

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ЖИДКОСТИ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Н.А. Греков, А.Н. Греков, Е.И. Жемков

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

В статье сделан анализ уравнений по скорости звука и коэффициенту поглощения и их взаимосвязи с остальными параметрами жидкости. Предложено для анализа загрязнителя использовать прямые измерения акустических параметров жидкости и значения температуры и электропроводности, из которых формируются обучающие образы для распознавания типа загрязнителя.

Классификация различных загрязнителей водных сред с использованием акустических параметров жидкости является сложной задачей. Помимо загрязнителей, находящихся в воде, на параметры акустического сигнала непосредственное влияние оказывают температура, давление и соленость среды. Все эти параметры необходимо контролировать с высокой точностью, чтобы в жидкости определить тип загрязнителя и его количество.

Известно, что основными акустическими характеристиками жидкости являются скорость звука, удельное волновое сопротивление и коэффициент поглощения ультразвука.

Первое экспериментальное определение скорости звука в естественных условиях было выполнено Колладоном и Штурмом в 1826 г. Начиная с 1923 г. Вудом, Брауном, Маурером, Шумахером, используя теоретическую формулу (1), были предложены различные эмпирические формулы для определения скорости звука в воде по известным значениям температуры t и солености S

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{k_u \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{1}{k_a \cdot \rho}}, \quad (1)$$

где k_u – изотермический коэффициент сжимаемости воды;

ρ – плотность воды;

k_a – адиабатический коэффициент сжимаемости воды;

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – отношение удельных теплоемкостей для жидкости.

Позднее взамен перечисленных формул было предложено другое уравнение, в котором, кроме температуры и солености, учитывается влияние гидростатического давления или глубины.

Из анализа точности эмпирических формул можно сделать вывод, что наиболее точные результаты получаются при тех значениях температуры и солености, которые положены авторами в основу их расчета или наблюдались во время экспериментальных работ, на основании которых выведены данные формулы. Величины скорости звука, рассчитанные для одних и тех же значений t и S , отличаются друг от друга на несколько метров в секунду, а для некоторых значений t и S даже больше десятка метров в секунду.

Вопрос точности используемых эмпирических формул, связывающих скорость звука в воде с остальными параметрами жидкости является на сегодняшний день открытым.

Основная причина очевидна в том, что различные исследователи использовали свою аппаратуру и методику измерения при определении скорости звука в воде, температуры, солености и давления.

Например, три широко используемых эмпирических уравнения (Wilson W.D., 1960, [1]; V.A. Del Grosso, 1974, [2]; C-T. Chen и F.J. Millero, 1977, [3]) дают между собой расхождение 0,5 м/с, хотя измерения выполнялись в лабораторных условиях на специализированном оборудовании.

В 1993 г. J.M. Pike F.L. и Beiboer [3] сделали сравнение трех вышеупомянутых формул для расчета скорости звука. По их мнению, использование уравнения Wilson W.D. нецелесообразно.

Формулу C-T. Chen и F.J. Millero можно использовать только для континентального шельфа, в то время как формулу Del Grosso необходимо использовать для глубинных океанских вод.

Анализируя приведенный выше материал, мы подошли к тому, что все известные уравнения по взаимосвязи скорости звука с соленостью, температурой, давлением приближенно оценивают эти взаимосвязи и в основном для чистых вод.

Рассмотрим еще один акустический параметр жидкости – это коэффициент поглощения ультразвука.

Известное эмпирическое уравнение [5] для коэффициента поглощения ультразвука в жидкости характеризует относительную величину поглощения акустической энергии за счет вязкости и теплопроводности, приходящейся на единицу длины

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \gamma + k \left(\frac{1}{c_p} - \frac{1}{c_v} \right) \right], \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; c – скорость звука в жидкости; ρ – плотность жидкости; η – динамическая вязкость жидкости; γ – коэффициент объемной вязкости; k – коэффициент теплопроводности среды; c_p, c_v – теплоемкости при постоянном давлении и объеме.

В представленном уравнении первое слагаемое характеризует силу вязкого сопротивления (внутреннего трения) между соседними частицами жидкости с различными скоростями. Потери, возникающие при всестороннем сжатии, отражает коэффициент γ .

Из анализа уравнения скорости звука в жидкости, коэффициента поглощения и их взаимосвязи с остальными параметрами жидкости – температурой, давлением, соленостью и т.д., следует, что существующая кинетическая гидродинамическая теория на сегодняшний день не в состоянии объяснить почему, например, поглощение ультразвуковых волн в жидкости в большинстве случаев ни качественно, ни количественно не согласуется с этой теорией, а остальные уравнения для акустического сигнала лишь приближенно описывают эти взаимосвязи, и то для чистых жидкостей без загрязнителей.

Поэтому возникает вопрос – есть ли необходимость для классификации жидкости с загрязнителями осуществлять пересчет одних параметров в другие, определять коэффициент адиабатической сжимаемости,

вычислять отношение теплоемкостей, откуда затем определять значение теплоемкости при постоянном объеме, которое не поддается непосредственному экспериментальному измерению?

