quad (3)$$

где H – уровень заполнения резервуара, а $\dot{k}_1(\omega)$ – волновой вектор среды, в которой распространяется зондирующий импульс, определяется выражением [20]

$$\dot{k}(\omega) = \frac{\omega}{c}\left(1 - j\frac{b\omega}{2\rho c^2}\right). \quad (4)$$

Здесь c – фазовая скорость звука, ρ – плотность среды,

$$b = \frac{4}{3}\eta + \zeta + \xi\frac{C_P - C_V}{C_P C_V} \quad (5)$$

– диссипативный коэффициент, где η, ζ, ξ, C_P, C_V – динамическая вязкость, вторая вязкость и коэффициент теплопроводности среды, удельные теплоемкости среды в изобарном и изохорном процессах соответственно.

Спектр отраженного от границы сред сигнала $\dot{S}_1(H,\omega)$ определится как

$$\dot{S}_1(H,\omega) = \dot{K}(\omega)\dot{S}(H,\omega), \tag{6}$$

где $\dot{K}(\omega)$ – коэффициент отражения. Форма отраженного сигнала определится через обратное преобразование Фурье по формуле [21, 22]

$$p_1(H,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_1(H,\omega)e^{j\omega t}d\omega. \tag{7}$$

Коэффициент отражения акустического сигнала на границе раздела двух сред является комплексной величиной, зависит от плотности и при нормальном падении определяется по формуле [18]

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{z}_{II}(\omega) - \dot{z}_I(\omega)}{\dot{z}_{II}(\omega) + \dot{z}_I(\omega)}, \tag{8}$$

где

$$\dot{z}_I = \frac{\rho_I^2 c_I^3}{\rho_I c_I^2 - jb_I\omega}, \tag{9}$$

$$\dot{z}_{II} = \frac{\rho_{II}^2 c_{II}^3}{\rho_{II} c_{II}^2 - jb_{II}\omega}, \tag{10}$$

$\dot{z}_I, \dot{z}_{II}$ – акустические импедансы контактирующих сред (см. рис. 1), $c_I, c_{II}, \rho_I, \rho_{II}, b_I, b_{II}$ – скорости звука, плотности и диссипативные коэффициенты контактирующих сред.

Основываясь на положениях [18], коэффициент отражения определится как

$$\dot{K}(\omega) = \frac{(\rho_{II}^2 c_{II}^3)(\rho_I c_I^2 - jb_I\omega) - (\rho_I^2 c_I^3)(\rho_{II} c_{II}^2 - jb_{II}\omega)}{(\rho_{II}^2 c_{II}^3)(\rho_I c_I^2 - jb_I\omega) + (\rho_I^2 c_I^3)(\rho_{II} c_{II}^2 - jb_{II}\omega)}. \tag{11}$$

Вопросы расчета коэффициента отражения, особенно при работе в области низких частот, рассмотрены в [23]. Отметим, что далее приведены результаты, в которых опущено влияние вязкости при измерении требуемых параметров. Это связано с тем, что процедуры контроля уровня и плотности производятся на расстояниях (ограничены высотой резервуара) и в диапазоне частот (до 500 кГц), в которых влияние диссипативных коэффициентов (5) незначительно.

В [26] приведены результаты исследований по выявлению аналитических зависимостей, связывающих скорости звука в средах с их плотностями. При этом учитывалось, что жидкие среды могут быть сгруппированы по плотностям, и для каждой группы может быть найдена полиномиальная зависимость, определяемая в общем виде выражением

$$c = f(\rho) = \sum_{k=0}^{n} a_k \rho^k. \tag{12}$$

Так, например, эта зависимость для жидких товарных нефтепродуктов в диапазоне плотностей 0.7–0.95 кг/м^3 имеет вид

$$c(\rho) = 6.237\times10^3 - 2.22\times10^4\rho + 3.003\times10^4\rho^2 - 1.249\times10^4\rho^3. \tag{13}$$

