

ПРИМЕНЕНИЕ КРИВЫХ ВТОРОГО ПОРЯДКА ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

APPLICATION OF SECOND-ORDER CURVES FOR CALCULATION OF INDICATORS OF SOIL DEFORMATION PROPERTIES ACCORDING TO THE DATA OF COMPRESSION TESTS BY THE STRESS RELAXATION METHOD

БУДАНОВА Т.Е.

Главный инженер АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ», г. Москва, budan2000@mail.ru

ОЗМИДОВ О.Р.

Президент АО «МОСТДОРГЕОТРЕСТ», к.г.-м.н., д.ф.-м.н., академик РАН, г. Москва, ozmidov@mail.ru

BUDANOVA T.E.

Chief engineer of the «MostDorGeoTrest» Geotechnical Laboratory, Moscow, budan200@mail.ru

OZMIDOV O.R.

President of the «MostDorGeoTrest» LLC, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), DSc (doctor of science in Physics and Mathematics), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, ozmidov@mail.ru

Ключевые слова:

одометрический модуль деформации; метод релаксации напряжений; аппроксимация компрессионной кривой.

Key words:

oedometer deformation modulus; stress relaxation method; compression curve approximation.

Аннотация

В статье предлагается проводить аппроксимацию данных, полученных при компрессионных испытаниях методом релаксации напряжений, полиномиальной функцией зависимости вертикального давления от относительной деформации. Это позволяет автоматизировать численную обработку результатов испытаний, сопоставлять данные компрессионных испытаний, проведенных разными методами, а также получать секущие модули деформации в любом диапазоне вертикальных давлений.

Деформационные свойства грунтов чаще всего характеризуются модулем деформации. Одометрический модуль деформации E_{oed} — очень важный показатель, который позволяет просчитать осадку сооружения как на этапе строительства, так и при его последующей эксплуатации.

Наиболее часто для определения модуля деформации используются компрессионные испытания, которые проводятся в лаборатории на образцах ненарушенной структуры, помещенных в специальную обойму (одометр), к которым с помощью специального силового устройства прикладывается вертикальная нагрузка. Нахождение зависимости относительной осадки образца от приложенной к нему вертикальной нагрузки и является основной целью проведения подобных испытаний.

В «классическом варианте» компрессионных испытаний вертикальная нагрузка прикладывается к образцу пошагово. Каждая ступень нагрузки выдерживается до стабилизации осадки. За критерий стабилизации принимается не превышение значения осадки образца под нагрузкой за определенное время. Этот критерий имеет разные значения в зависимости от вида грунта, его пористости и показателя текучести [1]. Фактически скорость изменений осадки во времени под действием нагрузки зависит от скорости протекания процессов консолидации в данном конкретном образце. И если консолидация в песках происходит практически мгновенно, то в глинах эти процессы могут протекать очень долгое время, что и определяет длительность компрессионных испытаний.

Существует ряд альтернативных методов определения деформационных свойств грунтов, которые позволяют получить модуль деформации E_{oed} за более короткий промежуток времени. Это и метод релаксации напряжений, и метод нагружения с постоянной скоростью, и ряд других [2–4].

Abstract

The authors of the article propose to carry out approximation of compression test data obtained by the stress relaxation method using a polynomial function of the «vertical pressure — deformation» dependence. It permits to automatize numerical processing of the test results, compare data of compression tests carried out by various methods and obtain «secant» deformation moduli in any range of vertical pressures.

Метод релаксации напряжений, разработанный А.Н. Труфановым, все чаще внедряется в практику в лабораториях, проводящих испытания образцов грунта для инженерных изысканий. Суть метода релаксации напряжений [5] заключается в том, что образец грунта нагружают таким образом, чтобы его осадка была равна некоторому предписанному методикой значению, зависящему от вида, пористости и показателя текучести грунта. В процессе испытаний ведется наблюдение за изменениями вертикальной нагрузки (за релаксацией напряжений). Как только изменения вертикальной нагрузки перестают превышать заданный методикой критерий, фиксируют стабилизированное значение нагрузки и нагружают образец снова. По результатам испытаний строят зависимость стабилизированной на каждом шаге нагрузки от осадки.

Анализ результатов испытаний, проведенных методом релаксации напряжений (МРН) в полностью автоматическом режиме, несколько сложнее, чем при обычных компрессионных испытаниях. График зависимости осадки от нагрузки, полученный методом релаксации напряжений, представляет собой достаточно сложную кривую (рис. 1), определение по которой корректных численных значений модулей деформации становится непростой задачей.

