

05

## Исследование динамического сопротивления сдвигу водонасыщенного песка по результатам обращенных экспериментов

© В.Л. Котов, В.В. Баландин, А.М. Брагов, Вл.Вл. Баландин

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: vkotov@inbox.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2016 г.

Представлены результаты исследования сопротивления сдвигу уплотненного сухого и водонасыщенного песка на основе экспериментально-расчетного анализа значений силы сопротивления на квазистационарной стадии внедрения цилиндрического ударника. Применена предложенная ранее методика обращенного эксперимента и мерного стержня с плоским торцом. Показано, что при практически полном водонасыщении песка его сдвиговые свойства снижаются, но остаются существенными в практически важном диапазоне скоростей внедрения.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44948.16530

Изучение физико-механических характеристик грунтовых сред при динамическом нагружении ведется достаточно давно. Разработанные методики плосковолнового эксперимента позволяют определять ударную адиабату сухого и влажного песка [1–3] в диапазоне нагрузок до нескольких гигапаскалей, сдвиговые свойства экспериментально определяются с применением модифицированной [4] методики Кольского при существенно меньших давлениях. Известно, что уплотнение песка ведет к изменению его прочностных характеристик, что приводит, например, к существенному изменению глубин проникания ударников [5]. При подготовке образцов в работах [1–4] плотность насыпного песка составляла  $1400\text{--}1600\text{ kg/m}^3$ . Методика обращенного эксперимента [6,7] позволяет определять ударные адиабаты сухого песка повышенной плотности  $1700\text{--}1850\text{ kg/m}^3$ . Ранее показано [8], что

сдвиговые характеристики грунтовых сред коррелируют со значениями силы сопротивления на квазистационарной стадии внедрения [9,10]. В настоящей работе методика [7,8] применяется для оценки сопротивления сдвигу водонасыщенного грунта.

Эксперименты проводились с песчаной смесью естественного состава, из которой были удалены частицы крупнее 1 mm и менее 0.1 mm. Методика обращенного эксперимента изложена в работах [6,7,10]. Метаемые контейнеры заполнялись сухим песком, который затем слегка уплотнялся. Контейнеры взвешивались для определения плотности сухого песка, а затем заливались определенным количеством воды до полного насыщения песка. Дальнейшее добавление воды вызывало образование слоя воды над поверхностью песка, поэтому лишняя вода сливалась. Контейнеры повторно взвешивались для определения плотности водонасыщенного песка относительно начальной плотности и его влажности. Средняя плотность исходного сухого песка и водонасыщенной естественной смеси составляла 1750 и 2095 kg/m<sup>3</sup> соответственно. Песок в основном состоит из частиц кварца, плотность которого равна 2650 kg/m<sup>3</sup>. Таким образом, пористость песка составляет 0.34. При полном заполнении этих пустот водой плотность влажного песка должна возрасти на величину 340 kg/m<sup>3</sup>, и плотность водонасыщенного песка должна быть равна 2090 kg/m<sup>3</sup>, что практически наблюдалось при подготовке экспериментов.

Известно, что сжимаемость грунта отражается ударной адиабатой, представленной линейной зависимостью скорости ударной волны  $D$  от массовой скорости  $u$  за ее фронтом [1,2,7]

$$D = A + bu. \quad (1)$$

Константа  $A$  близка к скорости распространения плоской волны сжатия в грунте при малых давлениях,  $b$  характеризует предельную сжимаемость грунта [1].

Ударная адиабата водонасыщенной грунтовой смеси может быть также получена на основе модели [11], применимость которой показана ранее на примере известных результатов плосковолновых экспериментов [2,3]. Пользуясь моделью многокомпонентной среды и уравнением (1) как аппроксимацией, в зависимости от содержания воды мы получили приведенные в таблице значения констант.

Из таблицы видно, что скорость распространения плоской волны в грунте растет с увеличением водонасыщения, растет также и скорость

Константы ударной адиабаты  $D(u)$  для песка различной влажности

№ п/п	Влажность, %	$\rho_0$ , kg/m <sup>3</sup>	$A$ , m/s	$b$
1	0	1750	455	2.3
2	10	1930	650	3.4
3	18	2060	1380	3.7
4	19	2090	1480	4.0

волны разгрузки. Следствием этого является меньшая длительность импульса сжатия в мерном стержне, чем в случае сухого грунта. Таким образом, в случае водонасыщенных грунтов определение усилия, действующего на ударник, по значениям импульса деформации на поверхности мерного стержня наталкивается на известную проблему, связанную с искажением формы импульса за счет дисперсии при распространении его в мерном стержне, отмеченную еще Кольским, Дейвисом и другими авторами. В работах [12–14] предложены поправки на дисперсию для коррекции формы импульса, основанные на точном решении Похгаммера–Кри для бесконечного упругого цилиндра и применении преобразования Фурье.

