

Котов В.Л., Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл. Исследование применимости методики обращенного эксперимента к определению динамических характеристик водонасыщенных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 97–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.06

Kotov V.L., Balandin V.I.V., Balandin V.I.V.I. Investigation of applicability of reversed experiment techniques to determine the dynamic characteristics of saturated soils. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 3. Pp. 97-107. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.06



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.3.06

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДИКИ ОБРАЩЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

В.Л. Котов, Вл.В. Баландин, Вл.Вл. Баландин

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 3 июня 2016 г.
Принята: 10 сентября 2016 г.
Опубликована: 30 сентября 2016 г.

Ключевые слова:

удар, обращенный эксперимент, ударная адиабата, квазистационарное значение силы сопротивления внедрению, сопротивление сдвигу, водонасыщенный грунт, мерный стержень, дисперсия упругой волны

АННОТАЦИЯ

Рассматривается задача определения силы сопротивления внедрению ударника с плоским торцом в сухой и водонасыщенный песчаный грунт в рамках методики обращенного эксперимента. В эксперименте контейнер с грунтом наносит удар по торцу мерного стержня, а значение силы сопротивления определяется на основе показаний датчика деформаций на поверхности мерного стержня на удалении от его торца. Численно исследован процесс распространения импульсов сжатия, образующихся при ударе о торец мерного стержня контейнера с водонасыщенным и сухим песчаным грунтом. Сжимаемость грунта отражается ударной адиабатой, сдвиговые свойства грунта описывает дробно-рациональная зависимость предела текучести от давления. Ударные адиабаты грунта различного водонасыщения получены на основе модели многокомпонентной среды. Численно получены зависимости от времени силы сопротивления внедрению цилиндрического ударника в сухой, влажный и водонасыщенный песчаный грунт. Отмечена меньшая длительность нестационарной стадии импульса силы во влажном грунте по сравнению с сухим грунтом.

Проведен анализ погрешности определения усилия, действующего на ударник, по значениям импульса деформации на поверхности мерного стержня. Численно продемонстрирован эффект действия геометрической дисперсии при распространении вдоль стержня импульса сжатия с длиной волны, сравнимой с радиусом цилиндра. Для восстановления импульса на торце стержня по его значениям на поверхности на удалении от места приложения нагрузки применяются модифицированные методики с поправками на дисперсию и с дополнительным учетом неравномерности распределения деформаций по поперечному сечению стержня. Отмечены искажения формы восстановленного импульса, получена зависимость ошибки в определении максимального значения от длительности нестационарной части исходного импульса. Показана достоверность определения квазистационарного значения силы сопротивления внедрению после введения поправок на дисперсию как в сухом, так и в водонасыщенном грунте.

© ПНИПУ

© **Котов Василий Леонидович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: vkotov@inbox.ru
Баландин Владимир Васильевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: balandin@mech.unn.ru

Баландин Владимир Владимирович – младший научный сотрудник, e-mail: rustydog2007@yandex.ru

Vasily L. Kotov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, e-mail: vkotov@inbox.ru

Vladimir V. Balandin – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, e-mail: balandin@mech.unn.ru

Vladimir V. Balandin – Junior Researcher, e-mail: rustydog2007@yandex.ru

APPLICABILITY OF REVERSED EXPERIMENT TECHNIQUE TO DETERMINE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SATURATED SOILS

V.L. Kotov, V.I. Balandin, V.I. Balandin

Research Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 3 June 2016
Accepted: 10 September 2016
Published: 30 September 2016

Keywords:

impact, reversed experiment, Hugoniot, quasi-stationary value of the penetration resistance force, shear strength, water-saturated soil, measuring rod, the elastic wave dispersion

ABSTRACT

The problem of determining the penetration resistance of the flat end projectile into dry and water-saturated sandy soils with the use of the reversed experiment technique is studied in the paper. In the experiment, the container with soil strikes the end of the measuring rod, and the resistance force is determined based on the strain gauge readings on the surface of the rod at a distance from its end. The propagation of pulse compression resulting from the impact of the rod flat end against the container with the water-saturated and dry sandy soils. The compressibility of the soil is described with Hugoniot, and the shear properties of the soil are described with a rational dependence of yield strength of the pressure. Hugoniot of the soils with different water saturation were obtained with the use of a multi-component model of the medium. The dependences of the resistance force of the cylindrical projectile on the time in dry, wet and water-saturated sandy soils were obtained numerically. In wet soils, the non-stationary phase of power pulse was shorter than in dry soils.