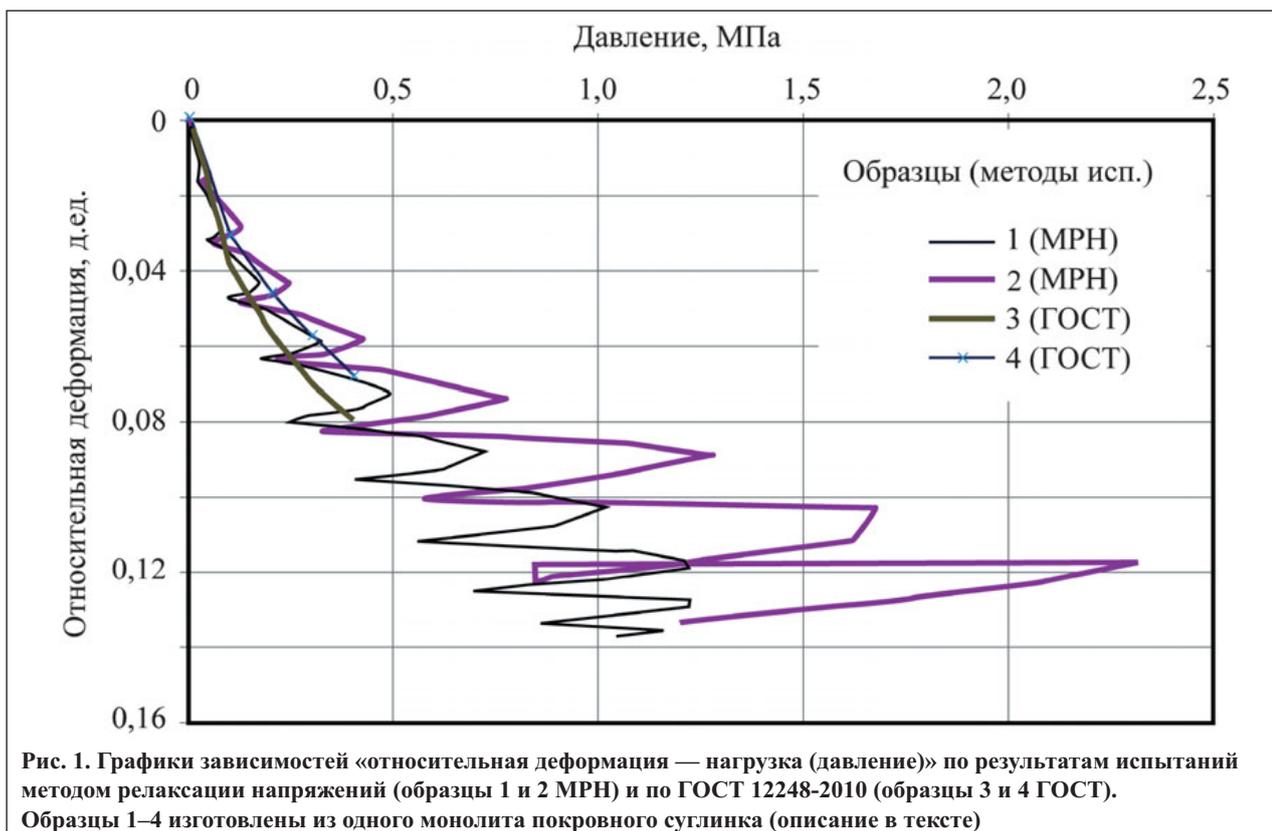
На графиках зависимостей относительной деформации ϵ от давления P (см. рис. 1) показаны результаты компрессионных испытаний четырех образцов, изготовленных из одного монолита покровного суглинка (с плотностью $\rho = 2,02$ г/см³, влажностью $W = 21,2\%$, числом пластичности $I_p = 9,0\%$ и показателем текучести $I_l = 0,22$). Испытания методом релаксации напряжений проводились в течение одного рабочего дня на силовой установке производства компании GIESA (Германия), входящей в состав трехосного прибора

и одометра той же фирмы. По ГОСТ 12248-2010 испытания проводились в течение пяти рабочих дней.