Рассмотрим один из результатов обращенного эксперимента, в котором контейнер с водонасыщенным грунтом наносит удар со скоростью  $V_0 = 320$  m/s по плоскому торцу мерного стержня диаметром 0.0205 m и длиной 1.5 m; плотность стержня  $\rho = 8050$  kg/m<sup>3</sup>, модуль Юнга  $E = 186$  GPa, предел текучести 2 GPa, скорость распространения волны в стержне  $c = 4807$  m/s. Параметры грунта представлены в строке 3 таблицы. Напряжения на поверхности контакта стержня и грунта в момент удара равны

$$\rho c (V_0 - u) = \rho_0 (A + bu)u. \quad (2)$$

Из соотношения (2) получаем скорость  $u = 283$  m/s, максимальное напряжение 1.4 GPa.

На рис. 1 представлены силы сопротивления внедрению ударника в водонасыщенный грунт со скоростью 320 m/s. Кривая 1 соответствует усилию  $F = E\varepsilon(t)S$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения стержня, импульс деформации  $\varepsilon(t)$  зарегистрирован на поверхности мерного

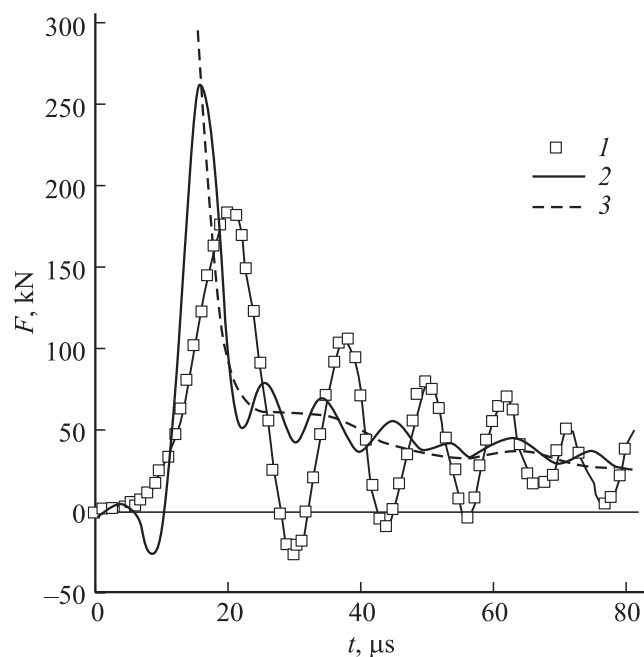
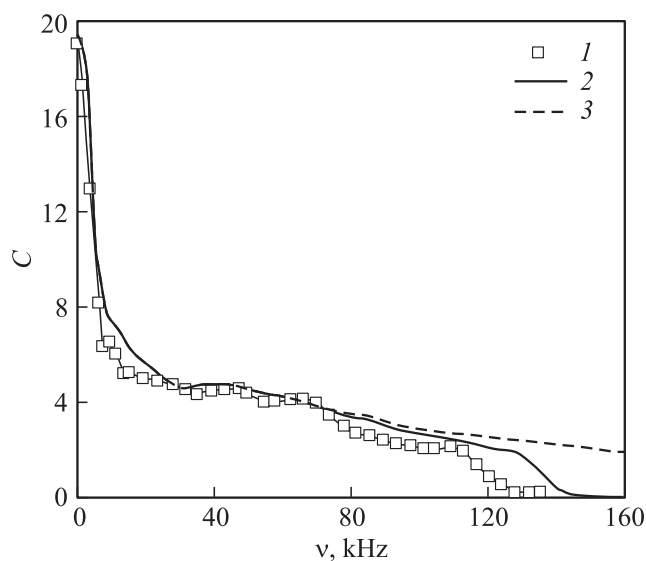


Рис. 1. Импульсы сжатия в мерном стержне.

стержня на расстоянии 1 м от его торца; кривая 2 представляет экспериментальные данные с поправкой на дисперсию [12,13] и с учетом неравномерности распределения деформации по поперечному сечению стержня [14–16]; кривая 3 представляет результаты численных расчетов в постановке [10]. Грунт описывался в рамках модели упругопластической грунтовой среды [9] с учетом зависимости предела текучести грунта от давления  $\sigma(p)kp/(1 + kp/Y)$ , где  $k$  — коэффициент внутреннего трения,  $Y$  — максимальное значение предела текучести.

Значения параметров для сухого песка получены ранее:  $k = 1.2$  и  $Y = 300$  МПа, для водонасыщенного песка принимались  $k = 0.5$ ,  $Y = 50$  МПа. Максимальное значение силы составляет 450 кН и на рис. 1 не приводится, для удобства представления импульсы смещены по времени. Близость результатов расчета и эксперимента на квазиста-



**Рис. 2.** Амплитудный спектр импульсов деформации в мерном стержне.

ционарной стадии внедрения свидетельствует о правильности выбора параметров модели грунтовой среды [9].