The analysis of errors was carried out in determining the forces acting on the projectile, from the values of the strain pulse on the surface of the rod. The effect of geometric dispersion during propagation along the rod pulse compression with a wavelength comparable to the radius of the cylinder was numerically shown. In order to restore the pulse at the end of the rod according to its values on the surface at a distance from the load point, the modified techniques were used after adjusting for variance and with an additional view of the uneven deformation distribution over the cross section of the rod. The distortions of the restored pulse were pointed out, the dependence of errors in determining the maximum value of the duration on the non-stationary part of the initial pulse was received. The accuracy of determining the quasi-stationary value of the resistance implementation after the introduction of amendments related to the dispersion both in dry and in water-saturated soils.

© PNRPU

Введение

Изучение физико-механических характеристик грунтовых сред при динамическом нагружении ведется достаточно давно. Разработанные методики плосковолнового эксперимента позволяют определять ударную адиабату сухого и влажного грунта [1–4], характеризующую динамическую сжимаемость среды в диапазоне нагрузок до нескольких гигапаскалей. Экспериментальное определение наряду с деформационными и прочностных характеристик грунтовых сред проводится при одновременном определении компонент тензоров напряжений и деформаций как функций времени в рамках модифицированной методики Кольского [5–7], но при существенно меньших давлениях, ограниченных пределом упругости мерных стержней. Расширяет возможности динамических испытаний методика обращенного эксперимента [8, 9], позволяющая наряду с максимальным значением силы сопротивления внедрению ударников определять также и квазистационарные значения [10, 11]. В работах [12, 13] показано, что сдвиговые характеристики грунтовых сред коррелируют со значениями силы сопротивления на квазистационарной стадии внедрения, что позволяет идентифицировать прочностные (упругопластические) характеристики грунтовых сред. В данной работе проводится численный анализ применимости методики обращенного эксперимента к исследованию динамической сжимаемости и сопротивления сдвигу водонасыщенного грунта.

1. Постановка задачи

Рассматривается задача о нагружении кругового цилиндра (мерного стержня) радиусом a импульсом сжатия, приложенным к его торцу, боковая поверхность и другой торец цилиндра свободны от нормальных и касательных напряжений. Материал стержня-цилиндра характеризуется упругими постоянными: модулем Юнга E , коэффициентом Пуассона ν и плотностью ρ . Сжимаемость грунта отражается ударной адиабатой [1–3], представленной линейной зависимостью скорости ударной волны D от массовой скорости u за ее фронтом:

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

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

Сжимаемость сухого и влажного грунта описывается также моделью многокомпонентной среды [2, 3]:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{B_i} + 1 \right)^{-\frac{1}{n_i}}, \quad B_i = \frac{\rho_{i0} c_{i0}^2}{n_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – объемные концентрации свободной пористости (и заземленного воздуха), жидкости (воды), кварца; ρ_{i0} и c_{i0} , $i = 1, 2, 3$ – плотности и скорости распространения продольных волн, соответствующих в компонентах; ρ, σ – плотность и давление смеси; ρ_0, σ_0 – их начальные значения.

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad \alpha_1 \rho_{10} + \alpha_2 \rho_{20} + \alpha_3 \rho_{30} = \rho_0$$

Значения констант уравнения (2) приведены в табл. 1

Таблица 1

Параметры модели многокомпонентной грунтовой среды

Table 1

Parameters of multicomponent soil model

i	ρ_{i0} , кг/м ³	B_i , МПа	n_i	c_{i0} , м/с
1	1.3	102.5	1.4	–
2	1000	304.5	7.15	1475
3	2650	9118.7	4	3710

С использованием модели многокомпонентной среды (2) и уравнения (1) как аппроксимации в зависимости от содержания воды были получены следующие значения констант ударной адиабаты сухого, влажного и водонасыщенного грунта ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1 - \alpha_3 = 0,34$ для всех типов грунта).

Динамические процессы, протекающие в обращенном эксперименте при скоростях соударения более 200 м/с, с достаточной точностью моделируют движение ударника с постоянной скоростью в грунтовой среде [10, 11]. Ранее показано [11], что при таких скоростях удара полученные в эксперименте значения импульсов силы с погрешностью

Параметры ударной адиабаты грунтовой среды

Table 2

Shock adiabat parameters of soil

№	α_2	ρ_0 , кг/м ³	Влажность, %	A , м/с	b
1	0,010	1750	0,1	455	2,3
2	0,175	1925	10	650	3,4
3	0,330	2079	18,9	1480	4,0

