

УДК 574.504.064.504.53.574

**ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИКИ СИЛЬНО ДИССИПАТИВНЫХ СРЕД  
К РЕШЕНИЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И  
ПРОГНОЗ**

Канд. геогр. наук

М.Ж. Бурлибаев

Канд. геогр. наук

А.А. Волчек

Канд. техн. наук

Д.А. Костюк

Канд. техн. наук

Ю.А. Кузавко

*Обсуждается применение методов акустики сильно диссипативных сред (СДС) к решению диагностических задач пищевой и перерабатывающей промышленности, сельского хозяйства и экологии. Рассмотрена теория эффекта аномального отражения акустической волны от СДС. Рассмотрены задачи по измерению влажности и липкости почв, грунтов и сыпучих материалов; по определению степени загрязнения сточных вод; по выявлению степени готовности пищевых продуктов и напитков и др. Предложена идея создания универсального автономного переносного прибора для измерений вышеуказанных параметров с перепрограммируемым процессором, в который вносятся необходимые калибровочные кривые.*

В различных технологических процессах приготовления веществ и продуктов имеет место изменение агрегатного состояния исходных материалов, в частности отверждение последних. При этом степень отверждения вещества однозначно говорит о качестве его приготовления. Здесь предлагается высоко чувствительный метод ультразвуковой диагностики процессов приготовления веществ, а также физико-химических параметров различных сред, задействованных в сельскохозяйственных и экологических технологиях, заключающихся в измерении спектральных характеристик акустического импульсного сигнала, отраженного от границы твердотельного звукопровода с исследуемым объектом. Примерами реальных процессов при такой диагностике могут быть сцепление асфальтного покрытия с дорожным грунтом, бетона с железной арматурой, брожение пищевых про-

дуктов в различных емкостях, определение влажности почв, грунтовых и сыпучих материалов, степени загрязнения сточных вод и т.д. При этом рассматриваемые вещества являются сильно диссипативными средами (СДС), т.е. поглощение ультразвуковых колебаний в них достаточно велико.

Отражение непрерывных и импульсных акустических сигналов от границы раздела сред изучено теоретически и экспериментально весьма подробно [1, 2]. Тем не менее, случай отражения акустической волны от среды, обладающей сильным поглощением звуковых колебаний, нам неизвестен и может оказаться интересным как в научном, так и в практическом плане. В данной работе нами анализируются недавние результаты исследований по нормальному отражению акустической продольной волны (ПВ) от плоской границы раздела твердого тела с СДС, в качестве которой может служить вязкая жидкость [3, 4, 7]. Также обсуждаются результаты по распространению и отражению ПВ в структурах: полупространство – покрытие СДС, полупространство – слой СДС – полупространство [5]. ПВ оказываются более приемлемыми и информативными по сравнению с поперечными волнами [6] для вышеоговоренных задач.

Прежде чем перейти к результатам экспериментальных исследований рассмотрим вкратце используемую теоретическую модель. Пусть из твердого тела 1 в исследуемый объект 2 нормально к плоской границе раздела сред  $x = 0$  распространяется непрерывная гармоническая ПВ, которая частично отражается, а прошедшая ПВ в СДС достаточно быстро затухает (см. рис. 1).

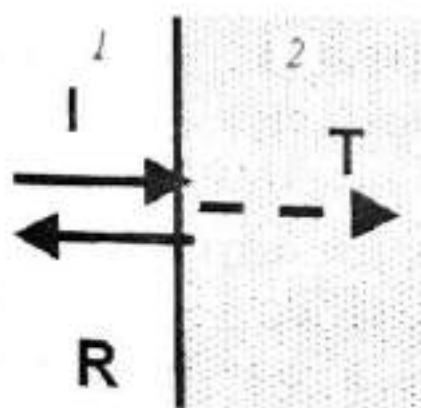


Рис. 1. Отражение акустического сигнала от границы раздела сред. 1 – твердое тело; 2 – исследуемый объект.

Волновое уравнение для ПВ в СДС имеет вид (1)

$$\rho u_x = cu_{x,xx} + bu_{x,xxx} \quad (1)$$

где  $u_x$  — компонента продольного смещения в ПВ;  $c$  — модуль упругости;  $\rho$  — плотность;  $b$  — параметр диссипативных потерь, определяемый коэффициентами сдвиговой  $\eta$  и объемной  $\xi$  вязкости и коэффициентом теплопроводности  $\chi$  согласно соотношению

$$b = \frac{1}{3}\eta + \xi + \chi(c_v^{-1} + c_p^{-1}), \quad (2)$$

в котором  $c_p$  и  $c_v$  — соответственно теплоемкости СДС при постоянном давлении и объеме. Отметим, что при  $b = 0$  уравнение (1) определяет акустические колебания в твердом теле с соответствующими материальными константами.

