

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*VINOGRADOVA Elizaveta Andreevna* – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vinogradli27@yandex.ru

*MOLCHANOV Vladimir Petrovich* – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: science@science.tver.ru

*SHILOVA Olga Gennadiyevna* – Senior Lecturer of Department of Foreign Languages, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shilovaolga71@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Vinogradova E.A., Molchanov V.P., Shilova O.G. Investigation of the properties and determination of the tetramethylenediethylenetetramine reactivity // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 83–88.

УДК 550.837:621.396.96

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОГЛОЩЕНИЯ В САПРОПЕЛЕ  
И ОТРАЖЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ВОДА – САПРОПЕЛЬ  
С ПОМОЩЬЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ**

*Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян*  
*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Иванов Г.Н., Кривенко И.В.,  
Смирнова М.А., Испирян С.Р., 2024

**Аннотация.** Отмечено, что качественные характеристики сапропелей (влажность, плотность, зольность), а также загазованность влияют на их акустические свойства, что необходимо учитывать при изучении сапропелевых отложений с помощью метода звуколокации. Приведены результаты исследований сапропеля, реализованных на гидроакустической трубе. Указано, что выбор звуковых частот образцов сапропеля связан с параметрами трубы. Для исследований использовались образцы сапропелей из озер Тверской, Владимирской и Рязанской областей, отличающихся условиями формирования донных отложений и основными характеристиками. Продемонстрировано, что увеличение влажности сапропелей ведет к уменьшению коэффициента отражения звуковой волны. На основе измерений коэффициентов отражения на границе сапропеля с водой и коэффициентов поглощения сапропелей, различающихся по влажности и плотности, сделаны выводы об их составе, физико-механических свойствах и воздействии на качество звуколокационной съемки.

**Ключевые слова:** сапропель, звуколокация, гидроакустическая труба, коэффициент поглощения, коэффициент отражения, частота, дисперсия скорости звука, зондирующий импульс.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-88-101**

### ***ВВЕДЕНИЕ***

Сапропели – илистые донные отложения пресноводных водоемов – образуются в результате воздействия многих факторов (механических, биохимических и микробиологических процессов).

Образование сапропеля обуславливается характером водоема. Обычно мощность сапропелевых отложений в озерах составляет порядка 3–10 м. Общий запас разведанных сапропелевых месторождений в Российской Федерации – около 230 млрд м<sup>3</sup>. Отметим, что с каждым годом объем запасов сапропеля возрастает.

Область применения сапропеля очень широка. Например, они используются в следующих целях:

для производства органоминеральных удобрений, содержащих основные элементы питания растений (гумус, азот и микроэлементы); эти удобрения увеличивают содержание в почве подвижных форм фосфора и калия;

минимизации отрицательного влияния на почвы, пригодные для земледелия, отходов промышленных производств (гуминовые кислоты, входящие в состав сапропелей, образуют прочные соединения с ионами металлов и являются геохимическим барьером для опасных веществ);

создания добавок-антиокислителей (биологически ценных компонентов) при производстве гранулированных комбикормов;

разработки препаратов, положительно влияющих на нервную, эндокринную, сердечно-сосудистую систему человека, его опорно-двигательный аппарат и стимулирующих процессы метаболизма в печени;

производства продуктов их переработки, таких как деготь, фенолы, аммиак, ацетон и газообразные продукты (H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и др.), углеродные материалы и сорбенты широкого спектра (вышеназванные материалы и сорбенты применяются для сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности воды и любой твердой поверхности, очистки сточных вод).

Свойства сапропелей разнообразны и обусловлены генезисом, поэтому сфера и способ их использования зависят от состава, физико-химических, физико-механических и других параметров [1].

Качественные характеристики сапропелей (влажность, плотность, зольность) обуславливают акустические свойства. При уменьшении влажности и увеличении плотности по мере возрастания глубины слоя сапропеля наблюдается незначительное увеличение скорости, а коэффициент поглощения при этом повышается в 1,5–2 раза. С увеличением зольности возрастает скорость звука и снижается коэффициент поглощения [2]. Однако существенное влияние на акустические свойства оказывает загазованность образцов, что ведет к увеличению сжимаемости или уменьшению модуля объемной упругости сапропеля. Изменение содержания газовой фазы на 1–2 % меняет акустические свойства сапропеля значительно больше, чем изменение влажности и зольности на 10 % и более. Это продемонстрировано при исследовании вакуумированных образцов сапропеля.

Для пресной воды скорость звука равна 1480–1490 м/с; коэффициент поглощения при частоте  $f = 100$  кГц равен  $10^{-3} \text{ м}^{-1}$ . Для водонасыщенного песка скорость звука составляет 1580–1800 м/с, а коэффициент поглощения при 30–50 кГц равен  $18 \text{ м}^{-1}$ . Из этого следует, что сапропель по своим акустическим свойствам отличается от воды и песка, который часто служит подстилающей сапропель породой [3].