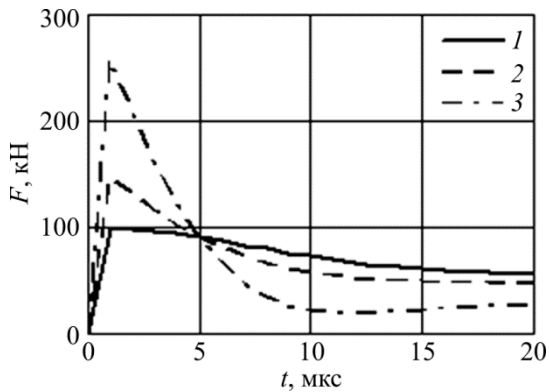


Рис. 1. Силы сопротивления внедрению цилиндрического ударника с постоянной скоростью 200 м/с в сухой (1), влажный (2) и водонасыщенный (3) песчаный грунт (получены численно)
 Fig. 1. Resistance forces by penetration of cylindrical striker with a constant velocity of 200 m/s in the dry (1), humid (2) and water saturation (3) sandy soil (obtained numerically)

менее 5 % будут соответствовать силе сопротивления внедрению жесткого ударника с постоянной скоростью в полупространство грунта. На рис. 1 кривыми 1–3 показаны полученные численно зависимости от времени силы сопротивления внедрению жесткого цилиндрического ударника, движущегося с постоянной скоростью 200 м/с, в сухом, влажном и водонасыщенном песчаном грунте соответственно. Отметим меньшую длительность нестационарной стадии импульса силы во влажном грунте по сравнению с сухим грунтом. Это является следствием того, что скорость распространения плоской волны

в грунте растет с увеличением водонасыщения, растет также и скорость волны разгрузки. Отмечается также меньший уровень силы сопротивления, соответствующий квазистационарной стадии.

2. Расчетные формулы для численных экспериментов

Процесс распространения импульсов сжатия, образующихся при ударе о торец мерного стержня контейнера с водонасыщенным и сухим песчаным грунтом далее исследуется численно. Целью исследования является анализ погрешности определения усилия, действующего на ударник, по значениям импульса деформации на поверхности мерного стержня. Источник погрешности связан с искажением формы импульса за счет дисперсии при распространении его в мерном стержне, что отмечено еще Г. Кольским [14], Р. Дейвисом [15] и другими авторами. Разработаны методики эксперимента с использованием системы разрезных стержней Гопкинсона [5, 6, 16–22], которые включают поправки на дисперсию для коррекции формы импульса, основанные на точном решении Похгаммера-Кри для бесконечного упругого цилиндра и применении прямого и обратного преобразований Фурье.

В эксперименте импульс деформаций на поверхности мерного стержня представлен в дискретном виде набором точек $e_n = e(t_n)$, $t_n = n\Delta t$, $n = \overline{0, N-1}$, где Δt – шаг дискретизации. Дискретное преобразование Фурье записывается следующим образом:

$$e_n = \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \frac{2\pi k(n + \varphi_k)}{N},$$

где C_k и φ_k , $k = 0, \dots, N/2$ – амплитуды и фазы гармоник ряда Фурье.

Влияние дисперсии учитывается [17–22] сдвигом по частоте на величину $\Delta\varphi$ в каждой гармонике:

$$\tilde{e}_n = \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \frac{2\pi k(n + \tilde{\varphi}_k)}{N},$$

$$\tilde{\varphi}_k = \varphi_k + \Delta\varphi_k, \quad \Delta\varphi_k = \omega_k z_0 \left(\frac{1}{c_0} - \frac{1}{c(\omega_k)} \right), \quad \omega_k = \frac{2\pi k(N-1)}{N\Delta t}.$$

Значения $c(\omega)$ определяются из решений дисперсионного уравнения [14], связывающего фазовую скорость $c = \frac{\omega}{s}$ и длину волны $l = \frac{2\pi}{s}$.

$$4Gs^2 \left[\frac{\partial J_1(\kappa r)}{\partial r} \right]_{r=a} \left[\frac{\partial J_0(hr)}{\partial r} \right]_{r=a} - \left\{ 2G \left[\frac{\partial^2 J_0(hr)}{\partial r^2} \right]_{r=a} - \frac{\omega^2 \rho \lambda}{\lambda + 2G} J_0(ha) \right\} \left(2s^2 - \frac{\omega^2 \rho}{G} \right) J_1(\kappa a) = 0$$

Здесь s – волновое число; $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ – параметр Ламэ; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль

сдвига; $h = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_e^2} - s^2}$; $\kappa = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_s^2} - s^2}$; $c_e = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$; $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ – скорости продольной и сдвиговой волны; J_0, J_1 – функции Бесселя.