Все эти величины связаны между собой термодинамическими соотношениями с неудовлетворительной погрешностью и не годятся для классификации жидкости с загрязнителями.

Поэтому для анализа загрязнителей предлагается использовать только прямые измерения акустических параметров жидкости (скорость звука, коэффициент поглощения и удельное волновое сопротивление) и значения температуры и электропроводности, из которых можно сформировать обучающие образцы для данного класса жидкостей.

Воспользуемся теорией распознавания образов [4] и представим исследуемую жидкость шестимерным вектором образа

$$\bar{B}(c_1, \gamma_1, \beta_1, \chi_1, T_1, \varphi_1), \quad (3)$$

где c_1 – скорость звука в жидкости при температуре T_1 ; γ_1 – относительный коэффициент поглощения ультразвука жидкости при температуре T_1 ; β_1 – удельное волновое сопротивление при температуре T_1 ; χ_1 – электропроводность жидкости при температуре T_1 ; φ_1 – компонента концентрации смеси жидкостей.

Набор шестимерных векторов образов, относящихся к определенному классу жидкости с загрязнителем, составляет обучающее множество для этого класса. С учетом того, что компоненты вектора являются действительными числами, класс можно рассматривать как кластер и выделять только его свойства в пространстве образов кластера. Для примера, на рисунке 1 приведены результаты измерения c_1 и γ_1 для различных жидкостей. Центры кластеров различных жидкостей обозначены прямоугольниками.

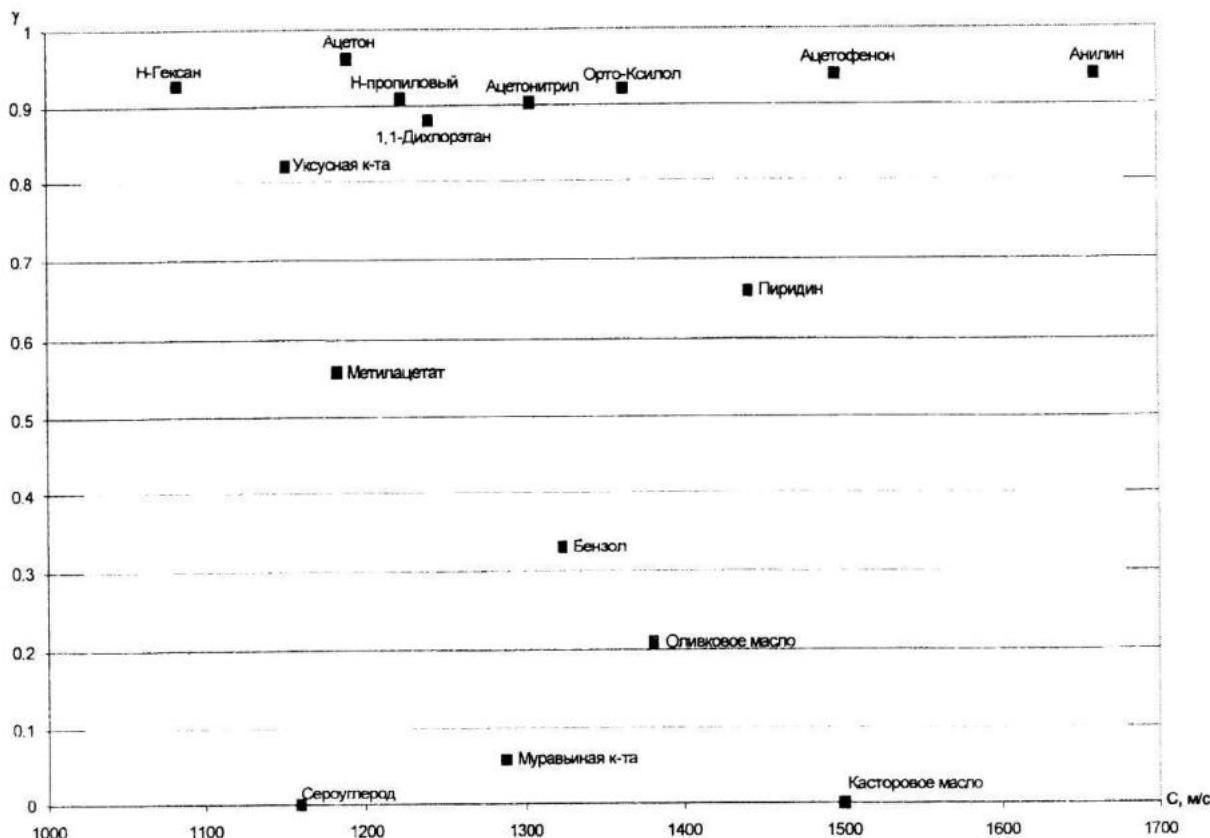


Рисунок 1 – Результаты измерения C и γ для различных жидкостей

Из рисунка 1 видно, что кластеры, соответствующие различным классам жидкости, разнесены достаточно далеко друг от друга, поэтому можно воспользоваться схемой распознавания по принципу минимального расстояния, где в качестве показателя взята сумма квадратов ошибки

$$J = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{x \in S_j} \|B - m_j\|^2, \quad (4)$$

