Солнцева А.В.

*ФГАОУ ВО "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П.Королева (национальный исследовательский университет)"*

Россия, г. Самара

DOI:10.18411/lj2015-10-28-31

Исследование зависимости коэффициента отражения от плотности контактирующих жидких сред

При реализации метода импульсного акустического зондирования с целью определения качественных и количественных параметров жидких сред, таких как уровень, плотность, вязкость, необходимо и использовать значение коэффициента отражения от границы сред [1].

Коэффициент отражения акустического сигнала на границе раздела двух сред является комплексной величиной, зависит от плотности и скорости распространения и при нормальном падении определяется по формуле [2].

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

где

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

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.

При отсутствии поглощения сред, то есть при $b = 0$, имеем

$$z_I = \rho_I c_I, \quad z_{II} = \rho_{II} c_{II} \quad (3)$$

После подстановок выражение для коэффициента отражения примет вид:

$$K = \frac{c_{II} \rho_{II} - c_I \rho_I}{c_{II} \rho_{II} + c_I \rho_I} \quad (4)$$

Как видно из (4) коэффициент отражения является функцией, зависящей от скоростей звука в средах и их плотностей. Зависимость, связывающая скорость звука с плотностью контролируемой среды, известна из [2]:

$$c = \frac{\rho}{\sqrt{K_\beta}} \approx K_C \rho, \quad (5)$$

где K_β - коэффициент связи между плотностью и сжимаемостью, для тяжелых топлив составляет $K_\beta = 0,366 \cdot 10^{-6} [\text{Па}^{-1}]$,

K_C - коэффициент связи между плотностью и скоростью звука, для продуктов с относительной плотностью 0,8 – 0,95 $K_C = 1654 [\text{м}^4/\text{сек} \cdot \text{кг}]$.

Уточнение данной зависимости возможно при использовании полиномиальной аппроксимации данных о скорости звука и плотности жидких сред. В таблице 1 представлены данные о скоростях звука и плотностях жидких сред - компонентов сложных нефтепродуктов.

Произведен регрессионный анализ данных таблицы 1, использован метод полиномиальной регрессии с различными значениями степени полинома k . При $k=1$ полиномом является прямая линия, приведенная погрешность регрессии составляет $\gamma=5,4\%$, при $k=2$ - $\gamma=2,1\%$, при $k=3$ - $\gamma=1,4\%$. Получена аналитическая зависимость, связывающая скорость звука в среде с ее плотностью, рассчитанную для чистых компонентов нефтепродуктов:

$$c(\rho) = -1.427 \cdot 10^4 + 5.537 \cdot 10^4 \cdot \rho - 6.604 \cdot 10^4 \cdot \rho^2 + 2.643 \cdot 10^4 \cdot \rho^3 \quad (6)$$

Коэффициент отражения, рассчитанный с использованием аналитических зависимостей, связывающих скорость звука и плотность среды, можно представить как функцию, зависящую только от плотностей контролируемых сред:

$$K = \frac{f_2(\rho_{II}) \cdot \rho_{II} - f_1(\rho_I) \cdot \rho_I}{f_2(\rho_{II}) \cdot \rho_{II} + f_1(\rho_I) \cdot \rho_I} \quad (7)$$

Таблица 1

Значения плотности, скорости звука и динамической вязкости жидких компонентов
нефтепродуктов при температуре +20°C

Наименование продукта	Плотность, ρ_4^{20} , [кг/м ³]	Скорость звука, c , [м/сек]	Динамическая вязкость, η , [кг·10 ⁻⁶ /(м·сек)]
Пентан	0,6263	1008	240
Гексан	0,6548	1083	307
Гептан	0,6795	1162	417
Октан	0,7028	1197	546
Нонан	0,7178	1248	714
Циклогексан	0,7784	1284	970
Тиофен	0,8108	1300	658
Циклогексен	0,8109	1303	-
Толуол	0,8668	1328	584
Этилбензол	0,8665	1338	671
Бензол	0,8786	1326	652
Инден	0,9638	1475	-
Бензальдегид	1,046	1479	-