Одной из важнейших характеристик при оценке возможностей метода звуколокации при разведке озер на сапропель выступает коэффициент отражения на границе вода – сапропель. При слишком малом его значении граница будет нечеткой, отраженный сигнал может оказаться ниже порога чувствительности приемного устройства аппаратуры. Если коэффициент отражения стремится к единице, то преломленная волна будет иметь небольшую долю энергии и глубина ее проникновения окажется недостаточной для определения толщины слоя сапропеля.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Коэффициент отражения  $K_{\text{отр}}$  на границе двух сред может быть найден косвенно, а именно путем измерения акустической жесткости для двух сред:

$$K_{\text{отр}} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1},$$

где  $\rho_i v_i$  – акустические жесткости (волновые сопротивления) сред ( $i = 1, 2, 3\dots$ );  $\rho_i$  – плотность;  $v_i$  – скорость звука в средах.

В экспериментах на гидроакустической трубе [4] коэффициент отражения определяется непосредственно по экрану осциллографа. Метод основывается на том, что в трубе с акустически жесткими стенками, представляющей собой акустический волновод, из всего возможного в ней спектра нормальных волн при возбуждении на частотах, удовлетворяющих условию

$$f = \frac{0,586 \cdot v}{d}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость звука в воде;  $d$  – внутренний диаметр трубы, распространяется только квазиплоская волна основной моды, аналогичная плоской волне в неограниченном полупространстве.

Помещая на одном конце трубы излучатель и приемник, а на другом – исследуемый образец, можно, сравнивая отраженные импульсы от образца и от свободной поверхности воды, измерять коэффициент отражения от образца. Если же приемник поместить со стороны образца, то можно определить и коэффициент поглощения в нем акустической энергии. Подобные установки применяются в гидроакустике для измерения акустических сопротивлений материалов (в частности, при исследовании звукопоглотителей).

Требуемая жесткость стенок может быть получена, если применять стальные трубы с толстыми стенками. Недостаточная жесткость вызывает уменьшение фазовой скорости звука.

Условие (1) и требование жесткости стенок легче удовлетворить, взяв трубы небольших диаметров. Однако диаметр должен быть не слишком мал. В противном случае образец окажется неподходящим. Требования к длине трубы обуславливаются возможностью раздельного наблюдения импульсов, отраженных от концов трубы на самой низкой измеряемой частоте.

При проведении экспериментов использовалась стальная труба с внутренним диаметром 58 мм, толщиной стенок 28 мм и длиной 180 см. Согласно приведенным размерам трубы, рабочие частоты, удовлетворяющие условию (1), находятся в диапазоне 5–15 кГц.

Схема лабораторной установки показана на рис. 1.

К нижнему концу трубы 1, заполненной водой, с помощью прижимной шайбы 6 и резиновых прокладок 4 крепилась медная или дюралюминиевая мембрана 5 толщиной 1 мм, к которой прижимались с помощью шайбы 7 излучатель и приемник 8. Образец 3, помещенный в специальный контейнер из оргстекла, вводился в трубу сверху. Для облегчения этой операции к верхнему концу трубы прикреплялся прозрачный раструб 2, позволяющий наклонно погружать контейнер с сапропелем в воду и визуально контролировать, чтобы на дне контейнера не образовывались пузырьки воздуха.

В качестве возбуждающего генератора и регистратора волновой картины использовался серийный прибор 9 – ультразвуковой дефектоскоп ДУК-20. Фильтр на 15 кГц имеется в схеме усилителя прибора. На частотах меньше 15 кГц применялся специально изготовленный выносной LC-фильтр – параллельный контур, настроенный на нужную частоту.

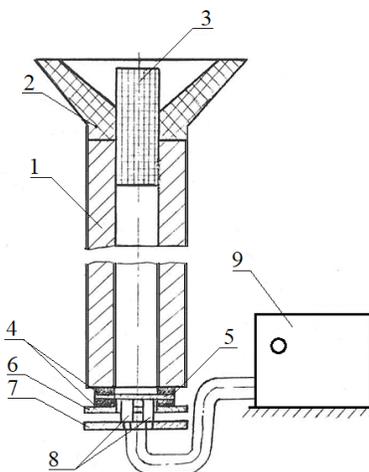


Рис. 1. Схема установки с гидроакустической трубой

Практика измерений показала, что состояние торцовых граней и внешней поверхности не оказывает заметного влияния на акустические измерения. Свойства трубы не ухудшаются от сверления отверстий в стенках для ее установки и крепления мембраны. Сила и равномерность прижатия датчиков к мембране значительно воздействуют на параметры системы и подбираются опытным путем. Нижняя поверхность мембраны для лучшего акустического контакта смазывается маслом. В качестве преобразователей использовались: на излучении – пьезопакеты из сегнетовой соли 45°-го среза с размерами 10 × 10 × 10 мм из 10 элементов; на приеме – целый куб с размерами 5 × 5 × 5 мм. Коэффициент отражения от алюминиевой мембраны достаточно высок, поэтому упругий импульс распространяется внутри трубы, поочередно отражаясь на ее концах и постепенно уменьшаясь по амплитуде. Длина трубы и скважность следования импульсов удовлетворяют условию свободного их прохождения без наложения прямого и отраженного сигналов. При измерении коэффициента поглощения излучатель и приемник

находились на разных концах трубы. Сравнивались амплитуды импульсов, прошедших через образец и без образца.

