В.А. Лисютин, О.Р. Ластовенко, А.Д. Дегтяр, А.А. Ярошенко

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

*Севастопольский государственный университет,
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
E-mail: vlisiutin@mail.ru, yaroshenko.575@yandex.ru*

В докладе, в рамках GSED модели, анализируются результаты измерений скорости и затухания сдвиговой волны на различных частотах, взятые из открытых источников. Дается оценка величины межгранулярной жесткости, показателя стресс-релаксации, эффективного размера пор в осадках различного типа. Дается оценка степени взаимодействия фаз при распространении сдвиговой волны в неконсолидированных морских осадках.

Ключевые слова: межгранулярное трение, сдвиговые волны, морские осадки, неконсолидированные осадки, параметры трения

В неконсолидированных морских осадках могут распространяться также и поперечные волны. Связь между частичками твердой фазы при поперечном смещении возникает за счет межгранулярного трения. С другой стороны, трение вызывает и затухание упругих волн. Факторы, определяющие частотные зависимости скорости и затухания продольной и поперечной волн различны. Скорость продольной волны зависит в основном от упругости жидкости, то есть пористости, и в малой степени – от межгранулярного трения. Наоборот, скорость сдвиговой волны определяется только межгранулярным трением, затухание – межгранулярным и вязким трением.

Результаты измерений в сухих песках отмечают линейную частотную зависимость коэффициента затухания сдвиговой волны, $\alpha_s = \alpha_{s0} f^1$. Столл Р. [1], Кимура М. [2], обращают внимание на отклонения показателя от единицы в водонасыщенных средах. Вопрос о линейной или нелинейной частотной зависимости затухания, то есть о влиянии вязкого трения, является дискуссионным. Линейную точку зрения поддерживают Э. Гамильтон и М. Букингом [3], нелинейную – М. Кимура и Н. Чотирос [2, 4].

Ответ на вопрос о взаимодействии фаз при сдвиге позволяет выявить и источники дисперсии продольной волны – изменение сжимаемости среды, или изменение эффективной плотности среды, или и то, и другое, и в какой пропорции и на каких частотах.

Вязкое трение проявляется через изменение массовых свойств среды – изменение комплексной эффективной плотности. Дисперсионное уравнение для комплексной фазовой скорости GSEDs модели имеет вид [5]:

$$\tilde{c}_s = \sqrt{\frac{\gamma_s (i\omega t_0)^m}{\rho_{seff}}}, \quad (1)$$

где

$$\rho_{seff} = \rho_m - \phi \rho_f F_C(w) \quad (2)$$

– сдвиговая эффективная плотность. В формуле (1) γ_s – сдвиговая межгранулярная жесткость, Па, m – показатель стресс-релаксации, $t_0 = 1$ с – константа. В формуле (2) $\rho_m = P\rho_f + (1-P)\rho_g$ – равновесная плотность, P – пористость, ϕ – эффективная пористость,

$F_C(w) = 1 - \frac{2J_1(i^{3/2}w)}{i^{3/2}wJ_0(i^{3/2}w)}$ – функция частотной коррекции, $J_{0,1}$ – функции Бесселя:

$$w = \sqrt{\frac{a^2 \rho_f}{\eta}} \omega \quad (3)$$

a – размер пор, ρ_f – плотность жидкости, η – вязкость жидкости, Па·с.

Вещественная часть второго слагаемого эффективной плотности (2) характеризует инерционное взаимодействие фаз и управляет дисперсией фазовой скорости, мнимая часть характеризует вязкие силы и управляет затуханием. Эффективная плотность имеет простое физическое истолкование. На низких частотах $\text{Re}(F_C) \rightarrow 0$, $\text{Im}(F_C) \rightarrow 0$, $\rho_{seff} \approx \rho_m$, практически вся жидкость увлекается колеблющимися гранулами, а вязкие силы пренебрежимо малы. На переходной частоте часть жидкости увлекается, часть проскальзывает, вязкие силы максимальны. На высоких частотах гранулы и запертая в порах жидкость колеблются вместе, поперечно-подвижная часть жидкости – проскальзывает.

Вещественная фазовая скорость c_s и коэффициент затухания α_s могут быть получены из комплексной как:

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

Располагая экспериментальными данными измерений скорости и затухания сдвиговой волны, можно оценить параметры γ_s , m , a , ϕ .

Рассмотрим результаты экспериментов М. Кимуры [2]. В лаборатории измерялась скорость и затухание в сортированном песке с гранулами размерами: $d = \{0.917, 0.545, 0.324, 0.193\}$ мм. Графики и точки приведены на рис. 1, инвертированные параметры – в таблице 1. Остальные входные параметры следующие: $\rho_g = 2656$ кг/м³; $P = \{0.389, 0.383, 0.38, 0.378\}$; $\kappa = \{26.7, 14.6, 6.1, 1.94\} \times 10^{-11}$ м² – проницаемость. Следует обратить внимание на незначительные различия в пористостях, и большое (более, чем на порядок) различие в проницаемостях.