Воспользовавшись (1) и граничными условиями, представляющими собой непрерывность упругих смещений и напряжений (если СДС — жидкость, то вместо напряжения надо иметь в виду давление) на границе сред, после стандартных преобразований для коэффициента отражения получается следующая зависимость

$$R_\omega = \frac{u_{01}^R}{u_{01}^I} = \frac{1 - \tilde{\epsilon}}{1 + \tilde{\epsilon}}, \quad (3)$$

где  $u_{01}^R$ ,  $u_{01}^I$  — соответственно амплитуды отраженной и падающей волн,  $\tilde{\epsilon} = \epsilon(1 - ix)^{1/2}$ ,  $\epsilon = Z_2/Z_1$ ,  $x = \omega/\omega_c$ ,  $Z_1 = \rho s_{11}$  и  $Z_2 = \rho s_{12}$  — соответственно акустические импедансы первой и второй сред (в отсутствие диссипации),  $\omega_c = \rho_2 s_{12}^2 / b$  — некоторая эффективная частота, характеризующая СДС,  $s_{12}$  — скорость звука (при  $\omega \rightarrow 0$ ).

Фаза отраженного сигнала может быть определена:

$$\operatorname{tg} \Psi_\omega^R = - \frac{2\epsilon(1+x^2)^{1/2} \sin \frac{\Psi}{2}}{1 - \epsilon^2(1+x^2)^{1/2} \cos \Psi}, \quad (4)$$

где  $\Psi = -\operatorname{arctg} x$ . Таким образом, согласно (3) и (4) при отражении акустической волны от диссипативной среды меняется ее амплитуда и фаза. Если отражение происходит от менее плотной акустической среды ( $Z_2 < Z_1$ ), то при  $\omega \ll \omega_c$  происходит инверсия сигнала ( $\Psi^R = \pi$ ). В окрестности  $\omega \sim \omega_c$  наблюдается минимум коэффициента отражения волны при дальнейшем возрастании фазы отраженного сигнала относительно фазы падающего на границу сигнала. Далее при  $\omega \gg \omega_c$   $R_\omega \rightarrow 1$  и  $\Psi^R \rightarrow 2\pi$ , т.е. возникает полное отражение сигнала. В противоположном

случае при отражении от более плотной среды инверсии сигнала не происходит ( $\omega \ll \omega_c$ ,  $R_\omega \rightarrow R_0$  и  $\Psi^R \rightarrow 0$ ). Аналогично при  $\omega \sim \omega_c$  наблюдается минимум коэффициента отражения  $R_\omega$  при максимуме фазы  $\Psi^R$ . Далее при  $\omega \gg \omega_c$ ,  $R_\omega \rightarrow 1$  и  $\Psi^R \rightarrow 0$ . Для твердой эпоксидной смолы (ЭС) с акустическими параметрами:  $Z_2 = 3,25 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $\rho_2 = 1,21 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $s_{1211} = 2,68 \cdot 10^3$  м/с и затухание ультразвука в ней  $\alpha = 2,93 \cdot 10^3$  м<sup>-1</sup> ( $5,86 \cdot 10^3$  дБ/м при частоте  $f = 5$  МГц) получаем  $b = 138,4$  кг/(м·с) и  $\omega_c = 2\pi \cdot 10$  МГц.

От рассмотрения непрерывного сигнала перейдем к исследованию отражения от границы и прохождения ее импульсным акустическим сигналом, наиболее близким к реальному сигналу, излучаемого ультразвуковым пьезокерамическим преобразователем (УЗП) и который на границе раздела этих сред  $x = 0$  может быть представлен в виде:

$$u_j^i(x=0, t) = u_{0j}^i \exp(-\Gamma \frac{t}{T}) \exp(i2\pi \frac{t}{T}) [\theta(t - \frac{\tau}{2}) - \theta(t + \frac{\tau}{2})], \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – безразмерный параметр, определяющий огибающую акустического сигнала, и связанный с добротностью  $Q$  ультразвукового пьезокерамического преобразователя (УЗП) соотношением  $\Gamma = \pi/Q$ ,  $T = 2\pi/\omega_0$ ,  $\omega_0$  – частота основной гармоники сигнала,  $\tau = nT$  – длительность импульса,  $n$  – некоторое целое число, равное количеству периодов излучаемого импульса.

Для того, чтобы определить форму отраженного (прошедшего) сигнала необходимо рассмотреть отражение (прохождение) каждой частотной составляющей импульсного сигнала, а затем, применив обратное преобразование Фурье, определить во временном представлении форму отраженного (прошедшего) сигнала. Тогда получим:

$$u^R(x, t) = F^{-1} \{ F [ R_\omega u^i(x, t) ] \}, \quad (6)$$

где  $F^{-1}$  и  $F$  – соответственно прямое и обратное преобразование Фурье.

Исходя из приведенной зависимости  $R_\omega$  (3) для реального акустического сигнала (5) с  $n = 8$  и  $\omega_0 = 2\pi \cdot 5$  МГц с помощью компьютера рассчитывалась форма отраженного сигнала от границы раздела оргстекло - ЭС, алюминий - ЭС, а также их спектр.