Если рассматриваемые контактирующие среды могут быть отнесены к одной плотностной группе и зависимости скоростей распространения звука в средах и плотностей могут быть выражены одной функцией $f_1(\rho) = \sum_{k=0}^{n} a_k\rho^k$, тогда выражение для коэффициента отражения примет вид

$$K = \frac{\sum_{k=0}^{n} a_k(\rho_{II}^{k+1} - \rho_I^{k+1})}{\sum_{k=0}^{n} a_k(\rho_{II}^{k+1} + \rho_I^{k+1})} = \frac{\sum_{k=0}^{n} a_k\rho_I^{k+1}\left[\left(\frac{\rho_{II}}{\rho_I}\right)^{k+1} - 1\right]}{\sum_{k=0}^{n} a_k\rho_I^{k+1}\left[\left(\frac{\rho_{II}}{\rho_I}\right)^{k+1} + 1\right]}.$$

Данное выражение определяет зависимость коэффициента отражения от отношения плотностей контактирующих сред. Из него видно, что коэффициент отражения K, являясь функцией плотности, в большей степени зависит от отношения плотностей контролируемых сред.

Форма сигнала, прошедшего среду распространения I, отразившегося от контролируемой среды II и вернувшегося в точку излучения, определяется выражением

$$p(2H,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(\omega)\dot{S}(H,\omega)e^{j[\omega t - \dot{k}_1(\omega)H]}d\omega. \tag{14}$$

Спектры зондирующего и отраженного от контролируемой среды сигналов связаны соотношением

$$\dot{S}_1(2H,\omega) = \dot{K}(\omega)\dot{S}(0,\omega)e^{-j2\dot{k}_1(\omega)H}. \tag{16}$$

Таким образом, уровень наполнения резервуара определится как

$$H = \frac{j}{2\dot{k}_1(\omega)}\ln\left(\frac{\dot{S}_1(2H,\omega)}{\dot{K}(\omega)\dot{S}(0,\omega)}\right). \tag{17}$$

Спектры $\dot{S}(0,\omega)$ и $\dot{S}_1(2H,\omega)$ с учетом формулы Эйлера могут быть представлены в показательной форме, тогда выражение (16) примет вид

$$\frac{A(2H,\omega)}{A(0,\omega)}e^{j(\varphi(2H,\omega)-\varphi(0,\omega))} = \left|\dot{K}(\omega)\right|e^{-j\dot{k}_1(\omega)2H}. \tag{18}$$

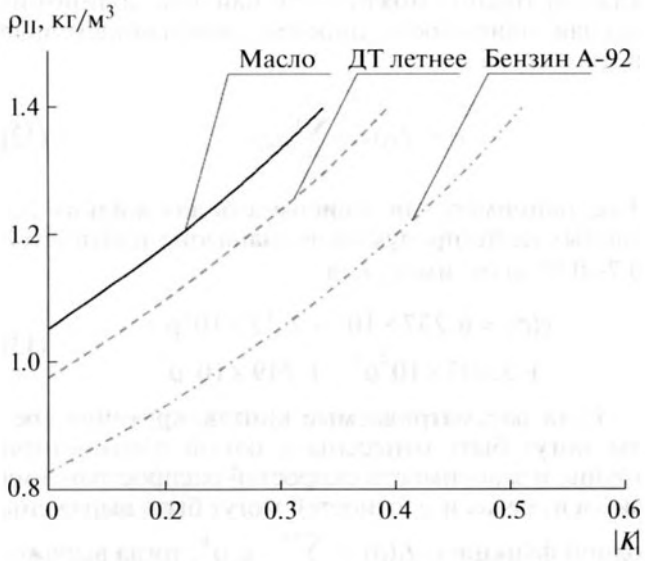

Рис. 2. Графики зависимостей плотности отражающей среды от модуля комплексного коэффициента отражения.

Если не учитывать поглощение сред, в выражении (18) отношение модулей спектров зондирующего и отраженного сигналов $\frac{A(2H,\omega)}{A(0,\omega)}$ и модуль коэффициента отражения $|\dot{K}(\omega)|$ определяют действительные части спектров, а показатели экспоненты – их мнимые части. Вычисление отношения модулей амплитудных спектров и разницы фаз зондирующего и отраженного сигналов производится по данным осциллограмм, получаемых при проведении измерений. Из выражения (18) получаем

$$\frac{A(2H,\omega)}{A(0,\omega)} = |\dot{K}(\omega)|, \tag{19}$$

$$\varphi(2H,\omega) - \varphi(0,\omega) = -\dot{k}_1(\omega)2H. \tag{20}$$

Выражение (20) с учетом (4) преобразуется в зависимость уровня налива продукта от разницы фазовых составляющих спектров зондирующего и отраженного импульсов:

$$H = \frac{c_1}{2\omega}(\varphi(0,\omega) - \varphi(2H,\omega)) = \frac{f_1(\rho_1)}{2\omega}\Delta\varphi. \tag{21}$$

