УДК 624.131

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-101-107

© В. В. Антипов, аспирант

© V. V. Antipov, post-graduate student

© В. Г. Офrikхтер, д-р техн. наук, доцент

© V. G. Ofrikhter, Dr. Sci. Tech., Associate Professor

© Н. Н. Лихачева, канд. физ.-мат. наук, доцент
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия)
E-mail: seekerva@mail.ru, ofrikhter@mail.ru

© N. N. Likhacheva, PhD in Sci. Phys.-Math., Associate Professor
(Perm National Research
Polytechnic University, Perm, Russia)
E-mail: seekerva@mail.ru, ofrikhter@mail.ru

ОПЕРАТИВНОЕ ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЬНОЙ КРИВОЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ВОЛНОВОГО АНАЛИЗА

EXPRESS PLOTTING OF MODEL DEFORMATION CURVE BASED ON WAVE ANALYSIS DATA

Современный неразрушающий метод многоканального анализа поверхностных волн адаптирован для оперативной оценки физико-механических параметров дисперсных грунтов при предварительном геотехническом изучении ситуации площадки. Предлагается методика оперативного построения модельной кривой деформирования дисперсного грунта по данным волнового анализа, что позволит быстро и недорого оценивать допустимые интервалы нагрузки и деформации при этих нагрузках при предварительной геотехнической оценке оснований. Построенная кривая деформирования будет полезна при получении исходных данных для численного моделирования взаимодействия основания и сооружения для моделей упрочняющегося грунта и упрочняющегося грунта с малыми деформациями.

Ключевые слова: модуль деформации, упругий модуль деформации, кривая деформирования, испытания на трехосное сжатие, испытания штампами, гиперболическая модель, экспоненциальная модель, метод скоростных уравнений первого порядка, многоканальный анализ поверхностных волн.

The paper presents the study results of the currently used nondestructive technique of multichannel analysis of surface waves which is adapted for express assessment of physical and mechanical parameters of dispersive soils during preliminary geotechnical investigation of the construction site. The authors propose a methodology for express plotting of model deformation curve of dispersive soil based on the wave analysis data, which will allow a rapid and non-expensive estimation of allowable load intervals and deformations under these loads with preliminary geotechnical assessment of foundation bases. The plotted deformation curve will be useful for obtaining initial data for numerical modeling of interaction of foundation base with the structure designed for the model of hardening soil and the model of hardening soil at small strains.

Keywords: deformation modulus, elastic deformation modulus, deformation curve, triaxial compression tests, plate load tests, hyperbolic model, exponential model, first-order rate equations, multichannel analysis of surface waves.

Исходные данные для геотехнических расчетов предоставляются преимущественно на основе результатов испытаний традиционными разрушающими методами, применение которых на этапе оперативных предварительных геотехнических прогнозов приводит к значительным экономическим, временным и трудовым затратам. Возникает потребность в развитии и использо-

вании современных недорогих оперативных неразрушающих методов, среди которых выделяется метод многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ) [1–4]. Он основан на анализе распространения упругих поверхностных волн рэлеевского типа в грунтовом массиве. Этот метод позволяет в короткие сроки получить послойный волновой профиль разреза и оценить

физико-механические характеристики грунтов для предварительных геотехнических расчетов. Задача разработки практических неразрушающих методов оперативной оценки физико-механических характеристик грунтов является актуальной.

В работе предлагается методика оперативного построения кривой деформирования дисперсного грунта после оценки модуля деформации по результатам МАПВ [1–4] по предложенной ранее в [3] методике, что позволит быстро и недорого оценивать допустимые интервалы нагрузки и деформации от этих нагрузок при предварительной геотехнической оценке оснований. Построенная кривая деформирования будет полезна при получении исходных данных для численного моделирования взаимодействия основания и сооружения для моделей упрочняющегося грунта (hardening soil, HS) и упрочняющегося грунта с малыми деформациями (hardening soil small strain, HSSS).

Кривые деформирования грунта $\sigma_{\text{дев}} = f(\varepsilon_1)$, полученные по результатам лабораторных испытаний грунтов на трехосное сжатие, часто аппроксимируют с помощью степенной (1) или гиперболической (2) моделей.

$$\sigma_{\text{дев}} = A\varepsilon_1^a; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{дев}} = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{E_{\text{упр}}} + \frac{1}{\sigma_{\text{дев.пр}}} \varepsilon_1}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{дев}} = (\sigma_1 - \sigma_3)$ — девиаторное напряжение, МПа; A — коэффициент деформирования, МПа; a — коэффициент упрочнения; ε_1 — относительная вертикальная деформация образца, доли ед.; $E_{\text{упр}}$ — упругий модуль деформации (начальный максимальный модуль деформации по первичной ветви нагружения до относительной деформации 10^{-3} [5]), МПа; $\sigma_{\text{дев.пр}}$ — предельное девиаторное напряжение, МПа.