На рис. 2 в зависимости от частоты  $\omega_0$  основной гармоники импульсного сигнала представлены результаты компьютерного моделирования. Видна существенная зависимость амплитуды и фазы отраженного сигнала от частоты  $\omega_0$ . Фазу импульсного сигнала понимаем несколько более обобщенно,

чем это имеет место для непрерывных волн, а именно как значение смещения пересечения с временной осью излученного и отраженного импульсов. Заметим, что используемые программные средства позволяют выяснить особенности отражения, а также прохождения для любой формы излучаемых импульсов. Аналитические расчеты частично возможны для простейших форм излучаемых сигналов, например для прямоугольного или нескольких периодов синусоидального (практически УЗП нереализуемы), но неправильный частотно-зависимый вид  $R_{\omega}$  и  $T_{\omega}$  затрудняет или делает невозможным нахождение спектра и формы отраженных и прошедших сигналов.

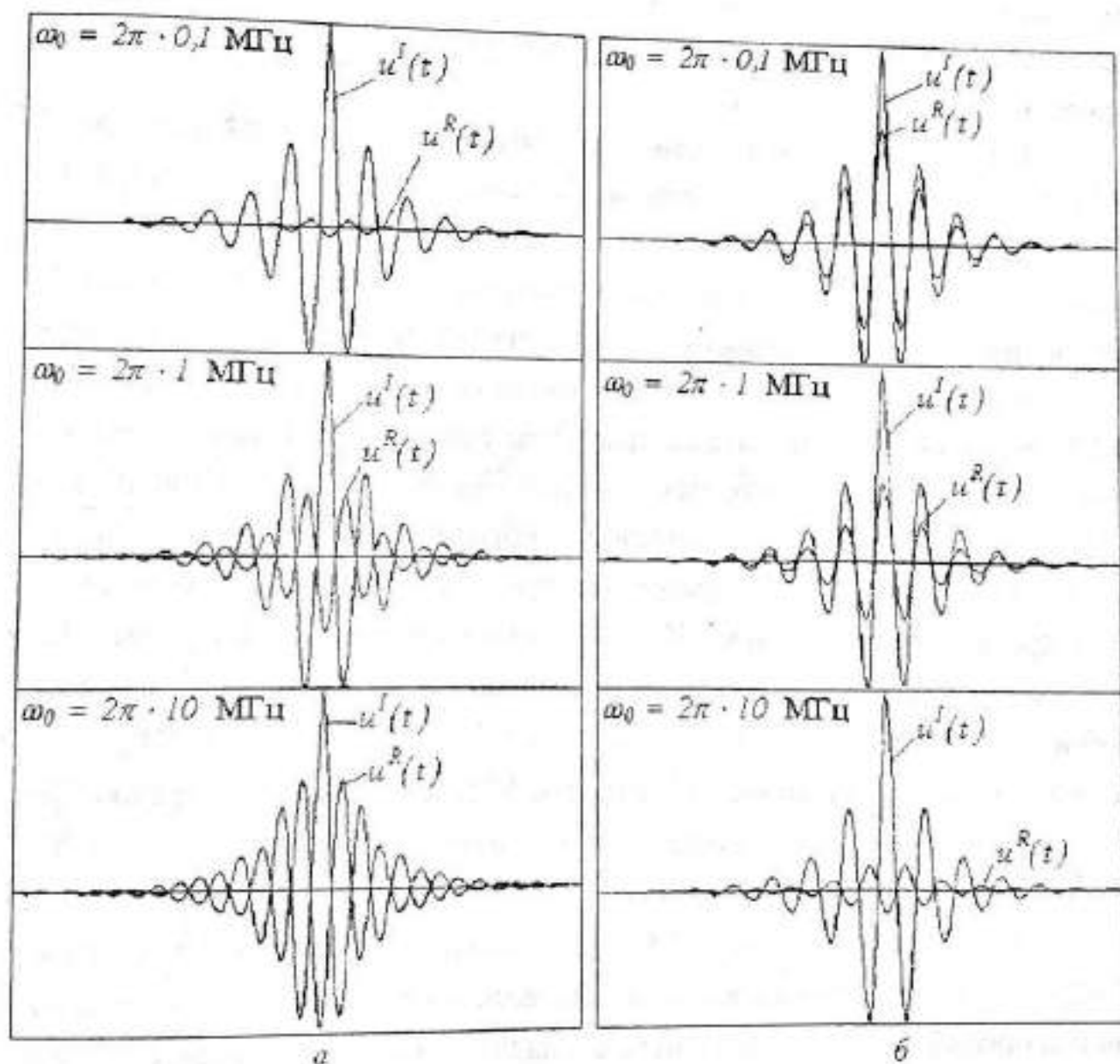


Рис. 2. Отраженный сигнал при различных значениях частоты  $\omega_0$ . Для структуры оргстекло – ЭС (а); для структуры алюминий – ЭС (б).