Амплитуда измеряемого импульса

$$A_{\text{изм}} = A_0(1 + K)e^{-\alpha H}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – амплитуда импульса при отсутствии в трубе образца;  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $H$  – длина образца, м ( $H = 0,3$  м);  $K$  – коэффициент отражения от образца.

Из соотношения (2) следует, что

$$\alpha = \frac{1}{H} \cdot \ln \frac{A_0(1+K)}{A_{\text{изм}}}. \quad (3)$$

По формуле (3) рассчитывался коэффициент поглощения сапропеля.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По ходу экспериментов на гидроакустической трубе были получены данные, позволяющие судить об акустических свойствах сапропеля и их изменениях при различных параметрах акустического поля, а также при изменении физико-механических свойств самого сапропеля.

Для изменения влажности образец сапропеля разбавлялся дистиллированной водой. Если вес исходного образца сапропеля –  $P_1$ , влажность –  $W_{\text{н}}$ , а плотность –  $\rho_{\text{н}}$ , то влажность  $W$  и плотность  $\rho$  полученной суспензии при доливании некоторого количества воды  $P_2$  определяются по формулам:

$$W = \frac{P_1 \cdot W_{\text{н}} + P_2 \cdot 100}{P_1 + P_2};$$

$$\rho = \frac{P_1 \cdot \rho_{\text{н}} + P_2}{P_1 + P_2}.$$

Результаты измерений сведены в табл. 1 и 2, где  $A^c$  – зольность, % к сухому веществу; CaO – содержание окиси кальция, % к сухому веществу;  $W_o$  – влажность относительная, %;  $K_{\text{отр}}$  – коэффициент отражения;  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\text{м}^{-1}$ .

Таблица 1

Изменения коэффициента отражения и поглощения  
для различных образцов сапропеля в зависимости от влажности и плотности

Вид сапропеля	$A^c$	CaO	pH	$W_o$	$\rho$	$K_{\text{отр}}$	$\alpha$
Известковый, оз. Татаровское (Владимирская область)	47,1	33,49	8,2	69,0;	1,19;	0,40;	8,5;
				75,0;	1,15;	0,34;	5,3;
				80,3	1,13	0,32	4,5
Глинисто-зоогеновый, оз. Коломенское (Тверская область)	50,1	2,79	5,6	94,1;	1,02;	0,18;	2,5;
				95,2;	1,01;	0,17;	6,4;
				96,2	1,01	0,14	3,2
Песчано-зоогеновый, оз. Ташное (Рязанская область)	52,3	2,40	6,0	87,7;	1,25;	0,34;	5,2;
				89,8;	1,10;	0,31;	8,2;
				91,3	1,09	0,30	7,7

Таблица 2

Изменения коэффициентов отражения и поглощения  
в зависимости от частоты заполнения импульса для разных видов сапропеля

Вид сапропеля	$A^c$	СаО	$W_o$	$\rho_c$ , г · см <sup>-3</sup>	Частота, кГц							
					6,7		7,5		8,5		15	
					$K_{отр}$	$\alpha$	$K_{отр}$	$\alpha$	$K_{отр}$	$\alpha$	$K_{отр}$	$\alpha$
Известковый, оз. Татаровское (Владимирская область)	47,1	33,49	80	1,13	0,45	6,0	0,52	4,2	0,56	4,0	0,32	4,5
Глинисто-зоогеновый, оз. Коломенское (Тверская область)	50,1	2,79	96	1,01	0,40	4,8	0,47	4,6	0,56	3,2	0,15	3,6
Песчано-зоогеновый, оз. Ташное (Рязанская область)	52,3	2,40	91	1,09	0,46	8,4	0,52	7,5	0,54	4,0	0,30	8,4

Из приведенных данных видно, что коэффициент отражения от образцов сапропеля, как правило, выше расчетного. Это обстоятельство объясняется, во-первых, неравномерным распределением плотности сапропеля по высоте образца, а во-вторых, присутствием газообразной фазы во всех видах сапропеля в том или ином количестве. Следствием этого выступает увеличение коэффициента отражения по модулю, хотя знак коэффициента будет различным.

Из табл. 1 следует, что с увеличением влажности сапропелей уменьшается коэффициент отражения звуковой волны, так как акустическая жесткость, или волновое сопротивление, сапропеля стремится к акустической жесткости воды, а величина коэффициента отражения от какой-либо границы определяется разностью акустических жесткостей сред по обе стороны от нее (см. табл. 2). Увеличение влажности предполагает для одного и того же типа сапропеля снижение его плотности  $\rho_c$  и приближение к плотности воды  $\rho_w$ . То же самое можно сказать и о скорости распространения упругих волн.