Значения силы сопротивления рассчитываются по модифицированным формулам

$$F = E\tilde{e}_n S_0 = ES_0 \sum_{k=0}^{N/2} C_k \cos \frac{2\pi k(n + \tilde{\varphi}_k)}{N} \quad (3)$$

Известны также модификации методики восстановления импульса, основанные на точном решении Р. Дейвиса задачи о распространении продольной гармонической волны в упругом круговом цилиндре с учетом неравномерности распределения деформаций вдоль поперечного сечения [23–25]. В этом случае корректируются также коэффициенты разложения C_k .

$$F^{II} = S_0 \sum_{k=0}^{N/2} M_2 \tilde{C}_k \cos \frac{2\pi k(n + \tilde{\varphi}_k)}{N}, \quad (4)$$

$$\tilde{C}_k = M_1 C_k, \quad M_1 = \frac{2 \left(1 + \frac{1-SZ}{Z-1} \right)}{\frac{\eta a J_0(\eta a)}{J_1(\eta a)} + \frac{(1-SZ) \chi a J_0(\chi a)}{(Z-1) J_1(\chi a)}}, \quad S = \frac{1-2\nu}{1-\nu},$$

$$Z = (1+\nu) \left(\frac{c(\omega)}{c_0} \right)^2, \quad \eta = s\sqrt{SZ-1}, \quad \chi = s\sqrt{2Z-1},$$

$$M_2 = E \left(\frac{c(\omega)}{c_0} \right)^2.$$

Умножение каждой гармоники ряда на множитель M_1 преобразует деформацию на поверхности мерного стержня в среднюю по поперечному сечению деформацию, введение множителя M_2 позволяет рассчитать среднее напряжение [23].

3. Результаты численных расчетов

Для численного решения распространения упругого импульса в стержне применяется явная разностная схема Уилкинса второго порядка точности [26] с использованием процедуры консервативного сжатия [27, 28]. Параметры мерного стержня следующие: радиус $a = 0,01025$ м; модуль Юнга $E = 186$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 8050$ кг/м³; предел текучести 2 ГПа.

На рис. 2 представлены зависимости от времени деформации на поверхности мерного стержня в окрестности торца (кривая 1), на расстоянии $z_0 = 1$ м от его торца (кривая 2), кривая 3 соответствует решению, «восстановленному» по формуле (4) (см. также [23–25]).

Исходный импульс деформации, обозначенный кривой 1 на рис. 2, получен при ударном взаимодействии стержня с контейнером с водонасыщенным грунтом. Отметим более чем двукратное уменьшение амплитуды импульса 2 при распространении его на расстояние 1 м от торца, ошибка в определении амплитуды импульса 3 после коррекции составляет около 60 %. Квазистационарное значение, устанавливающееся после 20 мкс, можно определить достаточно точно.

На рис. 3 представлены аналогичные результаты, соответствующие расчету процесса взаимодействия мерного стержня с сухим песчаным грунтом (обозначения, как на рис. 2). Отметим наличие колебаний в импульсе 2, существенно уменьшившихся после корректировки по формуле (4), и практическое отсутствие ошибки как в определении максимальной амплитуды импульса, так и его квазистационарного значения.

Проанализируем распределение деформаций вдоль поперечного сечения мерного стержня. На рис. 4 в полупологарифмической шкале представлены амплитудно-частотные характеристики распространяющихся импульсов деформаций. Кривая 1 соответствует точному решению (заданному граничному условию), кривые 2, 3 представляют спектры импульсов деформаций на оси симметрии и на поверхности стержня, кривая 4 – спектр импульса после корректировки по формуле (4) соответствует среднему по сечению значению. Отмечается близость кривых 1 и 4 до значений частоты 140 кГц, после которого наблюдается расхождение кривых. Это расхождение и приводит к ошибкам в восстановлении значения силы сопротивления внедрению в водонасыщенный грунт.

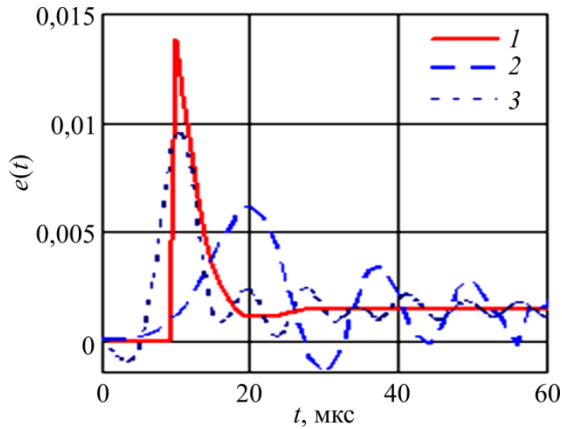


Рис. 2. Импульс деформации в мерном стержне (водонасыщенный грунт)
Fig. 2. Impulse of strain in the measuring rod (water-saturated soil)