Расчет одометрического модуля деформации E_{oed} в заданном диапазоне давлений по ГОСТ 12248-2010 предполагает определение отношения между приращением давления на каждом шаге и приращением относительной осадки на этой ступени. Для расчета модулей деформации по результатам использования метода релаксации напряжений из множества точек, показанных на рис. 1, необходимо найти минимальные значения давления, соответствующие осадке на данном этапе. На основании этих точек можно, как рекомендовано стандартом, рассчитать модули деформации. Однако, чтобы сопоставить модули, полученные при обычных компрессионных испытаниях и при использовании МРН, необходимо получить их значения в одном и том же диапазоне вертикальных давлений.

Чаще всего в паспортах испытаний указывают модули деформации в диапазонах 0–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,20 МПа и т.д. (если иное не предусмотрено заданием) и таким образом отражают модули деформации во всем диапазоне давлений. Такое оформление — не столько требование нормативных документов, сколько сложившаяся практика. Для расчетов же необходимо знать расчетный модуль деформации в тех диапазонах давлений, которые имеют место в каждом отдельном случае.

Поэтому задачей было определение модулей деформации в диапазонах давлений, которые имеют место при обычных компрессионных испытаниях по имеющимся точкам, полученным с помощью МРН. Для этого необходимо было построить гладкую компрессионную кривую и с получившегося графика снять точки, соответствующие давлению в заданных диапазонах.



