**В.А. Лисютин^{1,2}, О.Р. Ластовенко¹, Ж.В. Маленко^{1,2},
А.А. Ярошенко^{1,2}**

**ОЦЕНКА МИКРОПАРАМЕТРОВ МЕЖГРАНУЛЯРНОГО
ТРЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОГО РАЗМЕРА ПОР
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В
НЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ МОРСКИХ ОСАДКАХ**

¹ Севастопольский государственный университет
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
² ФГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова в г. Севастополе,
Россия, 299001, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7, корп. 8/22,
E-mail: vlisiutin@mail.ru; yaroshenko.575@yandex.ru

Важнейшим акустическим свойством морских осадков является скорость, коэффициент затухания звуковой волны и их частотные зависимости. Приводится дисперсионное уравнение GSEC теории распространения звука в неконсолидированных морских осадках. Анализируются результаты измерений скорости звука и затухания в различных типах морских осадков, опубликованные в открытой печати, и дается оценка входных параметров GSEC модели: модуля межгранулярной жесткости и показателя стресс-релаксации, эффективного радиуса пор. Показывается, что в рассмотренных осадках микропараметры межгранулярного трения одинаковы.

Ключевые слова: GSEC модель, звуковые волны, межгранулярное трение, неконсолидированные осадки, параметры волн, GS теория Букингема

В настоящее время в акустике морских осадков конкурируют две теории – межгранулярного трения М. Букингема [1] и Био-Столла, расширенная Н. Чотирисом и М. Кимура [2]. Теория Био-Столла основана на представлении об «упругом скелете» в неконсолидированных осадках, что противоречит фактам и показывает на высоких частотах затухание $\sim \omega^{1/2}$, что не соответствует измерениям.

Эксперименты убеждают, что в сухих песках коэффициент затухания $\alpha_p = \alpha_{p0} f^1$. Измерения в водонасыщенных средах обнаруживают отклонения от закона $\sim f^1$, что предполагает как минимум два механизма потерь: основной, присущий как сухим, так и насыщенным средам («внутреннее трение») и второй – вязкая диссипация при движении флюида.

GS теория М. Букингема объясняет распространение и затухание гармонических волн в осадках межгранулярным трением, которое придает материалу жесткость, но и в тоже время вызывает потери энергии [1]. В GS теории осадки рассматриваются как однофазная среда и вязкие потери не учитываются. Центральная идея GS теории – деформационное упрочнение гранул – нелинейное на микроскопическом уровне явление. Частотная зависимость затухания оказывается $\sim \omega^1$, что соответствует экспериментам только на высоких частотах. В VGS-теории вязкое трение симулируется подобным жидкости реологическим элементом, что не позволяет связывать акустические свойства звуковой волны и физические характеристики среды.

В работе [3] представлена усовершенствованная GS теория – GSEC, согласно которой, объемный модуль упругости среды полагается не постоянным, а зависящим от частоты. Квадратное дисперсионное уравнение GSEC для комплексной фазовой скорости имеет вид:

$$\rho_m \tilde{c}_p^4 - (K_m + \gamma D + 0,33\phi \rho_m K_m A F_C) \tilde{c}_p^2 + 0,33\phi K_m \gamma D A F_C = 0, \quad (1)$$

где K_m – объемный модуль упругости, $\frac{1}{K_{m(ean)}} = \frac{P}{K_f} + \frac{1-P}{K_g}$, P – пористость, $\rho_{f,g}$, $K_{f,g}$ – плотности и упругости флюида и твердой фазы, $\rho_m = P\rho_f + (1-P)\rho_g$ – равновесная плотность среды, γ – композитный модуль межгранулярной жесткости, Па , n – показатель стресс-релаксации, $D = (i\omega)^n$ – дисперсионный член внутреннего трения, $A = \frac{(\rho_g - \rho_f)}{i^{3/2} w J_0(i^{3/2} w)}$. В (1) ϕ – эффективная пористость, $F_C(w) = 1 - \frac{2J_1(i^{3/2} w)}{i^{3/2} w J_0(i^{3/2} w)}$ – функция частотной коррекции, где $w = \sqrt{\omega a^2 \rho_f / \eta}$, $J_{0,1}$ – функции Бесселя, a – радиус пор.