При расчетах уровня используются значения фазовых составляющих спектров на определенных частотных выборках ω_i. Под частотной i-ой выборкой понимается конкретное значение фазовых составляющих спектров $\varphi(0,\omega)$ и $\varphi(2H,\omega)$ на частоте ω_i. Для данных расчетов в качестве среды распространения импульсов принимался бензин А-92 (плотность среды $\rho_1 = 0.744$ кг/м^3). Из выражения (21) видно, что чем меньше частота, на которой производится выборка отсчета спектров, тем больше диапазон измеряемых уровней наполнения резервуара [24].

Аналогично методике вычисления выражения для уровня с использованием показательных форм представления спектров зондирующего и отраженного сигналов, для плотности получим

$$f_2(\rho_{II})\rho_{II} = f_1(\rho_1)\rho_1 \frac{1 + \frac{A(2H,\omega)}{A(0,\omega)}}{1 - \frac{A(2H,\omega)}{A(0,\omega)}}. \tag{22}$$

В случае если контактирующие среды относятся к различным плотностным группам и зависимости скоростей звука от плотностей для них могут быть представлены линейными зависимостями с коэффициентами полинома d_0, d_1 для среды I и a_0, a_1 для среды II, получим выражение, определяющее плотность контролируемого продукта ρ_{II}:

$$\rho_{II} = \frac{-a_0 + \sqrt{a_0^2 + 4a_1(d_0 + d_1\rho_1)\rho_1 \frac{1 + |K(\omega)|}{1 - |K(\omega)|}}}{2a_1}. \tag{23}$$

В (23) выражение $|K(\omega)|$ есть отношение амплитудных составляющих спектров зондирующего и отраженного сигналов согласно (19) на определенной частоте ω_i. Согласно приведенным выражениям произведены расчеты плотности отражающей среды (рис. 2) для случаев, если в качестве среды распространения импульсов используются бензин А-92 (плотность среды $\rho_1 = 0.744$ кг/м^3), дизельное топливо летнее (плотность среды $\rho_1 = 0.841$ кг/м^3) и масло (плотность среды $\rho_1 = 0.877$ кг/м^3) [25].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках подтверждения теоретических положений разрабатываемого метода были произведены экспериментальные исследования, для чего изготовлен лабораторный стенд для исследования процессов распространения акустических импульсов в однородных стационарных средах (рис. 3). Согласно рис. 1, в емкости должен быть расположен волновод, уровень и плотность жидкости в котором соответствуют уровню и плотности жидкости в контролируемом резервуаре. В силу этого в лабораторном стенде резервуар не использовался, производился контроль параметров жидкости в полости волновода, в качестве которого была выбрана труба общего назначения диаметром 40 мм. В полость волновода вмонтирован акустический датчик цилиндрической формы, выполненный из пьезоэлектрического материала ЦТС-19, толщиной 13 мм, диаметром 40 мм (на рис. 3 светло-серый цилиндр, закрепленный в