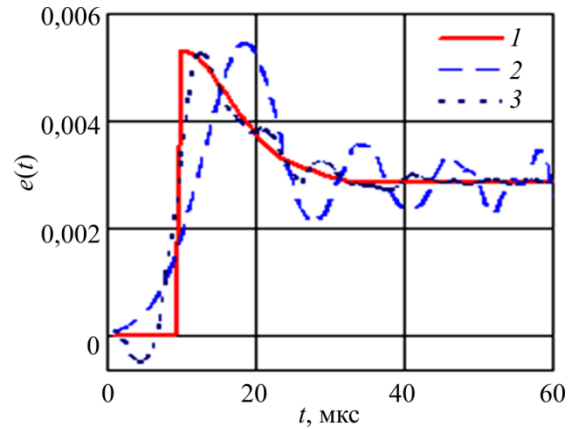


Рис. 3. Импульс деформации в мерном стержне (сухой песок)
Fig. 3. Impulse of strain in the measuring rod (dry sand)

Спектры импульсов деформаций для сухого песка показаны на рис. 5 (обозначения осей и кривых, как на рис. 4). Наблюдается качественно подобная картина с обращением в нуль амплитуды импульса продольных деформаций на оси симметрии стержня при том же значении частоты 140 кГц, однако амплитуды гармоник, соответствующих более высоким частотам более чем на два порядка меньше по величине, что не приводит к существенным ошибкам. Значение частоты 140 кГц является критическим, так как при этом значении в формулах (4) обращается в ноль знаменатель коэффициента M_1 .

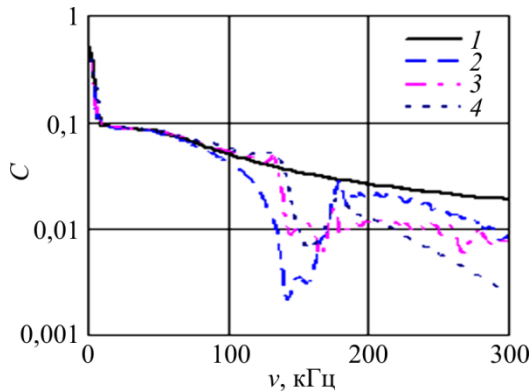


Рис. 4. Спектр импульса деформации (водонасыщенный грунт)
Fig. 4. The spectrum of strain pulse (water-saturated soil)

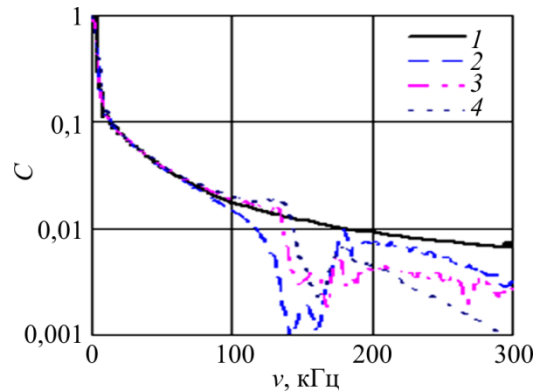


Рис. 5. Спектр импульса деформации (сухой песок)
Fig. 5. The spectrum of the strain pulse (dry sand)

На рис. 6 приведена относительная ошибка в определении максимального значения силы сопротивления внедрению в зависимости от длительности нестационарной стадии импульса на торце мерного стержня.

Кривая 1 соответствует импульсу деформаций на поверхности мерного стержня на расстоянии 1 м от торца, кривая 2 получена с поправкой на дисперсию по формуле (3), кривая 3 – с дополнительным учетом неравномерности распределения деформаций по сечению стержня по формуле (4).

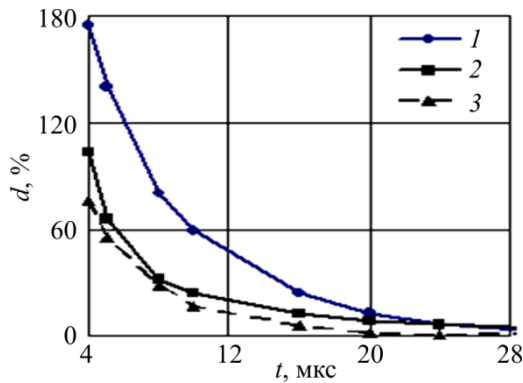


Рис. 6. Относительная ошибка в определении максимального значения силы сопротивления

Fig. 6. The relative error in the determination of the maximum value of drag force

По результатам численных расчетов получено, что длительность нестационарной стадии импульса сжатия в полностью водонасыщенном грунте не превышает 5–6 мкс, в сухом песке – около 15 мкс (см. рис. 1). Таким образом, относительная погрешность, ошибка в определении максимума силы сопротивления внедрению пропорциональна влажности и для водонасыщенного грунта составит не менее 60% (см. рис. 6).