Таким образом,  $\rho_c v_c \rightarrow \rho_w v_w$ , что вызывает выравнивание акустических жесткостей. Изменение волновой картины при отражении от свободной поверхности воды и от образца сапропеля приведено на рис. 2, в котором отраженный от образца импульс обозначен как  $I$ .

Коэффициент поглощения, как видно из табл. 1, также варьируется в зависимости от изменения влажности образца. Для первого образца коэффициент поглощения уменьшается с увеличением влажности. У второго и третьего образцов наблюдается сначала возрастание коэффициента поглощения при увеличении влажности, а затем его снижение, что связано с различием физико-химических свойств сапропелей. При разбавлении суспензии сапропеля водой в ней образуются мельчайшие пузырьки воздуха, которые затем выделяются при отстаивании. Все образцы сапропеля выдерживались в течение одного и того же времени. Сила сцепления пузырьков воздуха с частицами сапропелей различных видов неодинаковая. В первом образце время отстаивания было достаточным для выделения образовавшихся пузырьков воздуха, поэтому коэффициент

поглощения с увеличением влажности снижается. Для второго и третьего образцов значения сначала повышаются (см. табл. 1) из-за загазованности суспензии, а при дальнейшем возрастании влажности уменьшаются.

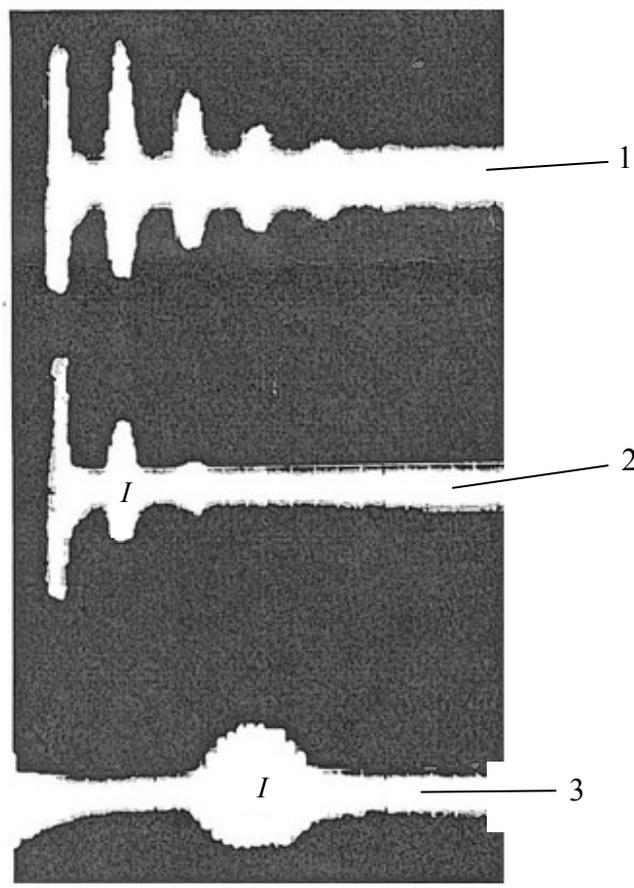


Рис. 2. Изменение волновой картины при отражении: 1 – от свободной поверхности воды; 2 – от образца сапропеля на частоте 15 кГц; 3 – первый отраженный импульс от образца сапропеля (метки времени – через 0,8 с)

Экспериментально установлены зависимости коэффициентов отражения и поглощения от частоты заполнения упругих колебаний в импульсе. В табл. 2 приведены результаты этих опытов, по которым построены зависимости коэффициентов отражения и поглощения от частоты (рис. 3). Опытные точки хорошо укладываются на кривые, проходящие через максимум для коэффициента отражения и минимум для коэффициента поглощения. Наблюдается явление квазирезонанса на частотах 8–13 кГц для всех изученных образцов сапропеля.

Экспериментальные исследования процессов волнового движения в материалах сопровождаются дисперсионными явлениями; данные явления обуславливаются геометрической формой и размерами волновода, физико-механическими свойствами материала. Основные виды физико-механической дисперсии – релаксационная, температурная и резонансная [5].