Среди других моделей аппроксимации обращает на себя внимание экспоненциальная модель, которую можно получить с помощью метода скоростных уравнений первого порядка [8]. Этот метод можно применять для описания механических процессов в геотехнике, как было показано в работе [8] на примере компрессионной кривой. Метод основан на допущении, что скорость приближения к конечному состоянию

прямо пропорциональна расстоянию до этого состояния:

$$-\frac{dD}{dt} = m_1 D, \quad (3)$$

где D — расстояние до точки конечного состояния; $-dD/dt$ — скорость процесса, знак «минус» свидетельствует о замедлении процесса при его приближении к конечному состоянию; t — время либо другая независимая переменная; m_1 — скоростной коэффициент пропорциональности первого порядка.

Примем за независимую переменную относительную вертикальную деформацию ε_1 . Используем метод скоростных уравнений первого порядка для описания уменьшения скорости изменения касательного модуля деформации $E_{\text{тан}}$ при увеличении относительной вертикальной деформации ε_1 при приближении к конечному состоянию $E_{\text{тан}} = 0$ (рис. 1):

$$-\frac{dE_{\text{тан}}}{d\varepsilon_1} = m_1 E_{\text{тан}}. \quad (4)$$

Решением дифференциального уравнения (4) при начальном условии $E_{\text{тан}} = E_{\text{упр}}$ при $\varepsilon_1 = 0$ будет зависимость

$$E_{\text{тан}} = E_{\text{упр}} \exp(-m_1 \varepsilon_1), \quad (5)$$

где $E_{\text{упр}}$ — упругий модуль деформации, МПа; $\exp$ — основание натурального логарифма.

Интегрируем уравнение (5) по $d\varepsilon_1$ и после нахождения константы интегрирования при начальном условии $\sigma_{\text{дев}} = 0$ при $\varepsilon_1 = 0$ получаем уравнение аппроксимации для кривой деформирования $\sigma_{\text{дев}} = f(\varepsilon_1)$:

$$\sigma_{\text{дев}} = \sigma_{\text{дев.пр}} (1 - \exp(-m_1 \varepsilon_1)), \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{дев.пр}} = E_{\text{упр}} / m_1$ — предельное девиаторное напряжение.

Физический смысл скоростного коэффициента m_1 можно определить, подставив в уравнения (5) и (6) деформацию $\varepsilon_1 = 1 / m_1$:

$$E_{\text{тан}} = E_{\text{упр}} \exp(-1) = 0,368 E_{\text{упр}}; \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{дев}} = \sigma_{\text{дев.пр}} (1 - \exp(-1)) = 0,632 \sigma_{\text{дев.пр}}; \quad (8)$$

$$E = \frac{\sigma_{\text{дев}}}{\varepsilon_1} = \frac{0,632 \sigma_{\text{дев.пр}}}{\frac{1}{m_1}} = 0,632 E_{\text{упр}}, \quad (9)$$

где E — модуль деформации (секущий), МПа.

Тогда на основе полученных равенств (7)–(9) можно сделать вывод: m_1 — скоростной коэффициент пропорциональности, обратная величина которого $1 / m_1$ будет равна относительной вер-

Рис. 1. К применению метода скоростных уравнений первого порядка: а — экспоненциальный закон изменения касательного модуля деформации от изменения относительной деформации; б — кривая деформирования

тикальной деформации, при которой достигается 63,2 % от максимальной прочности, модуль деформации составляет 63,2 % от упругого модуля деформации, а касательный модуль составляет 36,8 % от упругого модуля деформации (рис. 2).