Вещественные фазовые скорости c_p и коэффициенты затухания α_p могут быть получены из комплексных фазовых скоростей как:

$$c_p = \left(\text{Re}(\tilde{c}_p^{-1}) \right)^{-1}, \quad \alpha_p = -\omega \text{Im}(\tilde{c}_p^{-1}), \quad \text{Нп/м}.$$

Согласно модели GSEC, механизм внутреннего трения и вязкой дисперсии и диссипации в неконсолидированной среде реализуется следующим образом. Внутреннее трение проявляется в самом широком диапазоне частот, его физическая природа обусловлена нелинейностью контакта между гранулами. Вязкое трение возникает вследствие движе-

ния флюида относительно гранул среды и проявляется в окрестности «переходной» частоты. Компрессия приводит к истечению флюида из мелких пор и щелей между гранулами сквозь крупные сквозные поры, что увеличивает сжимаемость среды на низких частотах. С ростом частоты характер течения в сквозных порах постепенно меняется, их проницаемость уменьшается, поры «запираются», гранулы и жидкость колеблются вместе. Флюиду, заключенному в щелях, деваться некуда, что приводит к возрастанию упругости среды и скорости звука. Так проявляется консервативное влияние жидкости. Вязкое трение дает вклад в диапазоне средних частот, когда флюид еще мобилен, но и вязкие силы уже достаточно велики.

Входные параметры модели GS+EC подразделяются на две категории: микропараметры трения – γ и n ; микропараметр пор – a и эффективная пористость ϕ – внутренний параметр, связывающий акустические и физические характеристики среды. Величина ϕ характеризует и состояние среды – чем меньше разница между статической пористостью P и эффективной ϕ – тем ближе среда к суспензии. Эти параметры могут быть определены только путем инверсии экспериментальных данных. Обратим внимание, что величина γ влияет в основном на скорость, величина n – в основном на затухание.

Накопленный авторами опыт инверсий в рамках GS и GSEC моделей позволяет сделать следующий вывод. Кажущаяся изменчивость и уникальность микропараметров трения γ и n для каждого зернового набора является компенсатором неопределенности пористости и отсутствия возможности учитывать движение флюида.

Рассмотрим на рис. 1 результаты пяти измерений и в таблице 1 результаты шести инверсий в рамках GSEC модели. Данные взяты из [1, 4]. Как видно, скорость звука в этих точках разная, а коэффициенты затухания на высокой частоте, где проявляется только внутреннее трение, имеют значение (0.3 ± 0.1) дБ/м/кГц.

Примем за основу результаты измерений SAX99 и будем считать здесь эту среду эталонной. Поскольку скорость звука в измерениях SAX99 наибольшая, возьмем наименьшее значение пористости – 0.372. Восстановленные по этим входным параметрам величины γ и n будем считать осредненными для дна, показывающего на высоких частотах типичную частотную зависимость затухания. Приведенные на рис. 1 графики построены, подбирая только 3 свободных параметра: объемную пористость P , размер пор a , эффективную пористость ϕ .

Как видно из табл. 1 и рис. 1, возможно провести дисперсионно-диссипативные кривые через экспериментальные точки, соответству-

Рис. 1. Результаты измерений и восстановленные частотные зависимости скорости звука и приведенного коэффициента затухания в пяти локациях.

ющие различным локациям при одинаковых микропараметрах трения. Обратим внимание, что размеры гранул соответствуют диапазону от мелкого до крупного песка. Разброс размера пор и эффективной пористости для реальных морских осадков, представляющих смесь, оказывается невелик, устойчиво подтверждается значение $a = d/15$. Для осадков в виде чистого песка (SAX99) эффективная пористость больше, что отражает увеличенный вклад вязких сил.