Для подтверждения теоретически предсказанного здесь явления – аномальной зависимости коэффициента отражения акустического сигнала

и его фазы от величины диссипации ультразвуковой энергии в окружающей среде проводился следующий эксперимент. УЗП с частотой механического резонанса 3,5 МГц (5 МГц или 7,5 МГц) возбуждался импульсным генератором. УЗП излучая близкий к теоретически рассмотренной форме продольный акустический импульс в структуру оргстекло - ЭС. Также исследовались структуры: алюминий - ЭС, оргстекло - парафин, оргстекло - почва с различным водозаполнением, но подробно остановимся на первом, показавшем рекордные изменения коэффициента отражения, и последнем, интересном в практическом аспекте измерения влажности почв, образцах. Изученные и отраженные сигналы с выхода УЗП регистрировались осциллографом с цифровой индикацией амплитудных и временных интервалов сигнала.

Для достижения излучаемых импульсов сверхкороткой длительности УЗП изготавливался следующим образом. Пьезоэлемент представлял собой диск с плоской тыльной поверхностью и сферически вогнутой излучающей поверхностью. В качестве материала пьезоэлемента использовалась низкодобротная пьезокерамика РКР-1 с добротностью  $Q \approx 70$  неравномерность пьезоэлемента по толщине обеспечивала дополнительное снижение его добротности, так как каждое мысленно выделенное кольцо толщины имело определенную частоту механического резонанса (полуволновой резонатор). Для дальнейшего снижения добротности преобразователя на тыльную поверхность пьезоэлемента наносился слой демпфирующего материала, представляющим собой ЭС с наполнителем-окисью вольфрама. Далее к электродам УЗП параллельно подключалась индуктивность для достижения электрического резонанса с емкостью преобразователя. Результатом этого являлось снижение добротности УЗП до  $Q \approx 3$ , а измерения амплитудно-частотной характеристики изготовленных УЗП по уровню 3 дБ показали полосу частот 70% от его резонансной частоты.

В процессе отвердевания ЭС, приготовленной согласно ГОСТ на 10г ЭС 1,2 г отвердителя наблюдалось уменьшение коэффициента отражения от границы оргстекло - ЭС импульсного сигнала в 2,5 раза при изменении длительности отраженного акустического сигнала с  $\tau = 3$  мкс до  $\tau = 2$  мкс при частоте УЗП 3,5 МГц. Поразительный результат получился при отвердевании ЭС, приготовленной согласно объемному соотношению 2:1, когда коэффициент отражения уменьшился в 14 раз при изменении длительности сигнала с  $\tau = 3$  мкс до  $\tau = 1,5$  мкс. Отметим, что показания коэффициента отра-

жения ультразвука от ЭС менялись в течение трех и более суток, в то время, как ЭС застывала в течении нескольких часов. На наш взгляд это говорит о продолжающихся в ЭС физико-химических превращениях еще на более низком микроуровне. В эксперименте измерялся коэффициент отражения как временная функция при отверждении (см. рис.3), в то время как частота  $\omega_0$  основной гармоники излученного сигнала оставалось неизменной.