Для выбора используемой для оперативного построения предполагаемой модели кривой деформирования выполнялась аппроксимация имеющихся данных трехосных испытаний для семи различных грунтов нарушенной и ненарушенной структуры с использованием трех моделей: степенной (1), гиперболической (2) и экспоненциальной (6). Подбор параметров осуществлялся автоматически по уравнению заданной модели с помощью программного комплекса STATISTICA. Все модели обеспечили достаточно высокую степень аппроксимации данных испытаний с наименьшими коэффициентами детерминации R^2 , равными: 0,897 — степенная модель;

0,915 — гиперболическая модель; 0,948 — экспоненциальная модель. В связи с отсутствием очевидной связи упругого модуля деформации и предельного девиаторного напряжения с коэффициентами аппроксимации, принято решение отказаться от степенной модели (1). В итоге для оперативного построения модельной кривой деформирования используются гиперболическая (2) и экспоненциальная (6) модели.

Выбранные модели требуют в качестве входных параметров упругий модуль деформации $E_{упр}$ и предельное девиаторное напряжение $\sigma_{дев.пр}$ (см. рис. 2).

Штамповый модуль деформации $E_{шт}$ согласно [5] ожидаемо будет меньше упругого модуля деформации $E_{упр}$ по ветви первичного нагружения. Если задать штамповый модуль деформации $E_{шт}$ как некоторую долю r от упругого модуля дефор-

Рис. 2. Смысл скоростного коэффициента пропорциональности m_1

мации $E_{\text{упр}}$ (т. е. $r = E_{\text{шт}} / E_{\text{упр}}$), то упругий модуль деформации будет удовлетворять равенству

$$E_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{шт}}}{r}. \quad (10)$$

Штамповый модуль деформации можно оценить по результатам МАПВ по предложенной ранее в [2, 3] зависимости (11) с использованием переходного коэффициента k_G :

$$E = k_G G_0; \quad (11)$$

$$k_G = -0,005286\gamma^3 + 0,314254\gamma^2 - 6,248539\gamma + 41,723895, \quad (12)$$

где E — модуль деформации, сопоставимый с модулем деформации $E_{\text{шт}}$ по результатам испытаний штампом площадью 5000 см² по ГОСТ 20276–2012, МПа; G_0 — начальный модуль сдвига, МПа, оцениваемый по результатам МАПВ [1–3, 9]; γ — удельный вес грунта, кН/м³, можно также оценить по результатам МАПВ [9–11].

Данные об исследовании отношения r в отечественной литературе не найдены, поэтому этот вопрос требует дополнительных исследований. Однако предварительно величину r можно оценить на основе имеющихся данных штамповых испытаний по результатам предыдущих исследований штампами [1], откуда взяты значения модуля деформации согласно ГОСТ 20276–2012. Через две первые точки графиков «нагрузка — осадка» из [1] определены, с использованием стандартной формулы из ГОСТ 20276–2012 для модуля деформации, значения максимального касательного модуля деформации, которые совпадают со значениями упругого модуля деформации по ветви первичного нагружения согласно [5]. По результатам этой оценки был сделан вывод о том, что параметр r лежит в интервале 0,59–0,86 и в большинстве случаев близок к 0,65. Поэтому предварительно для дальнейшего анализа принималось $r = 0,65$.

Второй параметр для построения кривой деформирования (предельное девиаторное напряжение $\sigma_{\text{дев.пр}}$, кПа) может быть найден по формуле, используемой в гиперболических моделях HS и HSS¹:

$$\sigma_{\text{дев.пр}} = \frac{1}{R_f} (c \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (13)$$

где R_f — критерий разрушения, введен в модель HS, так как предельное напряжение в гиперболической модели является асимптотой к кривой деформирования; назначается в пределах 0,75–1 и зачастую принимается равным 0,9; c — удельное сцепление, кПа; φ — угол внутреннего трения, град; σ_3 — боковое давление, кПа, может быть найдено по волновому разрезу из МАПВ:

$$\sigma_3 = K_0 \sigma_1 = K_0 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i, \quad (14)$$

где σ_1 — вертикальное давление, принятое равным бытовому давлению грунта, оцениваемому по волновому разрезу; n — количество слоев грунтового массива над точкой на исследуемой глубине; h_i — высота i -го грунтового слоя, м; γ_i — удельный вес i -го грунтового слоя, кН/м³, может быть оценен по результатам МАПВ [9]; K_0 — коэффициент бокового давления грунта, может быть рассчитан по формуле²

$$K_0 = 1 - \sin \varphi, \quad (15)$$

где φ — угол внутреннего трения, град, который можно оценить по результатам волнового анализа по формуле (16).