Таблица 1. Результаты инверсий микропараметров трения, пористости и эффективного размера пор в шести локациях

Точка	d , мм	P	ϕ	a , мкм	γ , Па	n	K_g , Па
SAX99	0.38	0.372	0.23	23.8	2.36×10^7	0.192	3.2×10^{10}
St.An.b	0.22	0.380	0.11	17			
Trans.1	0.4	0.40	0.14	15			
WARB.	0.4	0.42	0.10	14.8			
MORAY	0.2	0.42	0.11	13.3			
VLA2	0.2	0.425	0.07	13.3			

Выводы

Если каждому зерновому набору соответствуют индивидуальные и уникальные микропараметры трения, тогда GS теорию, разработанную М. Букингом, следует считать бесполезной. Авторы доклада думают иначе. Реальным морским осадкам, в зависимости от состояния среды (уплотненное, суспензионное), присуща общность микропараметров трения. Различия в скоростях звука и коэффициентах поглощения объ-

ясняются различиями в локальных пористостях и разнообразием локальных течений порового флюида.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-42-920001.

Литература

1. Buckingham M.J. On pore-fluid viscosity and the wave properties of saturated granular materials including marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 122. No. 3. P. 1486–1501.
2. Chotiros N.P. Acoustics of the Seabed as a Poroelastic Medium // Springer Briefs in Oceanography. 2017. 99 p.
3. Лисютин В.А. Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 1. С. 85–100.
4. Yang J., Tang D. Direct Measurement of Sediment Sound Speed and Attenuation in the Frequency Band of 2 – 8 kHz at the Target and Reverberation Experiment Site // IEEE J. of Ocean. Eng. 2017. Vol. 42. No. 4. P. 1102–1109.

**V.A. Lisyutin^{1,2}, O.R. Lastovenko¹, Zh.V. Malenko^{1,2},
A.A. Yaroshenko^{1,2}**

ESTIMATION OF MICROPARAMETERS OF INTER-GRANULAR FRICTION AND EFFECTIVE PORE SIZE DURING THE PROPAGATION OF A SOUND WAVE IN UNCONSOLIDATED MARINE SEDIMENTS

¹*Sevastopol State University*

Universitetskaya str., 33, Sevastopol, Russia, 299053,

²*FGMU n. af. adm. F.F. Ushakov's in Sevastopol, 7*

Heroes of Sevastopol str., 8/22, Sevastopol, Russia, 299001,

E-mail: vlisyutin@mail.ru; yaroshenko.575@yandex.ru

The most important acoustic property of marine sediments is the sound speed, sound wave attenuation coefficient and their frequency dependences. The GSEC dispersion equation for the theory of sound propagation in unconsolidated marine sediments is presented. The results of measurements of the speed of sound and attenuation in various types of marine sediments are analyzed, published in the open press and the input parameters of the GSEC model are evaluated: the modulus of intergranular rigidity and the stress relaxation exponent, effective pore size. It is shown that in the considered sediments the microparameters of intergranular friction are the same.

Keywords: GSEC model, sound waves, intergranular friction, unconsolidated precipitation, wave parameters, GS Buckingham theory

Acknowledgment: The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 18-42-920001.

References

1. Buckingham M.J. On pore-fluid viscosity and the wave properties of saturated granular materials including marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, Vol. 122, No. 3, pp. 1486–1501.
2. Chotiros N.P. *Acoustics of the Seabed as a Poroelastic Medium*. Springer Briefs in Oceanography, 2017, 99 p.
3. Lisyutin V.A. Generalized rheological model of unconsolidated marine sediments with internal friction and effective compressibility. *Marine Hydrophysical Journal*, 2019, Vol. 35, No. 1, pp. 85–100.
4. Yang J. and Tang D. Direct Measurement of Sediment Sound Speed and Attenuation in the Frequency Band of 2–8 kHz at the Target and Reverberation Experiment Site. *IEEE J. of Ocean. Eng.*, 2017, Vol. 42, No. 4, pp. 1102–1109.