

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

© 2014 А.В. Солнцева, Б.В. Скворцов, С.А. Борминский

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 25.11.2014

В статье рассмотрен метод контроля плотности жидкой среды, находящейся в емкости резервуарного парка. Метод основан на спектральном анализе зондирующего и отраженного от контролируемой среды акустических импульсов.

Ключевые слова: акустический импульс, спектральная плотность, отражение, жидкая среда.

Плотность является одним из важных показателей, характеризующих качества веществ, в том числе и жидких сред. Контроль плотности является актуальной задачей для многих отраслей промышленности, включая нефтеперерабатывающую, пищевую, химическую, медицинскую, лакокрасочную и другие, где по плотности могут судить о качестве исходного сырья, правильности проведения технологических процессов и других процедурах. Известно большое количество методов контроля плотности, отвечающих различным технологическим требованиям. Различные свойства жидких сред могут контролироваться импульсными методами, такие исследования широко известны [1, 2, 3].

Предлагается устройство для акустических измерений, позволяющее производить комплексный контроль плотности жидкой среды в резервуаре и уровня его наполнения посредством использования одного акустического датчика. На рис. 1 представлена структурная схема данного устройства, которое устанавливается в полости резервуара. Устройство состоит из волновода 1, размещенного в горизонтальной плоскости распространения импульса (параллельно дну резервуара) и волновода 2, размещенного в вертикальной плоскости распространения импульсов (перпендикулярно дну резервуара). В полость волновода 1 устанавливается акустический датчик (пьезоэлектрический преобразователь) 3, который является одновременно излучателем и приемником сигналов. На стыке открытых кон-

цов волноводов 1 и 2 устанавливается зеркальная пластина 4 для отражения импульсов из горизонтальной плоскости распространения в вертикальную и обратно. Между открытым концом волновода 1 и отражающей пластиной 4 существует технологическое отверстие, предназначенное для свободного хода продукта в полости волноводов. Генератор 5 выдает зондирующие импульсы на акустический датчик 3, вернувшийся отраженный сигнал принимается также датчиком 3 и передается в устройства 6 и 7 для определения времени распространения импульса в полости волноводов, а также проведения спектрального анализа. Устройство позволяет:

- осуществлять комплексные измерения уровня и плотности жидких сред, находящихся в резервуаре,
- устранить проблему получения неточных данных при наличии пены на поверхности продукта,
- уменьшить возможность загрязнения датчика,
- учесть влияние «мёртвой» зоны акустического датчика.

Предлагается использовать для контроля плотности отражающей поверхности метод импульсного акустического зондирования. Сущность импульсного зондирования состоит в следующем. Посредством применения акустического датчика в направлении контролируемой среды излучается зондирующий импульс $p(0,t)$, (точка излучения принимается за начало координат). Дойдя до границы раздела сред, при этой пройдя расстояние H , импульс искажается за счет свойств среды распространения (среда I) и преобразуется в импульс $p(H,t)$. Этот импульс частично отражается от поверхности раздела, частично преломляется, проходя в контролируемую среду (среда II), таким образом, разделяясь на два импульса: $p_1(H,t)$ и $p_2(H,t)$. Эти импульсы, искаженные по форме и амплитуде относитель-

Солнцева Александра Валерьевна, аспирант кафедры электротехники. E-mail: als063@mail.ru

Скворцов Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника», научный руководитель НИЛ «Аналитические приборы и системы».

E-mail: aps@ssau.ru.

Борминский Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника».

E-mail: aps@ssau.ru.

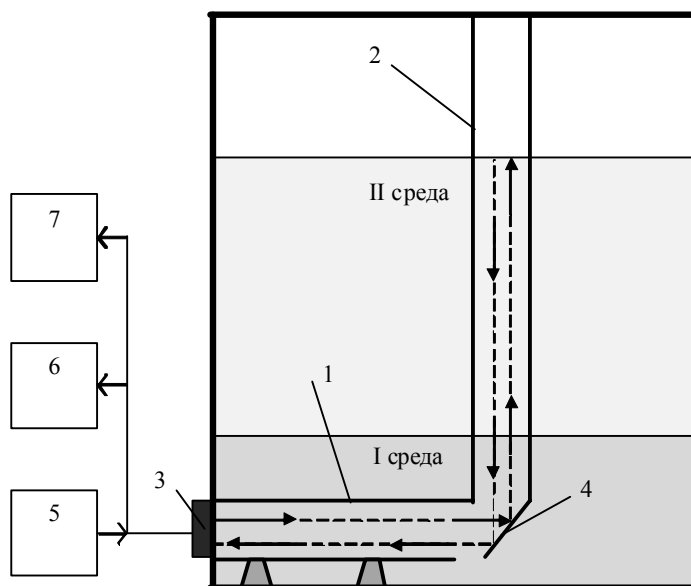


Рис. 1. Конструкция устройства для акустического контроля:

1, 2 – волноводы, 3 – акустический датчик, 4 – зеркальная пластина, 5 – генератор зондирующих импульсов, 6 – блок измерения времени, 7 – блок спектрального анализа

но зондирующего импульса, несут в себе информацию свойствах контролируемого продукта, в том числе и плотности.

В рамках математического моделирования процедуры контроля плотности приняты следующие допущения.

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

2. Среда линейна и пассивна с точки зрения электромагнитных свойств.

3. Распространение акустических сигналов происходит по полости одномерного волновода, то есть энергия в нем (вектор Пойтинга) распространяется вдоль одной координаты z .

Зондирующий импульс любой формы $p(0, t)$ представляет собой сгусток энергии, возбуждающий вокруг себя набор колебаний разных частот, комплексный амплитудный спектр которых определяется преобразованием Фурье [2]:

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

В работах [4, 5] на основе теоретических положений, изложенных в [1-3] показана общая математическая модель распространения импульсов в однородных стационарных средах. Спектральная плотность отраженного от контролируемой среды сигнала, прошедшего расстояние $2H$ (от точки излучения до границы сред и обратно), $S(2H, j\omega)$ определяется по выражению:

$$S(2H, j\omega) = K(j\omega) S(0, j\omega) e^{-j2k_1(j\omega)H} \quad (2)$$

где $K(j\omega)$ – коэффициент отражения,

$$k(j\omega) = \frac{\omega}{c} \left(1 - j \frac{b\omega}{2\rho c^2} \right) \quad (3)$$

– волновой вектор среды, где c – фазовая скорость звука,

ρ – плотность среды,

$$b = \frac{4}{3} \eta + \zeta + \xi \frac{C_p - C_v}{C_p C_v} \quad (4)$$

– диссипативный коэффициент, где h, z, x, C_p, C_v – динамическая вязкость, вторая вязкость и коэффициент теплопроводности среды, удельные теплоемкости среды в изобарном и изохорном процессах соответственно.

Коэффициент отражения определится как [3]:

$$K(j\omega) = \frac{z_{II}(j\omega) - z_I(j\omega)}{z_{II}(j\omega) + z_I(j\omega)} \quad (5)$$

$$\text{где } z_I = \frac{\rho_I c_I^3}{\rho_I c_I^2 - j b_I \omega}, \quad z_{II} = \frac{\rho_{II} c_{II}^3}{\rho_{II} c_{II}^2 - j b_{II} \omega} \quad (6)$$

z_I, z_{II} – акустические импедансы контактирующих сред,

$c_I, c_{II}, \rho_I, \rho_{II}, b_I, b_{II}$ – скорости звука, плотности и диссипативные коэффициенты контактирующих сред.

Скорости звука c_p, c_{II} в средах могут быть представлены как полиномиальные зависимости от плотности и в общем виде определяться выражением:

$$c = f(\rho) = \sum_0^n a_k \rho^k \quad (7)$$

Данные о плотности отражающей поверхно-

сти заключены в выражении для акустического импеданса среды в соответствие с (6). Преобразуя (5), получим выражение:

$$z_{II}(j\omega) = z_I(j\omega) \frac{K(j\omega) + 1}{1 - K(j\omega)}. \quad (8)$$

Если не учитывать поглощение сред ($b=0$), тогда (8) примет вид:

$$c_{II}\rho_{II} = c_I\rho_I \frac{K + 1}{1 - K}.$$

Выражаем из (2) коэффициент отражения $K(j\omega)$, а также с учетом (7) представляя скорости звука как функции плотности $f_1(\rho_I), f_2(\rho_{II})$, получим:

$$f_2(\rho_{II})\rho_{II} = f_1(\rho_I)\rho_I \frac{\frac{S_I(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)} + e^{-2j\frac{\omega}{f_1(\rho_I)}H}}{e^{-2j\frac{\omega}{f_1(\rho_I)}H} - \frac{S_I(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)}}. \quad (9)$$