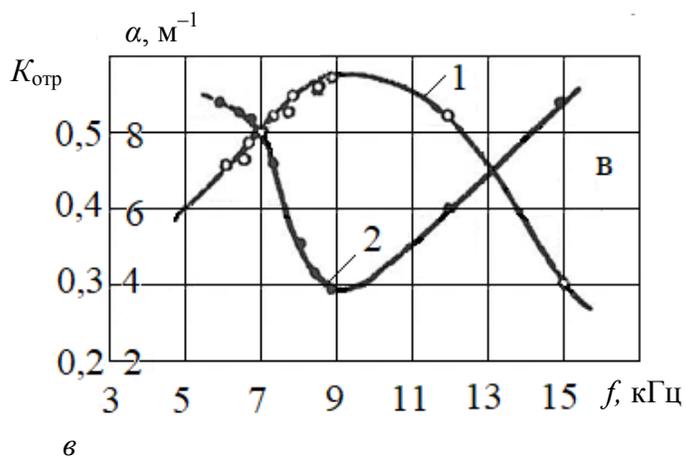
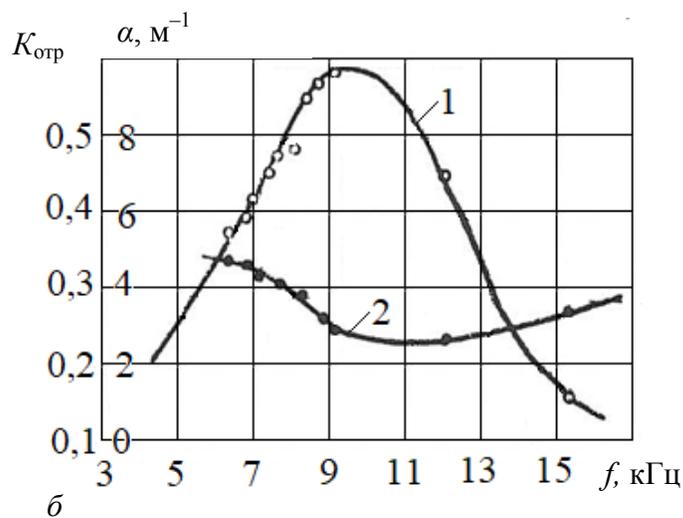
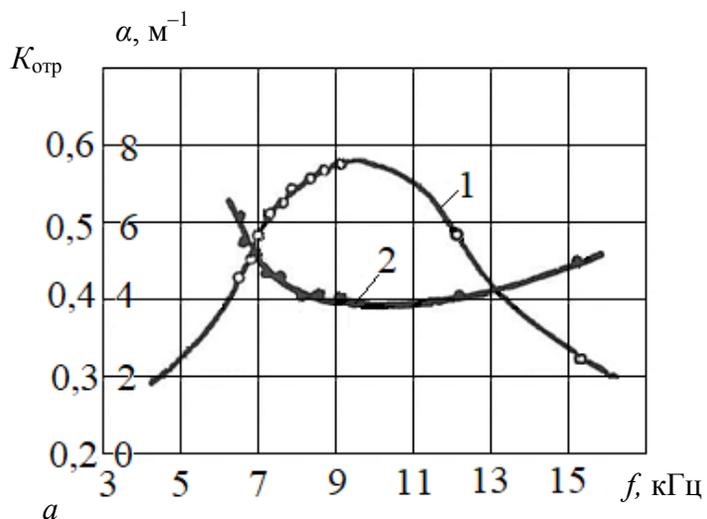


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения (1) и поглощения (2) от частоты у сапропеля: *a* – известкового; *б* – глинисто-зоогенового; *в* – песчано-зоогенового

В основе релаксационной дисперсии лежит процесс установления статистического равновесия системы, который требует определенных временных затрат. Это обусловлено соотношением времени процесса и времени релаксации системы:

$$y = y_0 e^{-t/\tau},$$

где  $y_0$  и  $y$  – начальное и конечное значения релаксирующего показателя (деформации или напряжения);  $t$  – время процесса (период колебаний);  $\tau$  – время релаксации системы.

Время релаксации определяется физико-механическими свойствами и для большинства материалов не является величиной постоянной. Во многих материалах наблюдается спектр времен релаксации.

Аналогичные явления лежат в основе температурной дисперсии, которая обусловлена изменениями условий обмена энергии между областями сжатия и разрежения. Однако результаты температурной дисперсии часто оказываются противоположными релаксационной.

Резонансная дисперсия наблюдается в материалах, которые содержат в себе включения в виде резонаторов, физико-механические свойства которых значительно отличаются от свойств окружающей среды. В максимуме такая дисперсия наблюдается при совпадении частотной характеристики волн с собственной частотой резонаторов. В реальных материалах резонансная дисперсия может выражаться в широком спектре частот из-за структурных микро- и макронеоднородностей.

Модель сапропеля как колебательной системы должна отражать всевозможные комбинации последовательно-параллельного соединения составных элементов, которые моделируют упругие  $H$ , вязкие, инерционные  $\gamma$ , пластические и структурные свойства, а также свойства сухого трения.

При малых деформациях и напряжениях вязкостные, пластические свойства и сухое трение проявляются незначительно, поэтому для анализа прохождения упругого импульса через сапропель достаточно проанализировать элементы модели ( $\gamma + H$ ). Решению поставленной задачи вполне удовлетворяет дифференциальное рассмотрение работы элементов модели при прохождении через них упругих импульсов. Анализ работы элементов в волновом движении может быть сведен к решению задачи по определению деформации системы ( $\gamma + H$ ), так как ее изменение во времени отражает форму зондирующего импульса после прохождения через упомянутые выше элементы модели [6].

