

Н. А. ВИЛЬЧИНСКАЯ
ВОЛНА ПЕРЕУПАКОВКИ ПЕСКОВ И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

(Представлено академиком П. Я. Кочиной 25 VI 1981)

В работе представлены результаты исследования распространения волн напряжений разных частот в морском кварцевом песке различной влажности. Эксперименты проводились на полигоне в условиях естественного залегания песков на Балтийском море.

Для изучения и приема ультразвуковых колебаний в импульсном режиме использовался прибор ДУК-20 и его оригинальные датчики напряжения σ_x на частотах 25; 60 и 150 кГц. Время распространения импульса определялось по шкале задержек прибора. Для выделения частотных составляющих колебаний, прошедших через песок, применялся анализатор спектра FSP-80. Изображение прошедшего через песок сигнала и его спектр фиксировались кинокамерой. Излучатель и приемник располагались относительно друг друга по схеме I, II, III (рис. 1).

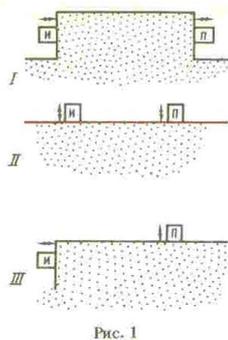


Рис. 1

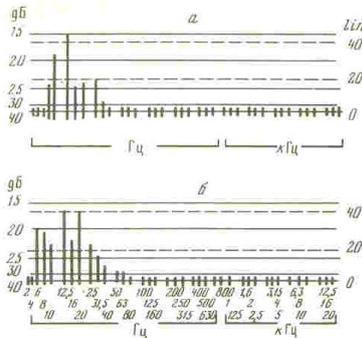


Рис. 3

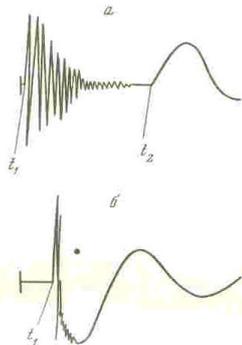


Рис. 1. Схема взаимного расположения излучателей и приемника. Стрелки указывают направление оси чувствительности датчика

Рис. 2. Вступление высокочастотного импульса и низкочастотных колебаний: весовая влажность песка 24 (а) и 14% (б)

Рис. 3. Спектр импульса 25 кГц (а), прошедшего через ненарушенный песок толщиной 10 см, и спектр сигналов а.э. при нагружении ненарушенного песка в пределах практической упругости (б)

Схема I – массив песка прозвучивался в направлении, параллельном поверхности. Излучателем генерируются смещения u_x . Направление распространения излучаемой волны совпадает с направлением распространения изучаемой волны. Оси чувствительности датчиков направлены навстречу друг другу.

Схема II – излучатель и приемник расположены перпендикулярно поверхности массива. Генерируются смещения u_z . Направление распространения излучаемой волны перпендикулярно направлению распространения изучаемой волны. Оси чувствительности датчиков параллельны, направлены в одну сторону.

Схема III – генерируются смещения параллельно поверхности массива. Направление распространения излучаемой волны перпендикулярно направлению распространения изучаемой волны, при этом оси чувствительности датчиков взаимно перпендикулярны.

Плотность, т/м ³	Вес. влаж- ность W, %	Частота из- лучения, кГц	Базис, см	Схема I			
				α_1	α_2	V ₁	V ₂
1,95	28	5	20-40			1661	
1,96	24	5	20-40			1630	122
2	24	25	20-40	1		1678	64,2
1,96	20	150	20-40			1550	148
1,92	17	60	20-40		0,36		191
1,90	14	25	20-40		0,4		204
1,86	4	25	20-40				200
1,85	0	25	10-20				260
1,96	24	1	20-40			1539	148,3
1,96	22,3	25	20-40			1469,6	176
1,90	20,6	25	20-40			1475	153,6
1,88	14,7	25	20-40				223,6

Примечание. α_1 и α_2 в непер/100 мкс, V₁ и V₂ в м/с

По схеме I в режиме прямого прозвучания полностью водонасыщенных песков (свободная вода над поверхностью песка) наблюдалось распространение высокоскоростной волны со скоростью $V_1^0 = 1660$ м/с на частоте излучателя. Это волна первого рода по терминологии Френкеля – Био [1-3]. Волна второго рода (волна переупаковки) не наблюдалась, что объясняется исключительно сильным затуханием [3]. В том же песке, но не полностью водонасыщенном (табл. 1) при прозвучивании на базисах от 20 до 70 см на экране осциллографа четко видны первое вступление и затухающий импульс высокочастотных колебаний (рис. 2а). Его скорость V₁ немного ниже, чем V₁⁰. Через некоторое время (определяемое в зависимости от длины базиса) приходит цуг низкочастотных колебаний, скорость его распространения характерна для волны переупаковки (V₂). Коэффициент затухания α_2 (непер/100 мкс) низкочастотных колебаний оказывается несколько меньше коэффициента α_1 для первых волн (табл. 1). Спектральный анализ показывает, что низкочастотная составляющая волны содержит частоты от 2 до 25 Гц при частоте зондирующего импульса 25 кГц.

Распространение высокочастотных и низкочастотных колебаний, возбужденных высокочастотным импульсом, наблюдается также при расположении датчиков по схемам II и III. Это доказывает, что низкоскоростная волна возникает из-за эффекта взаимосвязи продольного и поперечных смещений, усиливаемого за счет дилатансии грунта [4].