Удельное сцепление c и угол внутреннего трения φ можно оценить по результатам МАПВ по нескольким корреляционным зависимостям для объемных волн из методических рекомендаций [12]. На основе двух зависимостей с наибольшими коэффициентами корреляции R в настоящей статье предлагаются формулы для оценки угла внутреннего трения, град, и удельного сцепления, МПа, с использованием скорости поверхностной волны:

$$\varphi = 45,6 - 7,59225 \frac{V_p}{V_R}, \quad 11 \leq \varphi \leq 35; \quad (16)$$

$$c = 5,263 \cdot 10^{-10} \rho V_R^2 - 0,008, \quad 0,010 \leq A \leq 0,147, \quad (17)$$

где ρ — плотность грунта, рассчитывается по величине удельного веса, кг/м³; V_R — скорость поверхностной волны, м/с, по результатам МАПВ; V_p — скорость продольной волны, м/с, определяется по данным полевых испытаний корреляционным методом преломленных волн (КМПВ), выполняемых параллельно с МАПВ на той же расстановке сейсмоприемников, или рассчитывается по скорости поверхностной волны и задаваемому динамическому коэффициенту Пуассона $\nu_{\text{дин}}$ по формуле

² Ibid.

¹ PLAXIS Material Models Manual 2019 / R. B. J. Brinkgreve (ed.) et al. 256 p. URL: https://www.plaxis.com/?plaxis_download=2D-3-Material-Models.pdf (Reference date 01.06.2019).

$$V_p = 1,04712 V_R \sqrt{\frac{2(1-\nu_{\text{дин}})}{1-2\nu_{\text{дин}}}}, \quad (18)$$

где $\nu_{\text{дин}}$ — заданный динамический коэффициент Пуассона (Приложение Г к СП 23.13330.2018).

Корреляционные зависимости (16) и (17), предложенные в настоящей статье, основаны на рекомендациях, предназначенных для песчано-глинистых грунтов естественной влажности и территориально относящихся к Уралу и Западной Сибири.

Далее выбирается предполагаемая модель кривой деформирования $\sigma_{\text{дев}} = f(\epsilon_1)$ — гиперболическая или экспоненциальная. Выполняется ее графическое построение по зависимостям (2) или (6) соответственно, с использованием упругого модуля деформации, который находим по формуле (10), и предельного девиаторного напряжения — по формуле (13).

На построенной модельной кривой деформирования можно отметить точку линейной аппроксимации модулем деформации, сопоставимым с результатами испытаний штампом $E_{\text{шт}}$ (далее — штамповый модуль деформации), так как согласно [13] и wolframalpha.com значения модуля деформации из трехосных испытаний близки к значениям штампового модуля деформации $E_{\text{шт}}$. Напряжение для штампового модуля деформации (рис. 3) может быть рассчитано по формуле

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{шт}} &= E_{\text{шт}} \epsilon_1 = E_{\text{шт}} x \frac{1}{m_1} = \\ &= \frac{E_{\text{шт}}}{E_{\text{упр}}} E \sigma_{\text{дев.пр}} = r x \sigma_{\text{дев.пр}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где r — отношение штампового и упругого модулей деформации; x — параметр, вычисляемый по формулам (20) и (21) для экспоненциальной и гиперболической моделей соответственно; $\sigma_{\text{дев.пр}}$ — предельное девиаторное напряжение, МПа.

$$x = \frac{r W \left(-\frac{\exp(-1/r)}{r} \right) + 1}{r}; \quad (20)$$

$$x = \frac{1-r}{r}, \quad (21)$$

где $W(f(r))$ — W -функция Ламберта, являющаяся обратной функцией к функции $f(r) = r \exp(r)$ (решение (20) получено с помощью автоматизированного веб-приложения³).

Для экспоненциальной модели при предварительно принятом $r = 0,65$ корень $x = 0,934$, а для гиперболической модели при предварительно принятом $r = 0,65$ корень $x = 0,538$.

Предложенная методика была использована для получения исходных данных для численного моделирования в программном комплексе Plaxis 2D испытаний штампом площадью 5000 см² грунтов в природном залегании. Моделирование выполнялось с использованием известной модели упрочняющегося грунта с малыми деформациями (Hardening Soil Small Strain Model). Сравнение модулей деформации по результатам полевых испытаний штампами [2, 3], оценки по формуле (11) и численных экспериментов с применением модельной кривой деформирования представлено в таблице.

³ URL: <https://www.wolframalpha.com/> (Reference date 16.10.2019).