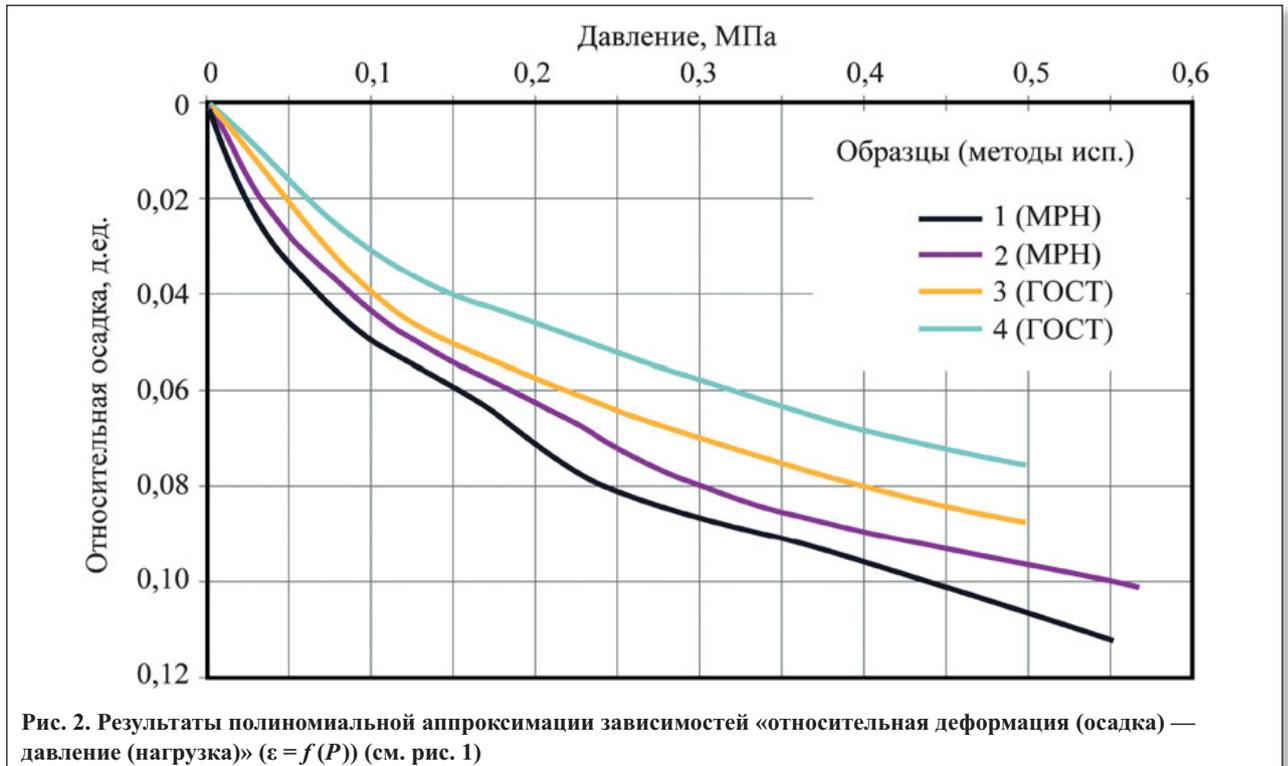
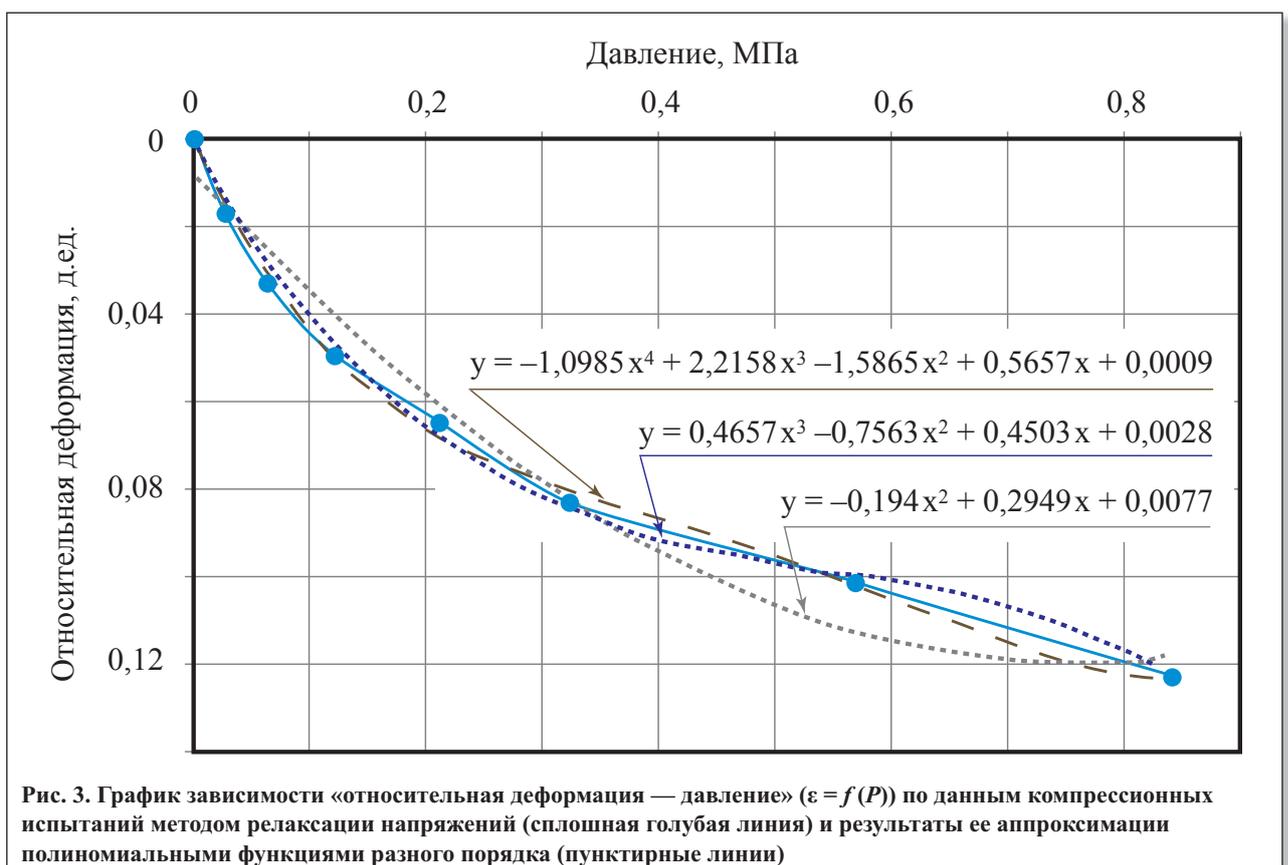


График зависимости $\varepsilon = f(P)$ в соответствии с приложением Л ГОСТ 12248-2010 [1] представляет собой гладкую кривую, форма которой нормативной литературой не регламентируется. Разные авторы аппроксимируют ее разными зависимостями [6, 7]. Наиболее простым способом нахождения гладкой кривой является использование метода полиномиальной аппроксимации (рис. 2, табл. 1). Аппроксимирующая кривая должна быть функцией многочлена выше 4-го по-

рядка. График, построенный по результатам испытаний МРН, всегда располагается ниже компрессионного.

Если с помощью получившейся функции вычислить относительную деформацию, соответствующую вертикальному давлению, скажем 0,1 МПа, она будет достаточно существенно отличаться от относительной деформации, полученной в результате обычных компрессионных испытаний, что очевидно из рис. 2.