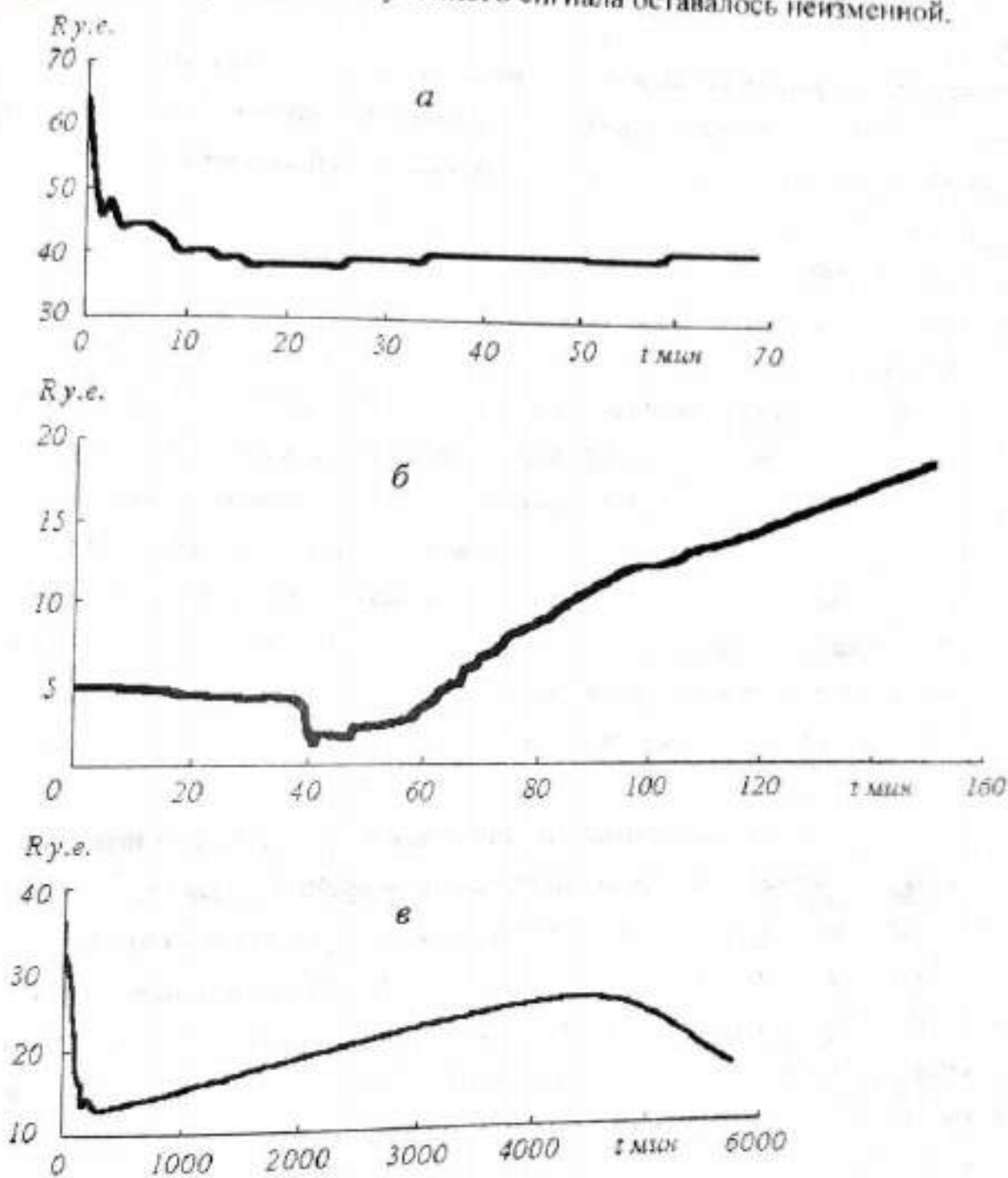


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента отражения оргстекло - парафин (а); для структуры оргстекло - ЭС (ЭС приготовлена в объемной пропорции 2:1) (б); для структуры оргстекло - ЭС (ЭС приготовлена в весовой пропорции 10:1,2) (в).

Очевидно, что вязкость СДС, как и затухание ультразвука в ней, достигали своего максимума в точке структурного фазового перехода ЭС.

Акустические импедансы жидкой и твердой фаз ЭС не могут различаться настолько, чтобы по классическим формулам Френеля объяснить вышеуказанные аномальные изменения коэффициента отражения. Теоретические зависимости строились как функции аргумента  $x = \omega/\omega_c$ , а в эксперименте этот параметр возрастал до точки фазового перехода, а затем убывал. Зная теоретическую зависимость  $R(\omega/\omega_c)$  и значение эффективной частоты  $\omega_c$ , можно определить затухание ультразвука и в какой-то степени вязкость СДС методом обратной задачи в зависимости от времени отвердевания смеси.

Следует сделать вывод, что состояние отражающей диссипативной среды существенно влияет на коэффициент отражения и фазу как непрерывных, так и импульсных акустических сигналов. Так как фазовые измерения являются значительно более точными по сравнению с амплитудными, то по ним можно с еще большей достоверностью судить о поглощении звука в диссипативной среде и проводить непосредственные измерения вязкости веществ. По таким измерениям с учетом предварительно полученных калибровочных зависимостей можно судить о готовности к употреблению того или иного технологического продукта. Таким образом можно контролировать качество сцепления асфальта с грунтовым покрытием, бетона с железной арматурой, соответствие нормамготавливаемых композитных клеящих и иных материалов, а также степень готовности пищевых продуктов и напитков.

Более подробно остановимся на использовании предложенных методов для акустических спектроскопических измерений влажности почв, грунтов и сыпучих материалов. Измерение влажности почвы и грунта, сыпучих материалов и промышленных полуфабрикатов необходимо производить всегда. Применяемый на протяжении десятилетия термовесовой метод, несмотря на его высокую точность и соответствие стандартам, является трудоемким, длительным, требует специального оборудования и проводится в лабораторных условиях. За последнее время предложено достаточно много экспресс-методов измерения влажности веществ (емкостные, резистивные, СВЧ и др.) непосредственно в производственных условиях, которые удовлетворительно решают требуемую задачу для второй группы вышеуказанных веществ, т.е. для веществ достаточно простого химического состава. Последнее условие никогда не выполняется для



грунта и особенно для почвы с их разнообразием, состоящих из разных количеств песка, глины, минеральных и органических веществ. Влага в почве состоит из связанной, капиллярной и свободной. Именно две последние составляющие определяют плодородие почвы. Весьма затруднительно найти физический метод измерения влажности почвы и грунта с удовлетворительной для практики точностью и нечувствительностью к переменному в широких пределах их исходному химическому составу.

Здесь нами предпринимается попытка подойти к решению указанной проблемы методами акустики сильно диссипативных сред. Если в твердом теле затухание ультразвуковой волны весьма мало и им можно пренебречь, то во многих веществах (ЭС, резина, почва, песок, сильно загрязненные сточные воды и т.д.), называемых нами СДС, затухание существенно и акустические волны даже через сравнительно тонкий слой дальше не проникают. По всей видимости, вследствие этой причины на протяжении многих лет такие объекты не привлекали интерес экспериментаторов и теоретиков. Все внимание уделялось поиску кристаллов с рекордно малым поглощением. Но никто не задавался вопросом, что такое состояние СДС может повлиять на отражение акустического сигнала от границы твердотельного звукопровода с СДС. Для количественного осмысления отражения волны необходимо в тензоре механических напряжений помимо упругой компоненты учитывать и диссипативную компоненту, обусловленную вязкостью (внутренним трением) и теплопроводностью СДС, т.е. теми факторами, которые обеспечивают поглощение акустических колебаний.