Рис. 3. Нахождение точки штампового модуля деформации на модельной кривой деформирования

**Сравнение модулей деформации
по результатам полевых испытаний
штампами, оценки и численных
экспериментов с применением модельной
кривой деформирования**

Тип грунта (полевые испытания)	E , МПа, полевой [2, 3]	$E_{расч}$, МПа, по (11)	$E_{числ}$, МПа
Насыпь песчаная	26,4	15,5	14,9
Глина	6,1	4,5	2,0
Супесь	9,5	9,3	8,5
Суглинок	4,8	5,4	4,0
Песок	17,3	15,1	10,6

Примечание. E — полевой модуль деформации для штампа 5000 см²; $E_{расч}$ — оцененный модуль деформации для штампа 5000 см²; $E_{числ}$ — модуль деформации для штампа 5000 см² по результатам численных испытаний штампом с применением модельной кривой деформирования.

Полученные в результате численного моделирования с применением модельной кривой деформирования модули деформации (см. таблицу) не превышают реальных полевых значений [2, 3]. Результаты численного моделирования совместно с результатами трехосных испытаний подробно изложены в [15].

Заключение

Область применения предложенной методики построения модельной кривой деформирования по результатам МАПВ: для нормально уплотненных дисперсных грунтов любой влажности ненарушенной структуры с удельным весом от 16,0 до 20,8 кН/м³ на глубине до 5 м, расположенных на территориях Урала и Западной Сибири. Построенная кривая деформирования применима в пределах действия принципа линейной деформируемости при давлениях до 500 кПа.

Используя предлагаемую методику, можно по результатам волнового анализа зоны малых скоростей верхней части разреза оперативно построить модельную кривую деформирования по выбранной модели, сопоставимую с результатами трехосных испытаний с отмеченной на кривой точкой линейной аппроксимации штамповым модулем деформации. Построенная кривая может быть использована для численного моделирования взаимодействия основания и сооружения с использованием моделей упрочняющегося грунта (НС) и упрочняющегося грун-

та с малыми деформациями (HSSS). Дальнейшие исследования планируется направить на уточнение корреляционных зависимостей для оценки прочностных параметров грунтов по результатам волнового анализа.

Условные обозначения:

G_0 — начальный модуль сдвига при малых деформациях (менее 10^{-6});

$E_{упр}$ — упругий модуль деформации по ветви первичного нагружения (до деформации менее 10^{-3});

E — модуль деформации;

E_{tan} — касательный модуль деформации;

$E_{шт}$ — модуль деформации по результатам полевых испытаний штампом;

$\nu_{дин}$ — динамический (упругий) коэффициент Пуассона;

k_G — переходный коэффициент от начального модуля сдвига G_0 к модулю деформации E ;

r — коэффициент отношения штампового модуля деформации $E_{шт}$ к упругому модулю деформации $E_{упр}$.

Библиографический список

1. Антипов В. В., Оффрихтер В. Г. Развитие неразрушающих методов предварительной геотехнической оценки грунтовых оснований // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, № 12. С. 1448–1473.
2. Антипов В. В., Оффрихтер В. Г. Оперативная оценка напластования и удельного веса грунтов волновым методом // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10, № 1. С. 38–48.
3. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Field estimation of deformation modulus of the soils by multichannel analysis of surface waves // Data in Brief. 2019. Vol. 24. P. 103974.
4. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel Analysis of Surface Waves // Geophysics. Tulsa, 1999. Vol. 64. No. 3. Pp. 800–808.
5. Болдырев Г. Г., Мельников А. В., Новичков Г. А. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. 2014. № 5–6. С. 86–93.
6. Kondner R. L. Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. 1963. Vol. 89, Issue 1. Pp. 115–144.
7. Duncan J. M., Chang C. Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1970. Vol. 96, Issue 5. Pp. 1629–1653.
8. Handy R. L. First-Order Rate Equations in Geotechnical Engineering // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002. Vol. 128, Issue 5. Pp. 416–425.
9. Пат. 2704074 Российская Федерация, МПК E02D 1/00. Способ оценки модуля деформации грунта / В. Г. Оффрихтер, В. В. Антипов; Пермский национальный исследовательский политехнический университет. № 2019103754; заявл. 11.02.2019; опубл. 23.10.2019.

10. Mayne P. W. Stress-Strain-Strength-Flow Parameters from Enhanced In-Situ Tests & Case Histories // Proc. of the International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, May 21–24, 2001. Bali: Parahyangan Catholic University, 2001. Pp. 27–48.