Если зондирующий импульс представляет собой отрезок синусоиды, то для случая, когда  $t \leq a$  ( $a$  – длительность импульса), выражение для деформации системы ( $\gamma + H$ ) имеет вид

$$Y = \frac{P}{\gamma(\omega^2 - k^2)} \cdot \left( \sin kt - \frac{k}{\omega} \sin \omega t \right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при совпадении частоты зондирующего импульса  $\omega$  с частотой системы  $k$  наступает условие резонанса, что приводит к поглощению волны (нагреву образца).

## Собственная частота сапропеля как колебательной системы

$$k = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (5)$$

где  $K$  – условная жесткость упругих связей,  $\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $m$  – масса частицы сапропеля, кг.

Размер частицы сапропеля непостоянен даже для одного его вида. Согласно результатам исследований М.П. Воларовича и В.Н. Тропина [7], сапропели являются полидисперсными системами. На кривой распределения частиц для сапропелей многих видов по размерам имеется два максимума (рис. 4). Первый располагается в интервале размеров частиц с эффективным радиусом 0,5–2,5 мкм, второй, более выраженный, – в интервале размеров частиц с радиусом 25–125 мкм. Форма более 90 % частиц высокодисперсных фракций сапропелей округлая и овальная. Плотность скелета сапропеля составляет 1,5–1,6  $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$ , масса частицы сапропеля основной фракции –  $1,3 \cdot 10^{-8}$  кг.

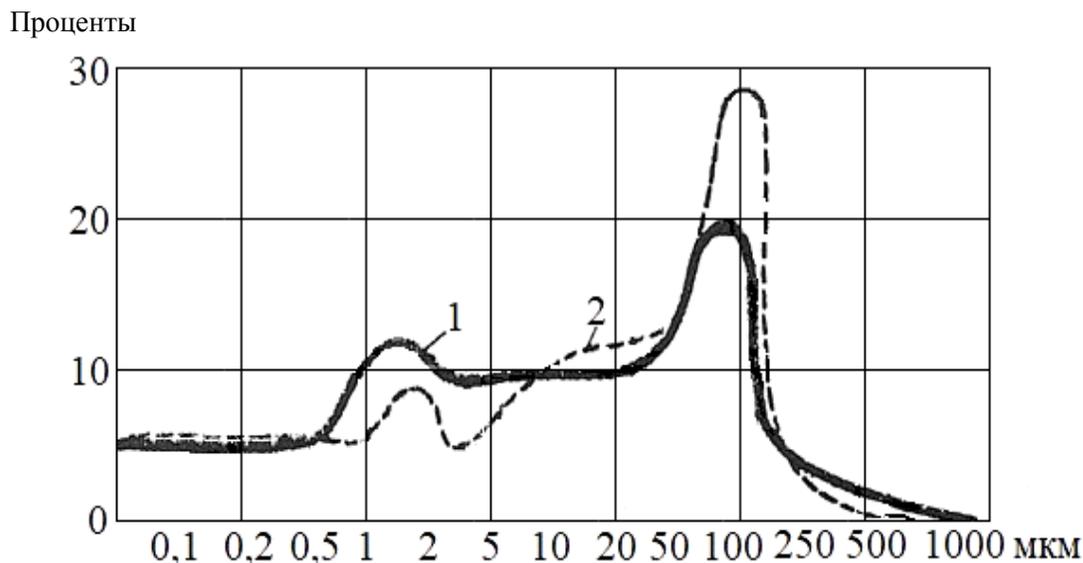


Рис. 4. Кривые распределения частиц сапропеля по размерам:  
1 – водорослевый сапропель; 2 – глинисто-известковый

Условный коэффициент жесткости связей частиц сапропеля можно определить из соотношения

$$K = E \cdot \frac{S}{L},$$

где  $E$  – модуль объемной упругости,  $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $S$  – эффективное сечение зоны взаимодействия частиц,  $\text{м}^2$ ;  $L$  – длина образца, м.

Частица сапропеля имеет шарообразную форму с некоторым эффективным диаметром. Воспользуемся соотношением теории Герца, по которой силу взаимодействия частиц сапропеля можно определить следующим образом:

$$P = m \cdot W,$$

где  $m$  – масса частицы сапропеля, кг;  $W = A \cdot \omega^2$  – ускорение частицы в колебательном движении ( $\omega$  – циклическая частота колебаний;  $A = d \cdot U$  – амплитуда колебаний, м;  $d$  – пьезомодуль материала датчика (для сегнетовой соли  $8 \cdot 10^{-12}$  м/В);  $U$  – напряжение, приложенное к датчику,  $U = 300$  В).