При учете поглощения сред для расчета зависимости плотности среды II, получим, что выражение (9) имеет вид:

$$\frac{c_{II}^2\rho_{II}^2}{c_{II}\rho_{II} - jb_{II}\omega} = \frac{c_I^2\rho_I^2}{c_I\rho_I - jb_I\omega} \cdot \frac{\frac{S_I(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)} + e^{-j\omega\frac{2c_I\rho_I - jb_I}{c_I^2\rho_I}H}}{e^{-j\omega\frac{2c_I\rho_I - jb_I}{c_I^2\rho_I}H} - \frac{S_I(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)}}. \quad (10)$$

Рассмотрев скорость звука как функцию плотности, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{(f_2(\rho_{II}))^2\rho_{II}^2}{(f_2(\rho_{II}))^2\rho_{II} - jb_{II}\omega} &= \\ &= \frac{(f_1(\rho_I))^2\rho_I^2}{(f_1(\rho_I))^2\rho_I - jb_I\omega} \cdot \frac{\frac{S_I(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)} + e^{-j\omega\frac{2f_1(\rho_I)\rho_I - jb_I}{(f_1(\rho_I))^2\rho_I}H}}{e^{-j\omega\frac{2f_1(\rho_I)\rho_I - jb_I}{(f_1(\rho_I))^2\rho_I}H} - \frac{S_I(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)}}. \quad (11) \end{aligned}$$

Полученные выражения включают в себя спектральные плотности $S(0, j\omega)$ и $S(2H, j\omega)$, которые являются комплексными числами. Для дальнейшего анализа удобно с учетом формулы Эйлера представить их в показательной форме следующим образом:

$$S(0, j\omega) = A(0, \omega)e^{j\varphi(0, \omega)}, \quad (12)$$

$$S(2H, j\omega) = A(2H, \omega)e^{j\varphi(2H, \omega)}. \quad (13)$$

Выразив отношение спектральных плотностей $S(0, j\omega)$ и $S(2H, j\omega)$ из выражения (2), (12), (13), получим выражения:

$$\frac{S(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)} = K(j\omega)e^{-jk_I(j\omega)2H} \quad (14)$$

$$\frac{S(2H, j\omega)}{S(0, j\omega)} = \frac{A(2H, \omega)e^{j\varphi(2H, \omega)}}{A(0, \omega)e^{j\varphi(0, \omega)}}. \quad (15)$$

Приравняв выражения (14) и (15), получим:

$$\frac{A(2H, \omega)}{A(0, \omega)} e^{j(\varphi(2H, \omega) - \varphi(0, \omega))} = |K(j\omega)| e^{-jk_I(j\omega)2H} \quad (16)$$

При рассмотрении случая, не учитывающего поглощения сред, в выражении (16) отношение модулей спектральных плотностей зондирующе-

го и отраженного сигналов $\frac{A(2H, \omega)}{A(0, \omega)}$ и модуля

коэффициента отражения $|K(j\omega)|$ определяют действительные части спектральных плотностей, а показатели степени e - их мнимые части. Поскольку комплексные числа равны в том случае, если равны их действительные и мнимые части, получим выражение, определяющее модуль комплексного коэффициента отражения через отношение модулей спектральных плотностей зондирующего и отраженного импульсов:

$$\frac{A(2H, \omega)}{A(0, \omega)} = |K(j\omega)|, \quad (17)$$

Тогда согласно (16) и (17) получим выражение, определяющее зависимость плотности отражающей среды от отношения модулей спектральных плотностей контролируемых сигналов без учета поглощения сред:

$$c_{II}\rho_{II} = c_I\rho_I \frac{\frac{A(2H, \omega)}{A(0, \omega)} + 1}{1 - \frac{A(2H, \omega)}{A(0, \omega)}} = c_I\rho_I \frac{|K(\omega)| + 1}{1 - |K(\omega)|}. \quad (18)$$

Если представить скорости звука в средах как функции плотности, выражение (18) примет вид:

$$f_2(\rho_{II})\rho_{II} = f_1(\rho_I)\rho_I \frac{|K(\omega)| + 1}{1 - |K(\omega)|}. \quad (19)$$