Отметим, что для определенной почвы с конкретным влагосодержанием частота  $\omega_c$  является уже функцией влажности и в меньшей степени плотности почвы и скорости звука в ней. В идеале хотелось бы, чтобы последние два параметра не оказывали влияния на частоту  $\omega_c$ . Тогда было бы возможно построение универсального средства измерения влажности почвы и грунта. Резюмируя проведенные теоретические исследования следует сказать, что влажность почвы влияет на ее вязкость и степень ее прилипания к звукопроводу. Влажность почвы является важнейшим показателем ее плодородия, а липкость определяет технические условия ее обработки. Экспресс-измерения влажности почвы в полевых условиях позволяют оптимальным образом определить время ее обработки и режим полива. Именно влага обеспечивает клейкие свойства почвы. Сухая почва

к звукопроводу прилипать не будет и механический контакт будет практически отсутствовать, а следовательно коэффициент отражения сигнала будет максимальным, т.е. 100%.

Раньше мы касались измерений влажности почвы по абсолютному значению коэффициента отражения, но как показывают проведенные исследования у нас всегда имеется полная информация о форме излученного и принятого сигнала. Тем самым, вводя понятия сдвига фаз между принятым и излученным сигналами, можно и поэтому параметру производить измерения влажности почвы. Отметим, что, как следует из информационной теории измерений, фазовые измерения более чем на два порядка точнее амплитудных измерений. Помимо этого спектр отраженного сигнала существенно отличается от спектра излученного сигнала. Например, изменяется его длительность. Все это происходит вследствие того, что граничные условия являются дисперсионными, т.е. частотно зависимыми. Анализируя спектральные составляющие сигналов, возникает еще одна дополнительная возможность косвенных измерений влажности и липкости почвы.

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Образцы представляли собой садовую почву и обычный речной песок. В них равномерно вносился определенный процент воды. Измерительная установка была идентична рассмотренной. УЗП на 3,5 МГц возбуждался от генератора прямоугольным импульсом длительности  $\tau = 0,15$  мкс. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента отражения импульсного сигнала от влагосодержания. Видна достаточно высокая чувствительность предлагаемого метода к определению влажности почвы и весьма низкая чувствительность к определению влажности песка, что мы связываем с однородностью его химсостава, а резко выраженный скачок объясняем полным заполнением его пор. Учитывая, что современные АЦП способны производить квантование амплитуды сигнала  $2^{12}$ , теоретически может быть достигнута точность определения влагосодержания не менее  $10^{-2}$  %. Необходимо провести более полные фазовые и спектральные измерения излученного и принятого сигналов, потому что может оказаться, что какой-то из вышеупомянутых параметров окажется более чувствительным к изменению влагосодержания.

Ультразвуковые неразрушающие методы и средства диагностики материалов, изделий, окружающей среды и веществ нашли и находят обширное применение в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве и

экологии. Предложенный метод и его экспериментальная реализация на имеющийся в нашем распоряжении малочувствительной ультразвуковой установке позволяет фиксировать влажность садовой почвы по амплитуде отраженного сигнала с приемлемой для полевых исследований точностью.