Заключение

Полученное значение частоты 140 кГц является критическим для выбранного значения радиуса стержня $a = 0,01025$ м и коэффициента Пуассона $\nu = 0,3$. Данное значение может быть увеличено применением стержня меньшего радиуса, однако техническая реализация подобного варианта методики обращенного эксперимента может столкнуться с новыми трудностями, связанными с необходимостью достаточной представительности отношения диаметра стержня к размеру частиц песка, обеспечения устойчивости стержня и др. Еще раз заметим, что квазистационарное значение силы сопротивления внедрению после введения поправок на дисперсию определяется с приемлемой точностью, что позволяет рекомендовать данную экспериментальную методику для определения сдвиговых свойств водонасыщенных грунтов [12, 13].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10113).

Библиографический список

1. Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях // ПМТФ. – 1963. – № 1. – С. 88–96.
2. Дремин А.Н., Карпухин И.А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. – 1963. – № 3. – С. 184–188.
3. Ударная сжимаемость сухого и водонасыщенного песка / М.Д. Дианов, Н.А. Златин, С.М. Мочалов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1976. – Т. 2, вып. 12. – С. 529–532.
4. Брагов А.М., Грушевский Г.М. Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19. – Вып. 12. – С. 70–72.
5. Bacon C., Lataillade J-L. Development of the Kolsky-Hopkinson technics and applications for non-conventional testing // In New experimental methods in material dynamics and impact. Eds. Nowacki W.K. and Klepaczko J.R. – Poland: Warsaw, 2001. – P. 1–58.
6. Gary G. Some aspects of dynamic testing with wave-guides // In New experimental methods in material dynamics and impact. Eds. Nowacki W.K. and Klepaczko J.R. – Poland: Warsaw, 2001. – P. 179–222.

7. Анализ особенностей измерения динамических характеристик мягких грунтов методом Кольского / А.М. Брагов, В.Л. Котов, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев // Изв. СО РАН. ПМТФ. – 2004. – Т. 45, № 4. – С. 147–153.
8. Баландин В.В., Брагов А.М. Экспериментальная методика измерения сил сопротивления при взаимодействии ударника с грунтовой средой // ПППП. Методы решения: межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 1991. – С. 101–104.
9. Методика определения ударной адиабаты мягких грунтов по результатам обращенных экспериментов / А.М. Брагов, В.В. Баландин, А.К. Ломунов, А.Р. Филиппов // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 11. – С. 52–55.
10. Обращенный эксперимент и численный анализ осесимметричных процессов соударения твердых тел и песчаного грунта / А.М. Брагов, В.Л. Котов, А.В. Кочетков, С.В. Крылов // ПППП. Численное моделирование физико-механических процессов: межвуз. сб. – Н. Новгород, 1999. – С. 12–18.
11. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду / А.М. Брагов, В.В. Баландин, В.В. Баландин, В.Л. Котов // ЖТФ. – 2016. – Т. 86, вып. 6. – С. 62–70.
12. Баженов В.Г., Котов В.Л. Идентификация параметров динамической сжимаемости и сопротивления сдвигу грунтовой среды при внедрении ударников // ДАН. – 2006. – Т. 408, № 3. – С. 333–336.
13. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментально-теоретическое исследование процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред // ПМТФ. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 115–125.
14. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. – М.: ИЛ. 1955. – 194 с.
15. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твердых телах. – М.: ИЛ. 1961. – 104 с.
16. Hsieh D.Y., Kolsky N. An Experimental Study of Pulse Propagation in Elastic Cylinders // Proceedings of the Physical Society. – 1961. – Vol. 71. – No. 4. – P. 608–612. DOI: 10.1088/0370-1328/71/4/308.
17. Follansbee P.S., Frantz C. Wave propagation in the split Hopkinson pressure bar // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1983. – Vol. 105. – No. 1. – P. 61–66. DOI:10.1115/1.3225620.
18. Gorham D.A. A numerical method for the correction of dispersion in pressure bar signals // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1983. – Vol. 16. – P. 477–479. DOI: 10.1088/0022-3735/16/6/008.
19. Gong J.C., Malvern L.E., Jenkins D.A. Dispersion Investigation in the Split-Hopkinson Pressure Bar // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1990. – Vol. 112. – No. 3. – P. 309–314. DOI: 10.1115/1.2903329.
20. Корнев В.М. Уточнение зависимостей метода составного стержня Кольского – Гопкинсона // ПМТФ. – 1992. – № 3. – С. 127–131.
21. Юношев А.С., Сильвестров В.В. Разработка методики полимерного разрезного стержня Гопкинсона // ПМТФ. – 2001. – Т. 42, № 3. – С. 212–220.
22. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Медведкина М.В. Дисперсия волн в разрезных стержнях Гопкинсона при динамических испытаниях хрупких материалов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 6 (1). – С. 158–162.
23. Tyas A., Pope D.J. Full correction of first-mode Pochhammer–Chree dispersion effects in experimental pressure bar signals // Measurement Science & Technology. – 2005. – Vol. 16. – No. 3. – P. 642–652. DOI: 10.1088/0957-0233/16/3/004.
24. Merle R., Zhao H. On the errors associated with the use of large diameter SHPB, correction for radially non-uniform distribution of stress and particle velocity in SHPB testing // International Journal of Impact Engineering. – 2006. – Vol. 32. – No. 12. – P. 1964–1980. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.06.009.
25. Tyas A., Ozdemir Z. On backward dispersion correction of Hopkinson pressure bar signals // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2014. – Vol. 37. – No. 2. – P. 1–11. DOI: 10.1098/rsta.2013.0291.
26. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Наука. 1967. – С. 212–265.