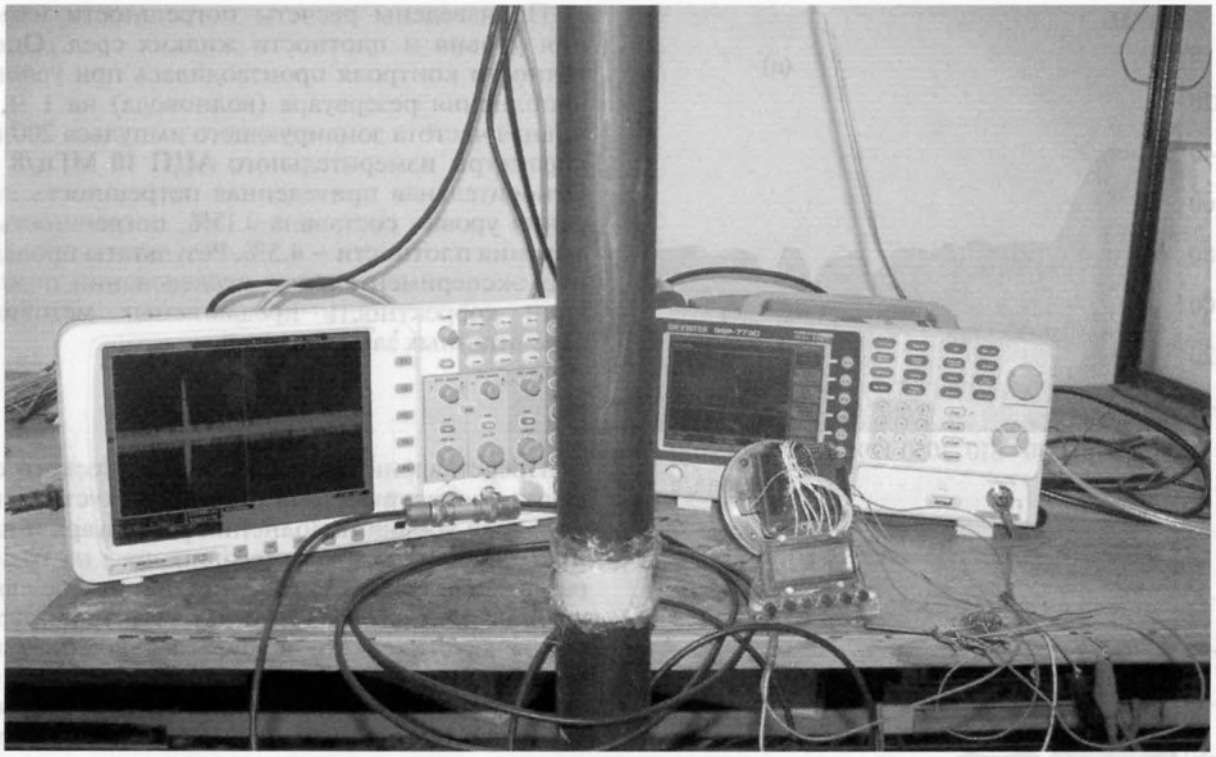

Рис. 3. Лабораторный стенд.

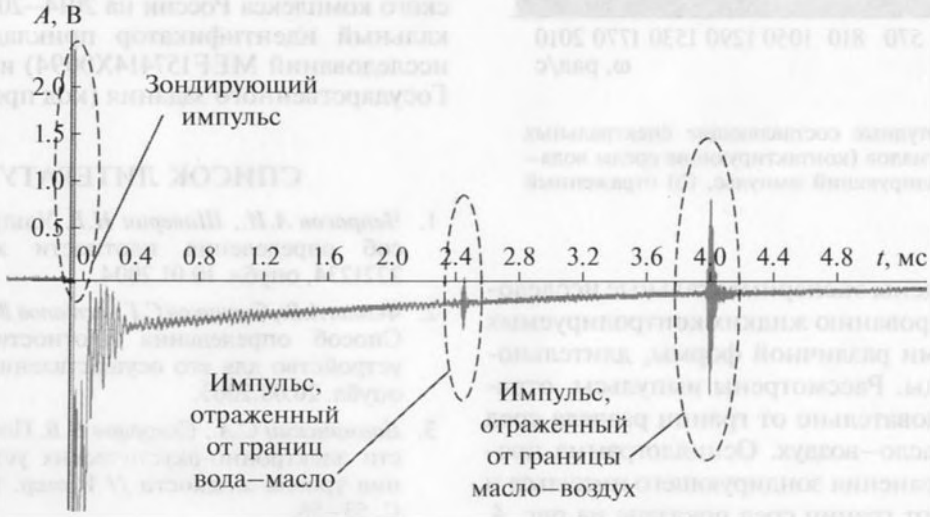

Рис. 4. Осциллограмма процесса распространения зондирующего импульса прямоугольной формы (t = 2 мкс, A = 35 В) и отражения от границ сред вода–масло и масло–воздух.

полости черной трубы). Отметим, что в данном эксперименте акустический датчик располагается в нижней точке волновода, поверх него в полость заливался слой воды (среда распространения), затем слой масла (среда отражения). Поскольку целью эксперимента является определение параметров масла, схема реализации лабораторного стенда отличается от теоретической модели (рис. 1) поворотом на 180 градусов. Согласно рис. 1, к акустическому датчику подключены цифровой запоминающий осциллограф АКИП-4122/4V и импульсный генератор зондирующих импульсов.