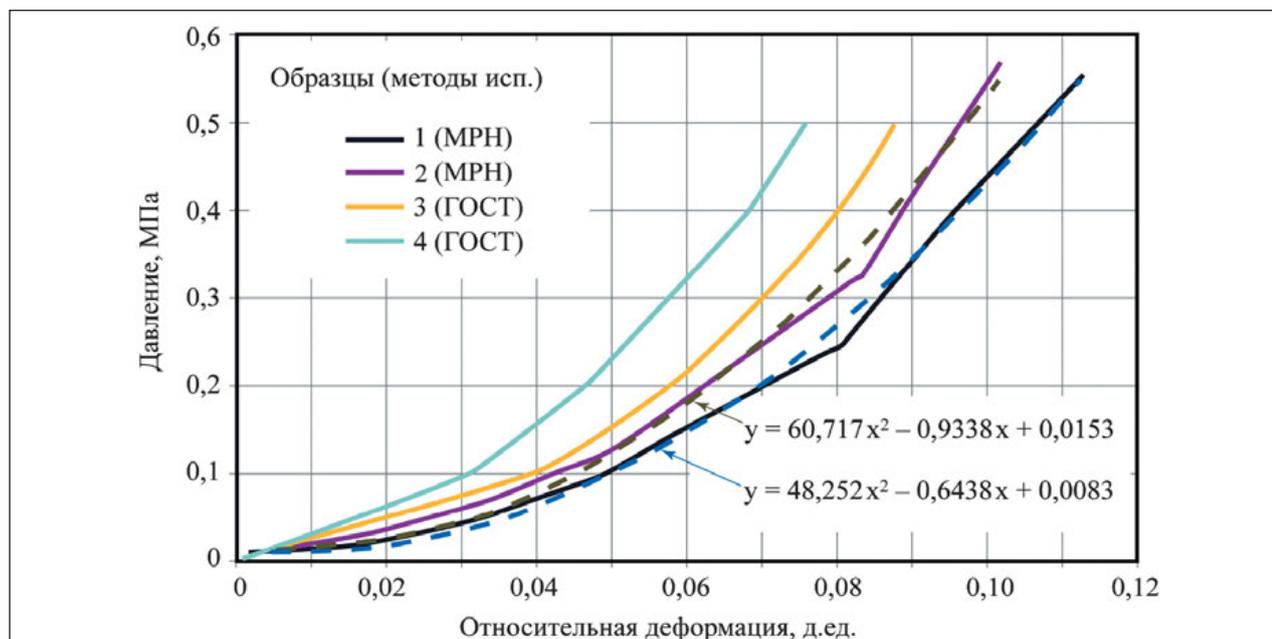


Рис. 4. Графики зависимостей «давление — относительная деформация» ($P = F(\epsilon)$) по данным испытаний методом релаксации напряжений (образцы 1 и 2 МРН) и по ГОСТ 12248-2010 (образцы 3 и 4 ГОСТ). Образцы 1–4 изготовлены из одного монолита покровного суглинка (описание см. в тексте). Результаты полиномиальной аппроксимации показаны пунктирными линиями

Из него также видно, что на участке 0,1–0,5 МПа графики идут как бы «параллельно» друг другу, а значит, больших различий в численных значениях модулей деформации на этих участках быть не должно.

Из анализа рис. 2 можно также увидеть, что секущий модуль деформации, полученный из графиков стандартных компрессионных испытаний, будет монотонно возрастать на любом участке нагрузок, в то вре-

мя как для секущего модуля, рассчитанного по графику методом релаксации напряжений, будут иметь место ничем не объяснимые скачки значений, причем чем меньшая разность давлений будет приниматься в расчет, тем эти скачки будут более значимыми.

Для того чтобы избавиться от этого эффекта, необходимо аппроксимировать точки, полученные в результате испытаний, графиком функции, имеющим

Таблица 1

Результаты полиномиальной аппроксимации зависимости относительной деформации от вертикального давления и обратной ей функции				
Аппроксимируемая зависимость	Аппроксимация	Вертикальное давление P, МПа	Относительная деформация ϵ , д.ед., образца №	
			1	2
$\epsilon = f(P)$	полиномом выше 4-й степени	0,0	0,000	0,000
		0,1	0,043	0,050
		0,2	0,064	0,074
		0,3	0,075	0,087
		0,4	0,081	0,096
		0,5	0,086	0,105
		0,6	0,092	0,117
		0,7	0,098	0,128
		0,8	0,100	0,135
$P = F(\epsilon)$	полиномом 2-й степени	0,0	0,000	0,000
		0,1	0,052	0,046
		0,2	0,071	0,064
		0,3	0,085	0,077
		0,4	0,097	0,087
		0,5	0,107	0,097
		0,6	0,116	0,105
		0,7	0,125	0,113
		0,8	0,133	0,121