Таблица 1. Инвертированные микропараметры трения и микропараметры пористой среды

d , мм	$\gamma_{GS} \times 10^7$ Па	m_{GS}	$\gamma_{GSED} \times 10^7$ Па	m_{GSED}	ϕ	a , МКМ
0.917	2.63	0.0356	2.74	0.0236	0.385	31.8
0.545	2.21	0.394	2.46	0.0222		20.4
0.324	1.81	0.472	2.22	0.0232		13.2
0.193	1.63	0.494	2.05	0.0237		11.5

Рис. 1. Частотные зависимости фазовой скорости и коэффициента затухания по экспериментам М. Кимуры [2].

Как видно из рис. 1, все-таки приведенный коэффициент затухания в экспериментах М. Кимуры зависит от частоты, однако совсем не так, как для продольной волны. Во-первых: эффективная пористость для наилучшего соответствия везде взята максимальной, равной дренажной. Во-вторых: прослеживается однозначное соответствие – более крупным пескам соответствует меньшее затухание. Третье: размер пор лежит в диапазоне $a = d/28$, что примерно в 2 раза меньше, чем для продольной

волны. Чистые пески показывают высокую межгранулярную жесткость и низкий показатель деформационного упрочнения, что свидетельствует о практически упругом взаимодействии между гранулами.

На рис. 2 приведены графики зависимости межгранулярной жесткости и показателя деформационного упрочнения от диаметра гранул. Как видно, межгранулярная жесткость уменьшается вместе с размером гранул, что отражает корреляцию с фазовой скоростью. Показатель стресс-релаксации в рамках GSEDs модели слабо коррелирует с диаметром гранул и остается почти постоянным.

Рис. 2. Коэффициент межгранулярной жесткости и показатель стресс-релаксации в зависимости от диаметра гранул.

Выводы

Межгранулярное взаимодействие в уплотненных, флюидонасыщенных песках при деформации сжатия и сдвига существенно различаются. При сжатии гранулы показывают существенно нелинейное взаимодействие, при сдвиге – практически линейное.

Различается и механика взаимодействия между гранулами и жидкостью. Переходная частота при сдвиговой деформации оказывается выше, чем при компрессии. Объяснить это можно так: при гармоническом сжатии среды крупные поры с большим объемом запираются на более низкой частоте. Жидкость в этих крупных порах препятствует дилатации жидкости из мелких пор, что увеличивает упругость среды. При сдвиге тонкий слой флюида, заключенного в межгранулярной щели, создает вязкое сопротивление. Таким образом, оценка размера пор при компрессии ($a = d/15$) дает широкую, а при сдвиге – узкую часть порового пространства.

Работа выполнена в рамках внутреннего гранта СевГУ «Развитие теоретических моделей для физических методов исследования шельфа Черного моря», проект № 41/06-31.

Литература

1. Stoll R.D. Sediment Acoustics. New York: Springer, 1989.
2. Kimura M. Grain-size dependence of shear wave speed dispersion and attenuation in granular marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. 2014. Vol. 136. No. 1. P. EL53–EL59.
3. Buckingham M.J. Analysis of shear-wave attenuation in unconsolidated sands and glass beads // J. Acoust. Soc. Am. 2014. Vol. 136. No. 5. P. 2478–2488.
4. Chotiros N.P. Acoustics of the Seabed as a Poroelastic Medium // Springer Briefs in Oceanography. 2017. 99 p.
5. Лисютин В.А. Простая акустическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним и вязким трением // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2018. Т. 15. № 3. С. 39–51.

V.A. Lisyutin, O.R. Lastovenko, A.D. Degtyar, A.A. Yaroshenko

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

*Sevastopol State University
Universitetskaya str., 33, Sevastopol, Russia, 299053,
E-mail: vlisiutin@mail.ru, yaroshenko.575@yandex.ru*

The report, in the framework of the GSED model, analyzes the results of measurements of shear wave velocity and attenuation at various frequencies, taken from open sources. The magnitude of intergranular rigidity, stress relaxation exponent, and effective pore size in various types of sediments are estimated. The degree of phase interaction during shear wave propagation in unconsolidated marine sediments is estimated.

Keywords: intergranular friction, shear waves, marine sediments, unconsolidated sediments, friction parameters

Acknowledgment: The work was carried out within the framework of an internal grant from SevSU “Development of theoretical models for physical methods of studying the Black Sea shelf”, project No. 41 / 06-31.

References

1. Stoll R.D. Sediment Acoustics. New York: Springer, 1989.
2. Kimura M. Grain-size dependence of shear wave speed dispersion and attenuation in granular marine sediments. J. Acoust. Soc. Am., 2014, Vol. 136, No. 1, pp. EL53–EL59.
3. Buckingham M.J. Analysis of shear-wave attenuation in unconsolidated sands and glass beads. J. Acoust. Soc. Am., 2014, Vol. 136, No. 5, pp. 2478–2488.
4. Chotiros N.P. Acoustics of the Seabed as a Poroelastic Medium. Springer Briefs in Oceanography, 2017, 99 p.
5. Lisyutin V.A. A simple acoustic model of unconsolidated marine sediments with internal and viscous friction. Ecological Bulletin of the BSEC Scientific Centers, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 39–51.