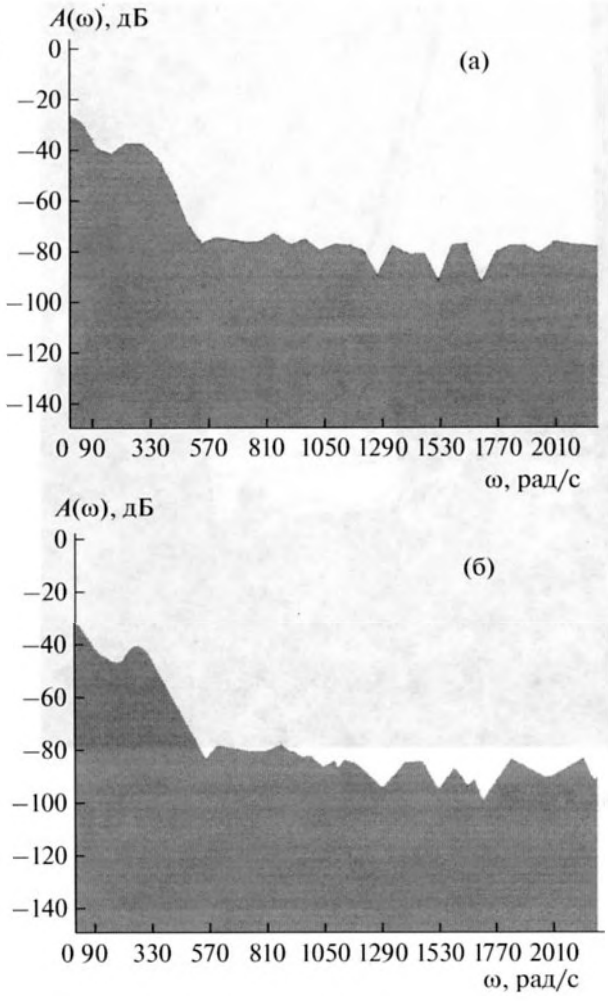

Рис. 5. Амплитудные составляющие спектральных плотностей сигналов (контактирующие среды вода–масло): (а) зондирующий импульс, (б) отраженный импульс.

Были проведены экспериментальные исследования по зондированию жидких контролируемых сред импульсами различной формы, длительности и амплитуды. Рассмотрены импульсы, отраженные последовательно от границ раздела сред вода–масло, масло–воздух. Осциллограмма процесса распространения зондирующего импульса и отражения его от границ сред показана на рис. 4. Для получения данных о плотности и уровне согласно предлагаемым методам произведено преобразование Фурье зондирующего и отраженного акустических импульсов, получены разложения амплитудных (рис. 5) и фазовых оставляющих спектров по частотам. Для расчета требуемых параметров выбираются отсчеты амплитудной или фазовой составляющих спектров, искомые уровень и плотность рассчитываются согласно выражениям (21)–(23).

Произведены расчеты погрешности измерения уровня и плотности жидких сред. Оценка точности контроля производилась при условиях наполнения резервуара (волновода) на 1 м, основная частота зондирующего импульса 200 кГц, параметры измерительного АЦП 10 МГц/8 бит. Относительная приведенная погрешность измерения уровня составила 0.15%, погрешность измерения плотности – 4.5%. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили корректность предлагаемых методик и рассчитанных зависимостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены элементы теоретического описания процедуры дистанционного акустического контроля уровня наполнения резервуара и плотности жидких контактирующих сред на границе раздела. Получены выражения, напрямую связывающие спектр отраженного от контролируемой среды акустического импульса с комплексным коэффициентом отражения, содержащим в себе информацию о плотности контролируемого жидкого энергоносителя и уровнем налива жидкости.