Таблица 2

Модули деформации, полученные в результате испытаний методом релаксации напряжений и по ГОСТ					
Диапазон нагрузок, МПа		Одометрический модуль деформации, МПа, для образца (метода)			
от	до	1 (МРН)	2 (МРН)	3 (ГОСТ)	4 (ГОСТ)
0,0	0,1	1,92	2,17	2,50	3,17
0,1	0,2	5,26	5,56	5,56	6,67
0,2	0,3	7,14	7,69	8,00	8,70
0,3	0,4	8,33	10,00	10,00	9,52
0,4	0,5	10,00	10,00	13,33	13,33

большой порядок гладкости. Кривая зависимости $\varepsilon = f(P)$ имеет весьма сложное аналитическое выражение. Получить такую кривую для зависимости $\varepsilon = f(P)$ не удастся. На рисунке 3 показан алгоритм подбора линии, которая аппроксимирует точки, полученные в результате компрессионных испытаний методом релаксации напряжений полиномиальной линией. Увеличение порядка полинома не приближает кривую к результатам испытаний.

Однако, если попытаться найти полиномиальную функцию для зависимости $P = F(\varepsilon)$, то оказывается, что эта обратная зависимость в большинстве случаев хорошо аппроксимируется параболой, то есть кривой 2-го порядка (рис. 3, табл. 1).

После нахождения уравнения параболы, которая отражает зависимость $P = F(\varepsilon)$ с достаточной для поставленных целей степенью сходимости с опытными данными, определение осадки, соответствующей любой вертикальной нагрузке, сводится к решению квадратного уравнения, что никаких сложностей не представляет.

Если рассчитать осадки, соответствующие давлениям в диапазоне 0,10–0,60 МПа, используя найденные полиномиальные функции, а затем на основании полученных значений провести расчеты модулей деформации, то станет очевидным, что их величины в указанном диапазоне нагрузок хорошо коррелируют с одометрическими модулями E_{oed} , полученными в результате стандартных компрессионных испытаний.

В таблице 2 приведены модули деформации, полученные в результате испытаний методом релаксации напряжений и по ГОСТ 12248-2010.

Еще одно важное свойство полиномиальной функции $P = F(\varepsilon)$ заключается в том, что ее производная дает аналитическое выражение зависимости одометрического модуля E_{oed} от относительной деформации ε . Это следует из определения секущего модуля, причем неважно, будет ли это полиномом 2-го порядка или выше. Поскольку производная полинома непрерывна, дифференцируя по ε , мы получаем зависимость $E_{oed}(\varepsilon)$ для любого диапазона давлений.

Резюмируя приведенные факты, отметим, что метод релаксации напряжений позволяет существенно сократить время проведения компрессионных испытаний, а использование предложенного алгоритма обработки их результатов дает возможность рассчитывать модули деформации в диапазоне рабочих давлений грунтовых оснований зданий и сооружений.

Компрессионные испытания являются одним из основных методов определения деформационных характеристик грунтов. Результаты таких исследований зависят от множества факторов, но главным образом — от методики проведения испытаний и способа интерпретации полученных данных. Использование альтернативных видов компрессионных испытаний, которые снижают длительность проведения работ, возможно только при получении данных, сопоставимых с результатами использования стандартной методики во всем диапазоне вертикальных давлений. Применение предложенного в статье алгоритма обработки компрессионных кривых позволяет сопоставить результаты, полученные разными методами. Кроме того, данный алгоритм дает возможность автоматизации обработки результатов исследований и расчета необходимых параметров. ❖

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы определения прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2012.
- Грунты. Метод компрессионного сжатия с заданной скоростью деформации: проект национального стандарта Российской Федерации / Веб-сайт Gigabaza.ru. М.: ОАО «Росстройизыскания», ООО «НПП «Геотек»», 2012. URL: <http://gigabaza.ru/doc/5230-pall.html>.
- СТО 60284311-003-2012. Грунты. Метод компрессионных испытаний грунтов в режиме релаксации напряжений. Краснодар: СРО НП «КубаньСтройИзыскания», 2012.
- Труфанов А.Н. Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов: патент на изобретение № 2272101 от 25.08.2004 г. М.: База патентов РФ, 2004.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
- ASTM D 4186. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading. ASTM, 2006.
- Duncan J.M., Chang C.Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils // ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1970. V. 96. № 5. P. 1629–1653.