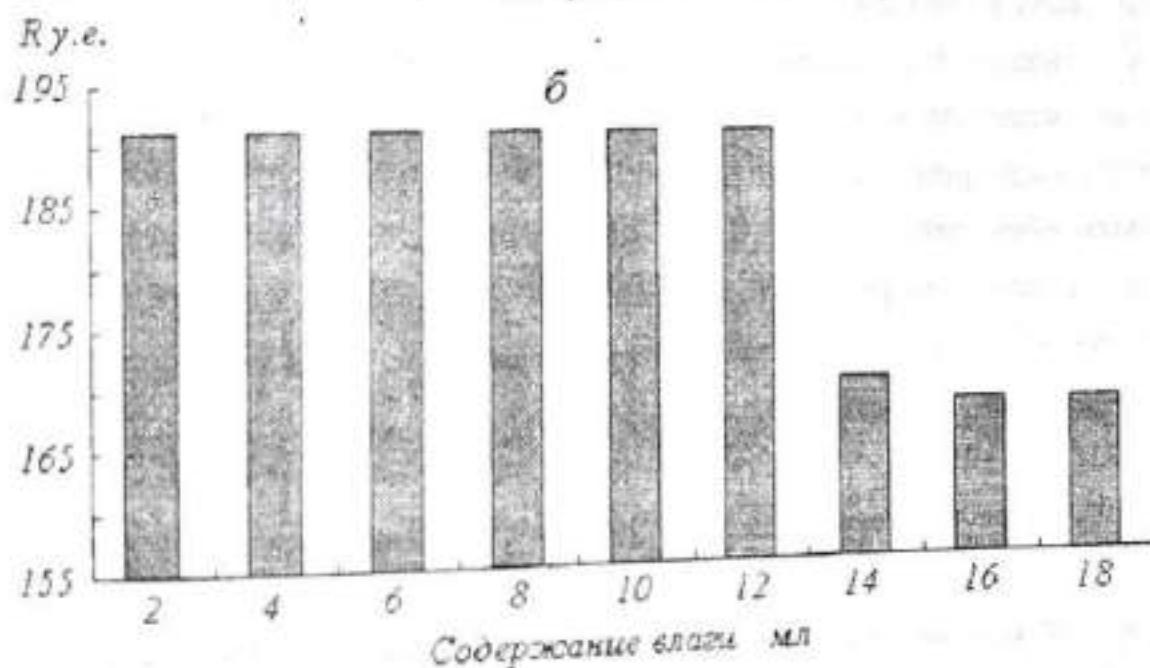
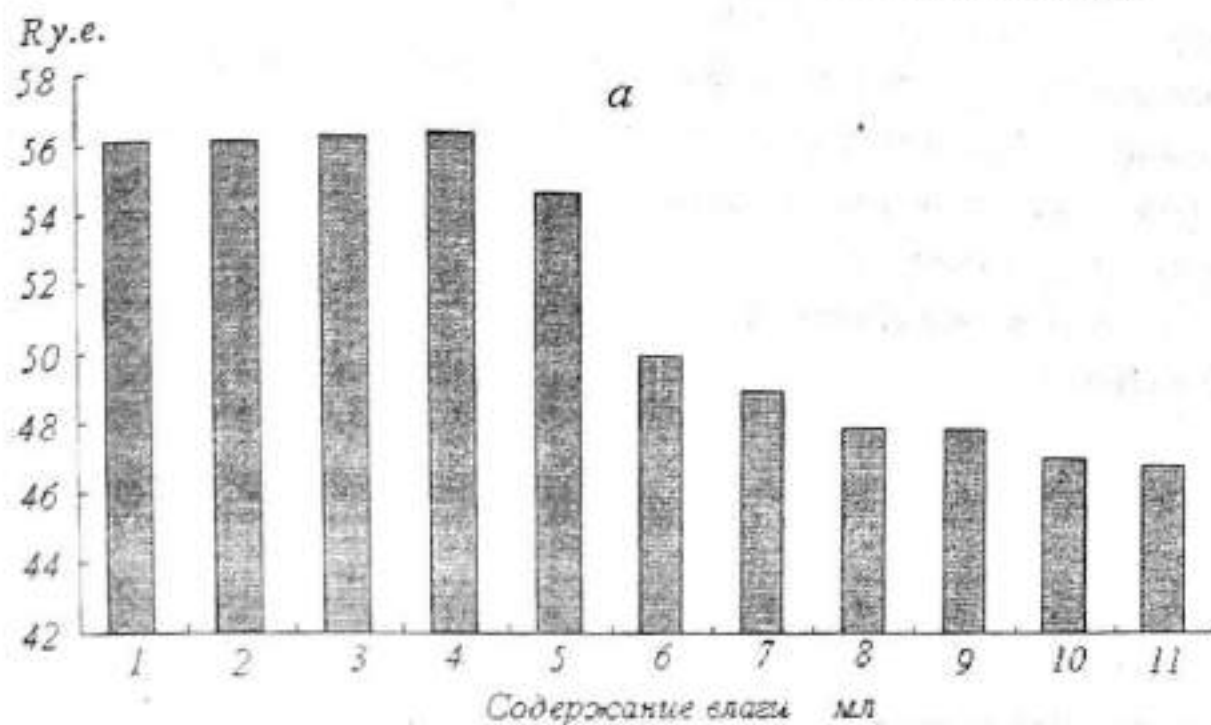


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от влагосодержания. а - садовый грунт; б - речной песок (объем 48 см<sup>3</sup>).

Разумно в дальнейшем разработать прибор, реализующий данный метод, многофункционального назначения, позволяющий по заложенным в его центральный процессор градуировочным кривым измерять влажность, концентрацию веществ, вязкость и т.д. согласно вышеуказанным аспектам акустики СДС. Прибор будет состоять из следующих блоков: ультразвуковой пьезокерамический преобразователь, блок питания от сети

и продублировано автономное питание от батареек, блок усиления и предварительной обработки сигналов, процессор с требуемой градуировочной кривой и встроенной памятью, ЖКИ, порт ввода/вывода на персональный компьютер. Датчик прибора без конструктивных изменений может быть заменен на оптоэлектронный или химический, которые по сравнению с пьезокерамическим могут оказаться предпочтительней или вообще незаменимы при измерениях жидкости, кислотности, белка и других компонент молочных продуктов, выбросов вредных веществ в окружающую среду и сточные воды и т.д.