Работа выполнена в СГАУ при финансовой поддержке Минобрнауки России. В статью включены результаты, полученные в рамках реализации ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” (уникальный идентификатор прикладных научных исследований MEF157414X0094) и базовой части Государственного задания (код проекта 2760).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чепрасов А.И., Шаверин Н.В.* Ультразвуковой способ определения плотности жидкости. Пат. 2221234, опубл. 10.01.2004.
2. *Фомин А.В., Синников С.Г., Астапов В.Н., Скворцов Б.В.* Способ определения плотности жидкостей и устройство для его осуществления. Пат. 2210764, опубл. 20.08.2003.
3. *Борминский С.А., Скворцов Б.В.* Повышение точности электронно-акустических устройств измерения уровня жидкости // Измер. техн. 2006. № 8. С. 53–56.
4. *Калинов Г.А., Кондратьев А.И., Никитин О.А., Римлянд В.И.* О точности измерения уровня жидкости в резервуарах акустическим эхо-методом // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 564–566.
5. *Римлянд В.И., Казарбин А.В., Калинов Г.А.* Автоматизированная система измерения уровня жидкости в резервуарах // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 3. С. 47–50.
6. *Смирнов А.В., Мясников В.И.* Измеритель уровня затрубной жидкости нефтедобывающей скважины, использующий сложные сигналы // Вест. Чу-

ваш. университета. Чебоксары: ЧГУ, 2007. № 2. С. 261–264.

7. *Налимов К.Г.* Определение уровня жидкости в затрубном пространстве скважин методом эхометрирования с зондированием многоимпульсными сигналами // Нефтян. хозяйство. 2006. № 4. С. 112–114.

8. *Стрижак В.А., Надзвецкая О.В., Буденков Г.А.* Акустический эхолот для измерения уровня жидкости в затрубном пространстве добывающих скважин / Тез. докл. 3-й Междунар. конференции "Диагностика трубопроводов". М. 2001. С. 185.

9. *Цехановский С.А., Макаров В.С., Солдатов А.И., Сорокин П.В.* Система количественного учета пива в форфасном цехе / Матер. Всерос. научно-практической конференции "Электронные средства системы управления". Томск: ИОА СО РАН, 2003. С. 126.

10. *Солдатов А.И., Цехановский С.А.* Ультразвуковой расходомер с волноводным акустическим трактом // Изв. Юж. федер. университета. Техн. науки. 2008. № 5. С. 163–167.

11. *Гордеев Б.Н., Грешнов А.Ю., Жуков Ю.Д.* Применение методов импульсной рефлектометрии для измерения уровня и расстояния до раздела жидких сред // Изв. вузов. Электромеханика. 1995. № 4(94). С. 27–29.

12. *Kim Y.G., Lee J.S., Lim K.T.* Liquid level measuring apparatus and method. Pat. US 6546794 B2. Date of patent: Apr. 15, 2003.

13. *Haynie C.R., Wilson J.D.* Method and apparatus for acoustically measuring the level of liquid in a tank. Pat. US 5822274. Date of patent: Oct. 13, 1998.

14. *Ватульян А.О., Моргунова А.В.* Исследование дисперсионных свойств цилиндрических волноводов с переменными свойствами // Акуст. журн. 2015. № 3. С. 295–301.

15. *Тетерин Е.В., Тарасов И.Е., Потехин Д.С.* Неразрушающий контроль жидкостей различного назначения на основе акустических измерений // Контроль. Диагностика. 2000. № 7. С. 33–37.

16. *Глебович Г.В., Андриянов А.В., Введенский Ю.В.* Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.

17. *Вайнштейн Л.А.* Распространение импульсов // УФН. 1976. Т. 118. № 2. С. 339–366.

18. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

19. *Борминский С.А., Солнцева А.В.* Электронно-акустическое устройство измерения уровня и плотности нефтепродуктов. Пат. 150171, МПК G01F23/28, G01N29/024, G01N9/00, опубл. 10.02.2015.

20. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.

21. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. 236 с.

22. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 513 с.

23. *Волощенко А.П., Тарасов С.П.* Эффект аномальной прозрачности границы раздела жидкость–газ для звуковых волн // Акуст. журн. 2013. № 2. С. 186–192.

24. *Солнцева А.В., Борминский С.А.* Метод измерения уровня заполнения резервуара на основе спектрального анализа отраженного от контролируемой среды акустического импульса // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 348–351.

25. *Солнцева А.В., Скворцов Б.В., Борминский С.А.* Метод контроля плотности жидких сред по спектральным характеристикам отраженных акустических импульсов // Известия СНЦ РАН. 2014. Т. 16. № 6. С. 85–88.

26. *Солнцева А.В., Скворцов Б.В., Борминский С.А.* Дистанционные методы контроля параметров жидких продуктов в емкостях резервуарного парка. Самара: АНО "Издательство СНЦ", 2015. С. 51.