Скорость распространения волны напряжений в практически сухом песке (по весу $W \leq 14\%$) низка, однако она все же выше, чем скорость распространения волны переупаковки во влажных плотных песках (см. табл. 1). В этих экспериментах также четко было видно, что первое вступление соответствует высокочастотной волне напряжения, которая модулирует низкочастотную составляющую, полностью вырождаясь затем в последнюю (рис. 2б). Доля высокочастотных колебаний в импульсе, прошедшем через песок, убывает с увеличением базиса. Так, в сухих песках на максимуме мощности излучаемого высокочастотного (25 кГц) импульса уже при базисе 10 см практически всю колебательную энергию прошедшей через песок волны несет низкочастотная составляющая. При этом скорость распространения волны первого рода, фиксированная здесь по высокочастотному сигналу, незначительно отличается от скорости волны переупаковки ($V_1 \approx V_2$). В совершенно сухих песках волна напряжения всего одна – низкоскоростная, т.е. волна переупаковки.

Схема II				Схема III				Усредн. размер зерен, мм
α_1	α_2	V_1	V_2	α_1	α_2	V_1	V_2	
								0,17
		425	117					0,17
0,9		416	61,3			1643	67,4	0,17
			158,6				174,6	0,17
		426,6	155	0,6		305,3	192,3	0,17
								0,17
								0,17
								0,17
								0,17
								0,17

На рис. 3а приведен спектр импульса с частотой заполнения 25 кГц, прошедшего через слой ненарушенного песка толщиной 10 см. При одноосевом нагружении того же песка в начальной стадии нагружения в пределах практической упругости грунта датчики давления принимают сигналы (рис. 3б) акустической эмиссии, спектр которых аналогичен спектру на рис. 3а. Таким образом, со скоростью волны переупаковки распространяется фронт акустической эмиссии (а.э.) песка, в условиях малых нарушений его структуры.

При повторных включениях излучателя (амплитуда зондирующего импульса остается прежней) волна переупаковки существует без каких-либо изменений. Тем самым наблюдаемая эмиссия не подчиняется закону Кайзера [5], т.е. при циклическом нагружении а.э. не начинается только на максимуме предыдущего цикла нагружения. Несоответствие а.э. в образцах при малых циклических нагрузках закону Кайзера отмечалось ранее в [6,7].

Спектральный анализ импульсов различной частоты, прошедших через пески, показал, что волна переупаковки имеет одни и те же частотные составляющие при прочих равных условиях по всем трем схемам прозвучивания. В то же время частота волны переупаковки зависит от размеров песчинок, их влажности и частотного заполнения зондирующего импульса.

Если рассматривать песок как систему частичек с n степенями свободы, каждая из которых имеет определенную массу m и коэффициент упругости α контактов частиц, то такая система имеет [8] дискретный спектр собственных частот, определяемый уравнением

$$\omega_k = 2 \sqrt{\alpha/m} * \sin k\pi / 2(n+1), \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Излучение волны переупаковки происходит на одной из резонансных частот песка за счет энергии, переданной грунту высокочастотным импульсом. Накачка ультразвуковой энергии в песок приводит к излучению его собственного звука (см. также [9]).

Таблица 2

Усредн. размер зерен, мм	Плотность, т/м ³	Вес. влажность, %	V_R , м/с	f_p , Гц
0,17	2	24	125	45-50
0,17	1,9	14	190	25
0,17	1,86	4	200	25-27
0,17	1,96	22,3	180	35-40

Итак, наблюдаемая волна переупаковки есть волна а.э. песков при малых отклонениях частички песка (элементарного осциллятора) из положения равновесия в пределах практической упругости. Скорость фронта а.э. максимальна в сухих песках ($W = 0$) и с увеличением влажности падает (табл. 1). В полностью водонасыщенных песках (на поверхности донного грунта) а.э. слабых воздействиях изучить не удается.

Как видно из табл. 1, 2, скорости волны переупаковки меньше или равны (в сухих песках) скорости поверхностной волны V_R частоты f_p , замеренной непосредственно на полигоне. Волна Рэлея генерировалась электродинамическим вибратором, помещенным на поверхности грунта перпендикулярно ей, на резонансных частотах f_p системы вибратор-грунт. Приведенные экспериментальные данные хорошо соответствуют теории [10], согласно которой в допредельных состояниях грунта низкие значения эффективных упругих модулей определяются наличием малых пластических деформаций переупаковки, но скорость распространения последних не может превосходить предельной скорости скольжения, т.е. волны Рэлея.

Автор признателен В. Н. Николаевскому за полезное обсуждение полученных результатов и помощь при их интерпретации.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
Морской геологии и геофизики, Рига

Поступило
1 VII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Френкель Я. И. – Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз., 1944, т. 8, № 4.
2. Biot M. A. – J. Acoust. Soc. Amer., 1962, vol. 34, № 9, p. 1254-1264.
3. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
4. Николаевский В. Н., Сырников Н. М., Шефтер Г. М. В сб.; Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука, 1975.
5. Kurita K., Fujii N. – Geophys. Res. Lett., 1979, 9-11 V6N1.
6. Wiederhorn S. M., Townsend P. R. – J. Amer. Ceram. Soc., 1970, vol. 53, p. 486-489.
7. Mizutani H., Kurita K., Waza T. – Seismol. Soc. Japan, 1978, № 1, p. 228.
8. Хайкин С. Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971.
9. Bagnold R. A. – Proc. Roy. Soc., A, 1966, vol. 295, № 1442, p. 219-233.
10. Николаевский В. Н. В сб.: Механика, № 26, Удар, взрыв и разрушение. М.: Мир, 1981.

ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1982

ТОМ 262 № 3

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)