где N_c – число кластеров; S_j – множество образов, относящихся к j -му кластеру, а $m_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x \in S_j} B$ – вектор выборочных средних значений для множества S_j ;

N_j – характеризует количество образов, входящих во множество S_j . Показатель качества, согласно формуле (4), определяет общую сумму квадратов отклонений характеристик всех образов, входящих в некоторый кластер, от соответствующих средних значений по кластеру.

Для проверки работы алгоритма в лоток, где измерялись параметры вектора B , наливалась указанная кислота и выполнялась процедура распознавания образа. Структурно-функциональная схема измерительного лотка представлена на рисунке 2.

После обработки результатов измерения параметров вектора B , показатель качества J оказался минимальным для кластера уксусной кислоты.

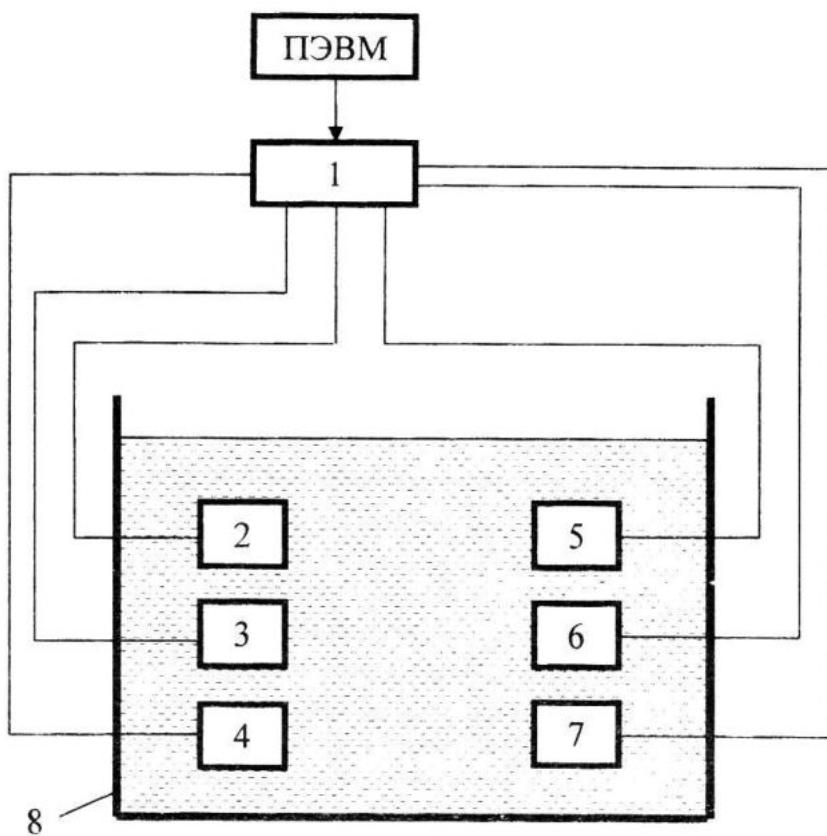


Рисунок 2 – Структурно-функциональная схема измерительного лотка

1 – микроконтроллер; 2 – канал измерения затухания акустических колебаний; 3 – канал измерения волнового сопротивления; 4 – канал измерения скорости звука; 5 – датчик давления; 6 – датчик температуры; 7 – канал измерения электрической проводимости; 8 – пластиковый сосуд с исследуемой жидкостью

Использование предлагаемого метода определения загрязнителей в жидкости позволяет полностью автоматизировать процедуру распознавания вида загрязнителей по акустическим параметрам жидкости с учетом электропроводности и температуры.

Кроме того, все датчики, установленные в лотке, разрабатывались на давление до 5 МПа, что позволяет использовать их в аппаратуре для исследования типа загрязнителей в речках, морях и океанах.

Работа выполнена при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект Ф25.6/078).

Л и т е р а т у р а

1. Wilson W. D, 1960, Equation for the Speed of Sound in Seawater. J Acoust Soc Am, 32(10). – P. 1367.
2. V.A. Del Gross, 1974, New Equation for the Speed of Sound in Natural Waters (with Comparisons to Other Equations). J Acoust Soc Am, 56(4). – PP. 1084 – 1091.
3. C-T. Chen and F.J. Millero, 1977, Speed of Sound in Seawater at High Pressures. J Acoust Soc Am, 32(10). – P. 1357.
4. Дж. Ту, Р. Гонсалес. Принципы распознавания образов. Издательство «Мир». – М. 1978. – 104 с.
5. В.А. Красильников, В.В. Крылов. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1985.