Если зависимость, связывающая скорость распространения звука с плотностью среды, представляется в виде полинома k -степени, то формула (7) преобразуется следующим образом:

$$K = \frac{\rho_{II} \cdot \sum_0^n a_k \cdot \rho_{II}^k - \rho_I \cdot \sum_0^n d_k \cdot \rho_I^k}{\rho_{II} \cdot \sum_0^n a_k \cdot \rho_{II}^k + \rho_I \cdot \sum_0^n d_k \cdot \rho_I^k} = \frac{\sum_0^n a_k \cdot \rho_{II}^{k+1} - \sum_0^n d_k \cdot \rho_I^{k+1}}{\sum_0^n a_k \cdot \rho_{II}^{k+1} + \sum_0^n d_k \cdot \rho_I^{k+1}} \quad (8)$$

Для случая когда, контактирующие среды - жидкие продукты (например, нефтепродукты и вода), то зависимость скорости распространения звука в средах может быть выражена одной полиномиальной зависимостью в силу соразмерности плотностей ρ_I и ρ_{II} . Тогда выражение для коэффициента отражения пример вид:

$$K = \frac{\sum_{k=0}^n a_k (\rho_{II}^{k+1} - \rho_I^{k+1})}{\sum_{k=0}^n a_k (\rho_{II}^{k+1} + \rho_I^{k+1})} = \frac{\sum_{k=0}^n a_k \rho_I^{k+1} \left[\left(\frac{\rho_{II}}{\rho_I} \right)^{k+1} - 1 \right]}{\sum_{k=0}^n a_k \rho_I^{k+1} \left[\left(\frac{\rho_{II}}{\rho_I} \right)^{k+1} + 1 \right]} \quad (9)$$

Выражение (9) определяет зависимость коэффициента отражения от отношения плотностей контактирующих сред. Из (9) видно, что коэффициент отражения K , являясь функцией плотности, в большей степени зависит от отношения плотностей контролируемых сред.

Рассмотрим варианты расчета коэффициента отражения по приведенным в таблице 1 значениям с использованием аналитической зависимости (6), связывающей скорость звука и плотность, и по формуле (5) с использованием коэффициента связи K_C . При расчете коэффициента отражения для случая, если I среда – воздух, коэффициент K близок к 1. Результаты расчета коэффициента отражения с использованием полученной аналитической зависимости (6) и известного коэффициента связи K_C представлены на рисунке 1.

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента отражения от отношения плотностей контролируемых сред (таблица 1)

Зависимости на рисунке 1 получены для варианта: среда распространения импульсов – пентан, среда отражения - среды из таблицы 1.

Анализ погрешности расчетов коэффициента отражения с учетом коэффициента связи K_C показал, что приведенная погрешность такого метода расчета составляет 11% для продуктов, с плотностями в диапазоне $0,8 - 0,95 \text{ кг/м}^3$ (границы применимости коэффициента K_C). Использование полученной зависимости (7) при расчете коэффициента отражения дает приведенная погрешность расчета, равную 2,2%, для продуктов в диапазоне плотностей $0,7 - 0,95 \text{ кг/м}^3$. Приведенные выше расчет коэффициента отражения проведены без учета поглощения контролируемых сред.

Также были проведены расчеты коэффициента отражения с учетом диссипативных коэффициентов (поглощения сред) которые показали, что влияние коэффициентов b_1, b_2 на коэффициент отражения составляет $3 \cdot 10^{-6} \%$.

Полученные данные могут быть использованы для уточнения расчетов значения коэффициента отражения акустических зондирующих импульсов от границы раздела двух контактирующих жидкостей при реализации методов контроля уровня, плотности, вязкости и других параметров жидких сред.

Список используемых источников информации

1. Солнцева, А.В. Метод измерения уровня заполнения резервуара на основе спектрального анализа отраженного от контролируемой среды акустического импульса / А.В.Солнцева, С.А.Бормиснский // «Научно-технический вестник Поволжья». – 2014. – №6. – С. 348-351.
2. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 344 с.
3. Скворцов, Б.В. Электрофизические устройства контроля качества углеводородных топлив Б.В. Скворцов. – Самара: Издательство СГАУ, 2000,– 172 с.