27. Жмакин А.И., Фурсенко А.А. Об одной монотонной разностной схеме сквозного счета // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. – 1980. – Т. 20, № 4. – С. 1021–1031.

28. Баженов В.Г., Зефирова С.В., Цветкова И.Н. Численное моделирование задач нестационарного контактного взаимодействия деформируемых конструкций // ПППП. Численное моделирование физико-механических процессов: всесоюз. межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та. 1995. С. 154–160.

References

1. Lagunov V.A., Stepanov V.A. Izmerenie dinamicheskoi szhimaemosti peska pri vysokikh davleniiakh [Measurements of the dynamic compressibility of sand]. Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tehnicheskoi Fiziki – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1963, no. 1, pp. 88-96.

2. Dremin A.N., Karpukhin I.A. Metod opredeleniia udarnykh adiabat dispersnykh veshchestv [Method for determination of shock adiabats particulate matter]. Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tehnicheskoi Fiziki – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1963, no. 3, pp. 184-188.

3. Dianov M, Zlatin N, Mochalov S, Pugachev G, Rosomakho L. Shock compressibility of dry and water-saturated sand. Soviet Technical Physics Letters, 1976, no. 2, pp. 207-208.

4. Bragov A.M., Grushevskii G.M. Vliianie vlazhnosti i granulometricheskogo sostava na udarnuiu szhimaemost' peska [Influence of moisture content and particle size distribution on the shock compressibility of sand]. Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki – Technical Physics Letters, 1993, vol. 19, no. 12, pp. 70-72.

5. Bacon C., Lataillade J-L. Development of the Kolsky-Hopkinson technics and applications for non-conventional testing / In New experimental methods in material dynamics and impact. Nowacki W.K. and Klepaczko J.R. (Eds). Warsaw. Poland, 2001, pp. 1-58.

6. Gary G. Some aspects of dynamic testing with wave-guides / In New experimental methods in material dynamics and impact. Nowacki W.K. and Klepaczko J.R. (Eds). Warsaw. Poland, 2001, pp. 179-222.

7. Bragov A.M., Kotov V.L., Lomunov A.K., Sergeichev I.V. Measurement of the Dynamic Characteristics of Soft Soils Using the Kolsky Method. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2004, vol. 45, no. 4, pp. 580-585.

8. Balandin V.V., Bragov A.M. Eksperimental'naiia metodika izmereniia sil soprotivleniia pri vzaimodeistvii udarnika s gruntovoi sredoi [Experimental procedure for measuring the resistance forces in interaction of projectile with the soil medium] Prikladnye Problemy Prochnosti i Plastichnosti. Metody resheniia: Mezhvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo NNGU. 1991, pp. 101-104.

9. Bragov A.M., Balandin V.V., Lomunov A.K., Filippov A.R. Determining the Impact Compressibility of Soft Soils from Inversed Test Results. Technical Physics Letters, 2006, vol. 32, no. 6, pp. 487-488.