11. Moon S. W., Ku T. Empirical Estimation of Soil Unit Weight and Undrained Shear Strength from Shear Wave Velocity Measurements // Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016, Gold Coast, Australia, Sep. 5–9, 2016. Gold Coast: Australian Geomechanics Society, 2016. Vol. 2. Pp. 1247–1252.

12. Аникин О. П., Горшенев Ю. В. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. М.: ЦНИИС, 1985. 65 с.

13. Болдырев Г. Г., Новичков Г. А. Опыт определения модуля деформации грунтов в полевых и лабораторных условиях. Пенза: [б. и.], 2008. 13 с. URL: <http://npp-geotek.com/f/opytispytaniygruntovshtampami.pdf> (дата обращения: 16.10.2013).

14. Медков Е. И. Практическое руководство к исследованию механических свойств грунтов с применением стабилометров типа М-2. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 182 с.

15. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Transition factor between elastic and deformation moduli for dispersive soils // Magazine of Civil Engineering. No. 07(99). (Принято к публикации.)

References

1. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. *Razvitie nerazrushayushchikh metodov predvaritel'noy geotekhnicheskoy otsenki gruntovykh osnovaniy* [Development of non-destructive methods of preliminary geotechnical assessment of ground bases]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2018, vol. 13, no. 12, pp. 1448–1473.

2. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. *Operativnaya otsenka naplastovaniya i udel'nogo vesa gruntov volnovym metodom* [Operational assessment of stratification and soil bulk density by flooding method]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of PNIPU. Construction and architecture*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 38–48.

3. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Field estimation of deformation modulus of the soils by multichannel analysis of surface waves. *Data in Brief*, 2019, vol. 24, p. 103974.

4. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel Analysis of Surface Waves. *Geophysics*, Tulsa, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 800–808.

5. Boldyrev G. G., Mel'nikov A. V., Novichkov G. A. *Interpretatsiya rezul'tatov laboratornykh ispytaniy s tsel'yu opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik gruntov* [Interpretation of the results of laboratory tests to determine

the deformation characteristics of soils]. *Inzhenernye izyskaniya – Engineering research*, 2014, no. 5–6, pp. 86–93.

6. Kondner R. L. Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 1963, vol. 89, iss. 1, pp. 115–144.

7. Duncan J. M., Chang C. Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, vol. 96, iss. 5, pp. 1629–1653.

8. Handy R. L. First-Order Rate Equations in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, vol. 128, iss. 5, pp. 416–425.

9. Ofrikhter V. V., Antipov V. V. *Sposob otsenki modulya deformatsii grunta* [Method of assessing the soil deformation modulus]. Perm, Permskiy natsional'niy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet Publ. Patent RF no. 2704074, 2019.

10. Mayne P. W. *Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests & case histories*. Proc. of the International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, May 21–24, 2001. Bali: Parahyangan Catholic University Publ., 2001, pp. 27–48.

11. Moon S. W., Ku T. *Empirical estimation of soil unit weight and undrained shear strength from shear wave velocity measurements*. Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016, Gold Coast, Australia, Sep. 5–9, 2016. Gold Coast, Australian Geomechanics Society Publ., 2016, vol. 2, pp. 1247–1252.

12. Anikin O. P., Gorshenin Yu. V. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu sostava, sostoyaniya i svoystv gruntov seysmoakusticheskimi metodami* [Methodological recommendations for determining the composition, condition and properties of soils by seismic-acoustic methods]. Moscow, TsNIIS Publ., 1985, 65 p.

13. Boldyrev G. G., Novichkov G. A. *Opyt opredeleniya modulya deformatsii gruntov v polevykh i laboratornykh usloviyakh* [Experience in determining the modulus of soil deformation in field and laboratory conditions]. Penza, 2008, 13 p. Available at: <http://npp-geotek.com/f/opytispytaniygruntovshtampami.pdf> (accessed: 16.10.2013).

14. Medkov E. I. *Prakticheskoe rukovodstvo k issledovaniyu mekhanicheskikh svoystv gruntov s primeneniem stabilometrov tipa M-2* [Practical guide to the study of mechanical properties of soils with the use of triaxial apparatuses of M-2 type]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1959, 182 p.

15. Antipov V. V., Ofrikhter V. G. Transition factor between elastic and deformation moduli for dispersive soils. *Magazine of Civil Engineering*, no. 07(99). (Accepted for publication).