На рис. 2 представлен амплитудный спектр распространяющегося по стержню импульса деформации. Кривые 1 и 2 соответствуют результатам эксперимента и численного расчета импульса на расстоянии 1 м от торца стержня, кривая 3 представляет спектр расчетного импульса на торце стержня (показан кривой 3 на рис. 1). Отметим, что при частоте более 140 кГц амплитуда импульса, распространяющегося в стержне, обращается в нуль, в то время как амплитуда исходного импульса на торце стержня отлична от нуля. Данная частота, как отмечалось ранее [15,16], является критической для стержня данного радиуса. Таким образом, применяемая процедура [14–16] коррекции формы импульса не позволяет определить максимум столь короткого импульса, однако значение силы сопротивления на квазистационарной стадии внедрения, устанавливающейся после резкого спада, определяется достаточно точно.

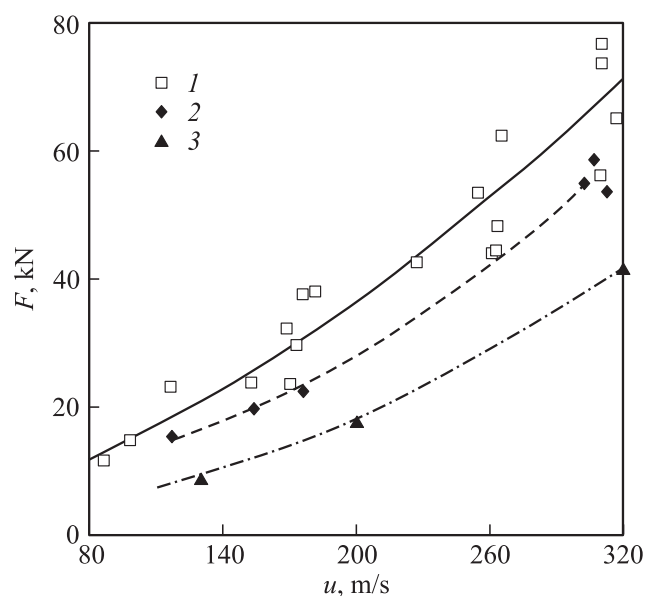


Рис. 3. Значения силы сопротивления на квазистационарной стадии внедрения.

На рис. 3 представлены значения силы сопротивления на квазистационарной стадии внедрения в зависимости от массовой скорости  $u$ , определенной из соотношения (2). Точки 1, 2 соответствуют результатам обращенных экспериментов по внедрению в сухой и водонасыщенный песок (строки 1 и 3 таблицы), точками 3 представлены результаты численных расчетов в гидродинамической постановке (строка 4 таблицы), линиями показаны аппроксимирующие квадратичные зависимости. Видно, что при практически полном водонасыщении песка его сдвиговые свойства снижаются, однако они остаются существенными и их необходимо учитывать. Полученные результаты будут полезны при решении задач проникания твердых тел в водосодержащие грунты.

Работа выполнена при финансировании РФФИ (№ 16-08-00825, 16-01-00524).

**Список литературы**

- [1] Лагунов В.А., Степанов В.А. // ПМТФ. 1963. № 1. С. 88–96.
- [2] Дианов М.Д., Златин Н.А., Мочалов С.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. В. 12. С. 529–532.
- [3] Брагов А.М., Грушевский Г.М. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 12. С. 70–72.
- [4] Брагов А.М., Ломунов А.К., Сергеевичев И.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 12. С. 83–87.
- [5] Бивин Ю.К. // МТТ. 2008. № 1. С. 154–160.
- [6] Баландин В.В., Брагов А.М. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Межвуз. сб. / Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1991. С. 101–104.
- [7] Брагов А.М., Баландин В.В., Ломунов А.К., Филиппов А.Р. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 11. С. 52–55.
- [8] Баженов В.Г., Котов В.Л. // ДАН. 2006. Т. 408. № 3. С. 333–336.
- [9] Котов В.Л., Баландин В.В., Брагов А.М., Баландин Вл.Вл. // ДАН. 2013. Т. 451. № 3. С. 278–282.
- [10] Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Котов В.Л. // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 6. С. 62–70.
- [11] Дремин А.Н., Карпухин И.А. // ПМТФ. 1963. № 3. С. 184–188.
- [12] Follansbee P.S., Frantz C. // J. Eng. Mater. Technol. 1983. V. 105. N 1. P. 61–66.
- [13] Gorham D. // J. Phys. E: Scientific Instruments. 1983. V. 16. N 6. P. 477–479.
- [14] Tyas A., Pope D.J. // Measurement Sci. Technol. 2005. V. 16. N 3. P. 642–652.
- [15] Merle R., Zhao H. // Int. J. Impact Eng. 2006. V. 32. N 12. P. 1964–1980.
- [16] Tyas A., Ozdemir Z. // Phil. Transact. Roy. Soc. A: Mathem. Phys. Eng. Sci. 2014. V. 37. N 2. P. 1–11.