При известных параметрах среды I, правая часть выражения (19) сводится к действительному числу, а левая будет представлять полином степени $(k+1)$, где $f_2(\rho_{II})$ определяется в соответствие с (7). В простейшем случае, когда $f_2(\rho_{II}) = a_1 \cdot \rho_{II} + a_0$ - линейная зависимость с коэффициентами a_0, a_1 , выражение (19) будет представлять собой квадратное уравнение относительно ρ_{II} . В таком случае выражение для плотности контролируемого продукта c_{II} из (19) определится как:

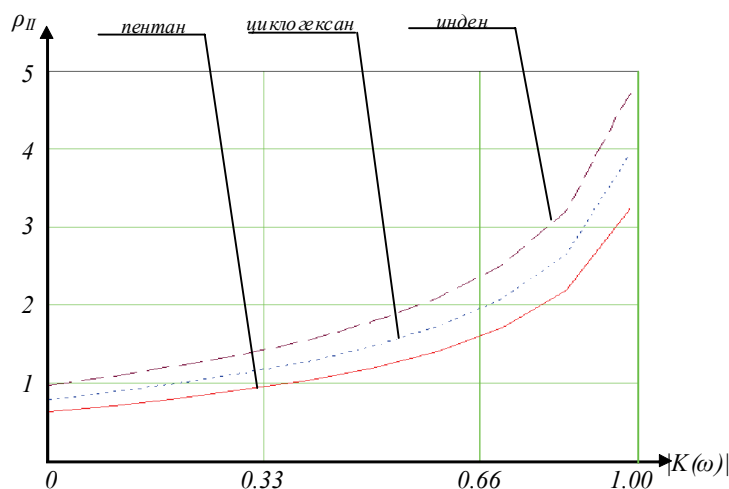


Рис. 2. График зависимости плотности отражающей среды от модуля комплексного коэффициента отражения

$$\rho_{II} = \frac{-a_0 + \sqrt{a_0^2 + 4a_1 \cdot f_1(\rho_I)\rho_I \frac{|K(\omega)| + 1}{1 - |K(\omega)|}}}{2a_1}. \quad (20)$$

Пример расчета зависимости плотностей отражающих сред от отношения модулей спектральных плотностей зондирующего и отраженного импульсов представлен на рис. 2. Показаны три варианта зависимостей для различных сред распространения зондирующих импульсов: пентан ($c=0,6263 \text{ кг/м}^3$), циклогексан ($c=0,8109 \text{ кг/м}^3$), инден ($c=0,9638 \text{ кг/м}^3$).

Выражения (1) - (20) определяют общую методику контроля плотности жидких сред в резервуарных парках. На практике, данная методика наиболее эффективна применима, когда плотности контролируемых сред ρ_I , ρ_{II} соизмеримы, тогда коэффициент отражения зондирующего импульса есть значение из интервала (0,1). Пример такого случая, измерение плотности продук-

та, находящегося над уровнем подтоварной воды в резервуаре. Также метод может быть применен для решения задач химической промышленности, связанных с работой с многофазными растворами и другими жидкими средами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В.Глебович, А.В.Андрьянов, Ю.В.Введенский. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
2. Вайнштейн Л.А. Распространение импульсов // Успехи физических наук. 1976. Т.118. №2. С.339-366.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
4. Солнцева А.В. Математическое описание импульсных сигналов, отраженных от границы раздела сред // Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции "XII Королевские чтения". 2013. С.136.
5. Скворцов Б.В., Лезин И.А., Солнцева А.В. Математическое моделирование и расчет распространения направленных импульсов в однородных поглощающих средах // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т.13. №6. С.41-47.

METHOD CONTROLLING DENSITY OF LIQUID MEDIUM BASED ON SPECTRAL CHARACTERISTICS OF REFLECTED ACOUSTIC IMPULSES

© 2014 A.V. Solntseva, B.V. Skvortsov, S.A. Borminsky

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article describes a control method of liquid medium density in a pool of tanks. Method is based on spectral analysis of information about impulses sounding and reflected from liquid medium.

Keywords: acoustic impulse, spectral density, reflection, liquid medium

Alexandra Solntseva, Graduate Student at the of Electrical Engineering Department. E-mail: als063@mail.ru

Boris Skvortsov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Electrical Engineering Department, Scientific Supervisor of Scientific Research Laboratory "Analytical Devices and Systems". E-mail: aps@ssau.ru

Sergey Borminsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Electrical Engineering Department.

E-mail: aps@ssau.ru