Сильно загрязненные различными отходами сточные воды (СВ) представляют серьезную экологическую угрозу для окружающей среды. Оценка состава СВ необходима для их обезвреживания и утилизации. Принятые в настоящее время химические, рентгеновские и оптико-спектроскопические методы анализа проб воды, выполняемые в лабораторных условиях, требуют значительных аппаратных, энергетических и временных затрат. По своим физико-химическим свойствам СВ в сравнении с природной водой содержат не только значительное количество растворенных в них органических и неорганических веществ, но и их нерастворимые коллоидные взвеси. Данное обстоятельство позволяет рассматривать СВ с точки зрения прозвучивания ультразвуком, как СДС.

Таким образом, имеется возможность достаточно простым в реализации средством ультразвуковой фазо-частотной спектроскопии измерять процентное содержание переносимых водой в канализационной трубе или сточной канаве коллоидных взвесей, а также растворенных в ней примесей. Методами обратной задачи путем численного компьютерного эксперимента по величине излучаемого и принимаемого сигналов можно оценить процентный состав отдельных ядовитых и зловонных компонент. Для большей детализации помимо УЗП в предложенном приборе для этих целей могут быть применены оптоэлектронный и химический датчики. При этом используются полученные в лабораторных условиях корреляционные зависимости спектральных характеристик сигнала от процентного и химического состава включений в воде. Предлагаемый способ, несмотря на его функциональные ограничения, является быстрым, выполнимым в натуральных условиях, так как используемое программное обеспечение может быть перенесено в процессор автономного переносного прибора.

Подводя итог, следует здесь сказать, что созданы основы применения методов акустики СДС к оперативному решению многочисленных задач промышленности, сельского хозяйства и экологии. Результатом является переход от дорогостоящих химических, рентгеновских и оптико-спектроскопических аналитических средств, выполняемых в лабораторных условиях и требующих значительных аппаратных, энергетических и временных затрат, к относительно дешевым и выполняемым в полевых условиях акустическим спектроскопическим средствам. Конечно, такие средства не решают все имевшие место или возникающие проблемы, но заметного ускорения в оперативности решения большинства проблем стоит ожидать.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн / М.: Наука. 1990. 432 с.
2. Дьелесан Э., Руайе Э. Упругие волны в твердых телах / М.: Наука. 1982. 424 с.
3. Костюк Д. А., Кузавко Ю. А. Акустические импульсные исследования при моделировании пар трения. / Современные направления развития производственных технологий и робототехника. Международная научно-техническая конференция, Могилев, 22 - 23 апреля 1999. с. 186
4. Костюк Д. А., Кузавко Ю. А. Особенности отражения акустических продольных волн от границы с диссипативной средой // "Вестник Брэсцкага універсітэта", №4, 2000. - С. 56 - 69.
5. Костюк Д. А. Моделирование распространения продольного звука в слоистой структуре, содержащей слой диссипативной среды. / Труды региональной конференции молодых ученых и студентов "Современные проблемы математики и вычислительной техники". Брест, 1999. - С. 69 - 72.
6. Костюк Д. А., Кузавко Ю. А. Особенности граничного отражения поперечных волн от диссипативной среды. // "Вестник БГТУ. – Машиностроение, автоматизация, ЭВМ", №4, 2000. - С. 48 - 51.
7. Kostiuik D. A., Kuzavko Yu. A. Anomalies of reflection of acoustic pulses from boundary with strong dissipative medium. / Proceedings of international conference on neural networks and artificial intelligence. Brest. 12 – 15 October, 1999. – P/ 183 – 188.

Отдел проблем Полесья АН Беларуси, Брест  
Брестский государственный технический университет, Брест  
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

## ҚАТТЫ ДИССИПАТИВТІК ОРТАЛАР АКУСТИКАСЫН ӨНДІРІСТІК, АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МІНДЕТТЕРДІ ОРЫНДАУ ҮШІН ҚОЛДАНУ: ЖАҒДАЙЫ, КЕЛЕШЕГІ ЖӘНЕ БОЛЖАМ

Геогр. ғылымд. канд.  
Геогр. ғылымд. канд.  
Техника ғылымд. канд.  
Техника ғылымд. канд.

М.Ж. Бүрлібаев  
А.А. Волчек  
Д.А. Костюк  
Ю.А. Кузавко

*Қатты диссипативтік орталар акустикасы әдістерін (ҚДО) тамақ және қайта өңдеу өндірістерінің, ауыл шаруашылығы және экологияның диагностикалық міндеттерін шешу үшін қолдану мәселесі қарастырылған. ҚДО-дан акустикалық толқынның аномальды қайтарылуы тиімділігі теориясы қарастырылған. Топырақ, грунттар мен ұнтақ материалдардың ылғалдылығын өлшеу; ағынды сулардың ластану дәрежесін анықтау; азық-түлік сусын және т.б. тағамдардың даярлығын анықтау міндеттері қарастырылған. Жоғарыда көрсетілген өлшемдердің өлшеуге арналған калибрлік қисықтар енгізілетін қайта программаланатын процессоры бар универсалды автономиялы тасымал аспапты жасау ұсынылған.*