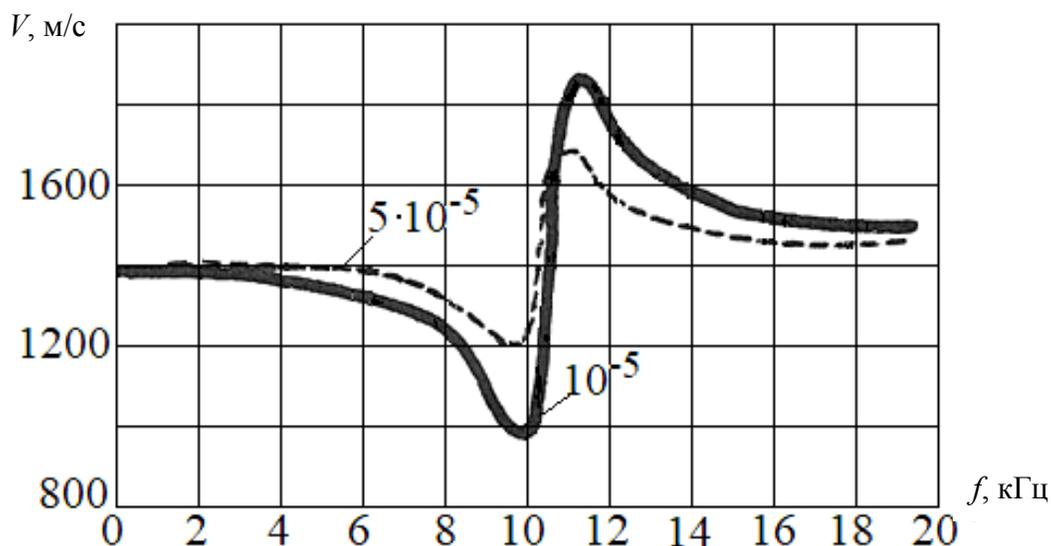
Площадь эффективного сечения зоны взаимодействия частиц сапропеля (площадь контакта)

$$S = \pi a^2 = \pi \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3m \cdot A \omega^2 r}{4E_{ст}}\right)^2} = 2,2 \cdot 10^{-10} (\text{м}^2)$$

(здесь  $a$  – радиус эффективного сечения;  $r$  – размер частицы сапропеля;  $E_{ст}$  – статический модуль упругости), а условный коэффициент жесткости связей, приведенный к длине исследуемого образца,  $K_{ж} = 1,75$  Н/м.

Собственная частота колебаний системы, вычисленная по формуле (5), составит 11,6 кГц, то есть будет того же порядка, при котором отмечается максимум на рис. 3. Это свидетельствует о том, что результаты расчета находятся в согласии с экспериментальными данными и коэффициент отражения звуковой волны от образца сапропеля возрастает вследствие резонансной дисперсии скорости распространения упругих колебаний.

Дисперсия скорости может наблюдаться также благодаря присутствию в образцах сапропеля воздушных пузырьков, которые способны пульсировать в жидкости с определенной частотой [5]. На резонансной частоте коэффициент поглощения проходит через максимум (рис. 5), а затем быстро уменьшается при отклонении от резонансной частоты.



*a*

Рис. 5. Зависимость: *a* – фазовой скорости  $V$  звука; *b* – коэффициента поглощения  $\alpha$  в воде, содержащей газопузырьки с собственной частотой пульсации 10 кГц, от частоты  $f$