10. Bragov A.M., Kotov V.L., Kochetkov A.V., Krylov S.V. Obrashchennyi eksperiment i chislennyi analiz osesimmetrichnykh protsessov soudareniia tverdykh tel i peschanogo grunta [Inverse experiment and numerical analysis of axisymmetric processes collision solids and sandy soil] Prikladnye Problemy Prochnosti i Plastichnosti – Chislennoe modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov: Mezhvuz. sbornik, 1999, pp. 12-18.

11. Balandin V.I., Balandin V.I., Bragov A. M., Kotov V. L. Experimental Study of the Dynamics of Penetration of a Solid Body into a Soil Medium. Journal of Technical Physics, 2016, vol. 61, no. 6, pp. 860–868.

12. Bazhenov V.G. Kotov V.L. Determination of dynamic-compressibility parameters and of shear strength for a ground medium by the striker-penetration method. Doklady Physics, 2006, vol. 51, no. 5, pp. 279–282.

13. Bazhenov V.G., Bragov A.M., Kotov V.L. Experimental-theoretical study of the penetration of rigid projectiles and identification of soil properties. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2009, vol. 50, no. 6, pp. 1011–1019.

14. Kolsky H. Stress waves in solids. Oxford: Clarendon press. 1953.
15. Davies R.M. Stress waves in solids. Cambridge university press. 1958.
16. Hsieh D.Y., Kolsky H. An Experimental Study of Pulse Propagation in Elastic Cylinders. Proceedings of the Physical Society, 1961, vol. 71, no. 4, pp. 608-612. DOI:10.1088/0370-1328/71/4/308
17. Follansbee P.S., Frantz C. Wave propagation in the split Hopkinson pressure bar. Journal of Engineering Materials and Technology, 1983, vol. 105, no. 1, pp. 61-66. DOI:10.1115/1.3225620
18. Gorham D.A. A numerical method for the correction of dispersion in pressure bar signals. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1983, vol. 16, pp. 477-479. DOI:10.1088/0022-3735/16/6/008
19. Gong J.C., Malvern L.E., Jenkins D.A. Dispersion Investigation in the Split-Hopkinson Pressure Bar. Journal of Engineering Materials and Technology, 1990, vol. 112, no. 3, pp. 309-314. DOI: 10.1115/1.2903329
20. Kornev M. Refinement of the relations of the Kol'skii-Hopkinson compound-rod method. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1992, vol. 33, no. 3, pp. 434-437.
21. Yunoshev A.S., Sil'vestrov V.V. Development of the polymeric split Hopkinson bar technique. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2001, vol. 42, no. 3, pp 558-564.
22. Bragov A.M., Konstantinov A.Iu., Medvedkina M.V. Dispersiia voln v razreznykh sterzhniakh Gopkinsona pri dinamicheskikh ispytaniyakh khrupkikh materialov [Dispersion of waves in a split Hopkinson bars in dynamic tests of brittle materials]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2011, no. 6 (1), pp. 158-162.
23. Tyas A, Pope D.J. Full correction of first-mode Pochhammer–Chree dispersion effects in experimental pressure bar signals. Measurement Science & Technology, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 642-652. DOI: 10.1088/0957-0233/16/3/004
24. Merle R., Zhao H. On the errors associated with the use of large diameter SHPB, correction for radially non-uniform distribution of stress and particle velocity in SHPB testing. International Journal of Impact Engineering, 2006, vol. 32, no. 12, pp. 1964-1980. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2005.06.009
25. Tyas A, Ozdemir Z. On backward dispersion correction of Hopkinson pressure bar signals. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2014, vol. 37, no. 2, pp. 1-11. DOI: 10.1098/rsta.2013.0291
26. Wilkins M.L. Calculations of elastic-plastic flows. In: Methods in Computational Physics.V.3. Advances in Research and Applications. Editors: Alder B., Fernbach S., Rotenberg M.. Academic Press, London, 1964, pp. 212-265.
27. Zhmakin A.I., Fursenko A.A. On a monotonic shock-capturing difference scheme. USSR Comput. Maths. Math. Phys., 1980, vol. 20, no. 4, pp. 218-227. DOI: 10.1016/0041-5553(80)90283-9
28. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Tsvetkova I.N. Chislennoe modelirovanie zadach nestatsionarnogo kontaktnogo vzaimodeistviia deformiruemyykh konstruksii [Numerical simulation of non-stationary problems of contact interaction of deformable structures]. Prikladnye Problemy Prochnosti I Plastichnosti: Chislennoe modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov. Vsesoiuz. mezhvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo NNGU. 1995, pp. 154-160.