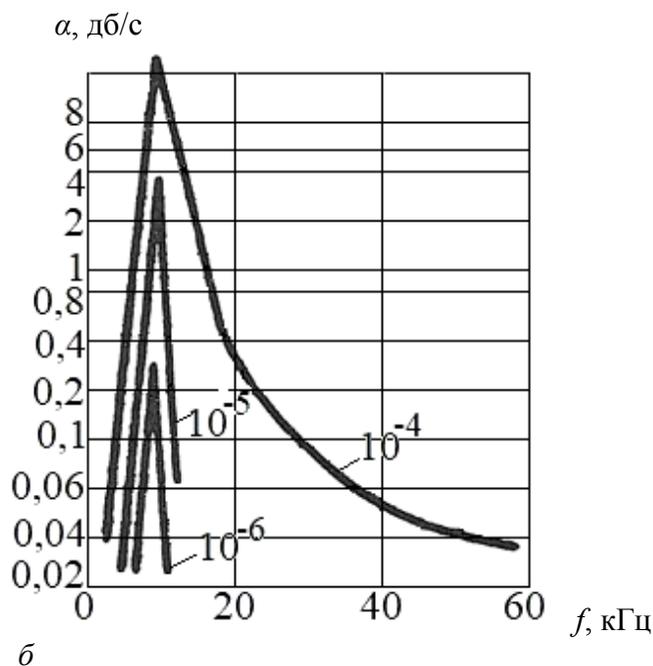


Рис. 5. Продолжение

Фазовая скорость звука значительно увеличивается на частотах, которые несколько больше резонансных, так как изменения объема пузырьков и звукового давления в них при этих частотах происходят несинфазно. Если давление возрастает, то сжимаемость воды, содержащей пузырьки, уменьшается. При содержании пузырьков различных размеров фазовые скорости звука были 2500 м/с и выше. Полученные зависимости коэффициента отражения от образцов сапропеля и коэффициента поглощения в них колебаний можно объяснить присутствием в этих образцах пузырьков воздуха с собственной частотой, несколько меньше той, что соответствует максимуму коэффициента отражения.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, дисперсия скорости распространения звука в образцах сапропеля и изменение его акустических свойств в интервале частот 8–13 кГц вызывается различными физическими причинами, возникающими из-за непостоянства физико-механических свойств сапропеля при воздействии внешних нагрузок.

На характер волнового движения в сапропелях значительно влияет резонансная дисперсия скорости звука, обусловленная включением резонаторов в виде твердых частиц сапропеля или газовых пузырьков, образующихся в результате процессов диагенеза. В ходе этих процессов органическое вещество, разлагаясь, частично переходит в газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ).

Итоги проведенных исследований, изложенные в настоящей работе, могут быть использованы при разработке практических рекомендаций по исследованию сапропелевых месторождений и позволяют найти ответы на многие актуальные вопросы, касающиеся состава этих месторождений (в том числе о насыщенности влагой, загазованности), разделения на слои, условий формирования и объемов их залежей, а также помогают с выбором параметров звуколокационной аппаратуры и расшифровкой результатов полевых эхограмм.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Макаренко Г.Л. Прогнозная оценка качественных характеристик месторождений сапропеля водно-эрозионных озер методом звуковой геолокации // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 3. С. 114–117.
2. Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Исследование изменения спектрального состава упругого импульса при отражении и прохождении через сапропель // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 97–105.
3. Гамаюнов Н.И., Косов В.И., Иванов Г.Н. Геофизические методы изучения торфа, сапропеля и их месторождений: монография. Тверь: ТГТУ, 2002. 156 с.
4. Левин А.С., Мирандов В.Л. Сейсмоакустические методы в морских инженерно-геологических изысканиях. М.: Транспорт, 1977. 176 с.
5. Иванов Г.Н. Изучение сапропелевых отложений сейсмоакустическими методами. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Калинин, 1978. 202 с.
6. Калинин А.В., Калинин В.В., Азими Ш.А. Метод приближенной оценки искажения упругих импульсов при распространении в поглощающей среде // *Геофизические исследования*. Вып. II. М.: МГУ, 1966. С. 50–57.
7. Воларович М.П., Тропин В.Н. Исследование степени дисперсности сапропелей при помощи седиментометра и электронного микроскопа // *Коллоидный журнал*. 1958. Т. 20. Вып. I. С. 13–19.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*ИВАНОВ Григорий Николаевич* – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры горного дела, природообустройства и промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

*КРИВЕНКО Ирина Валерьевна* – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

*СМИРНОВА Марина Анатольевна* – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mar-smir@yandex.ru

*ИСПИРЯН Светлана Рафаиловна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Определение коэффициентов поглощения в сапропеле и отражения на границе вода – сапропель с помощью гидроакустической трубы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 88–101.

**DETERMINATION OF ABSORPTION COEFFICIENT IN SAPROPEL  
AND REFLECTION COEFFICIENT  
AT THE WATER-SAPROPEL BOUNDARY USING SONAR TUBE**

*G.N. Ivanov, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, S.R. Ispiryayn*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** It is noted that the qualitative characteristics of sapropels (humidity, density, ash content), as well as gas contamination affect their acoustic properties, which must be taken into account when studying sapropel deposits using the sonar method. The results of sapropel studies implemented on a sonar tube are presented. It is indicated that the choice of sound frequencies of sapropel samples is related to the pipe parameters. Samples of sapropels from lakes of the Tver, Vladimir and Ryazan regions, differing in the conditions of formation of bottom sediments and the main characteristics, were used for research. It has been demonstrated that an increase in the humidity of sapropels leads to a decrease in the reflection coefficient of the sound wave. Based on measurements of the reflection coefficients at the sapropel-water boundary and the absorption coefficients of sapropels, which differ in humidity and density, conclusions are drawn about their composition, physico-mechanical properties and impact on the quality of sonar imaging.

**Keywords:** sapropel, sonar, sonar tube, absorption coefficient, reflection coefficient, frequency, sound velocity dispersion, sounding pulse.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*IVANOV Grigory Nikolaevich* – Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining, Environmental Management and Industrial Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

*KRIVENKO Irina Valer'ena* – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

*SMIRNOVA Marina Anatol'evna* – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mar-smir@yandex.ru

*ISPIRYAN Svetlana Rafailovna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryayn S.R. Determination of absorption coefficient in sapropel and reflection coefficient at the water-sapropel boundary using sonar tube // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 88–101.