

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ /  
PHYSICS AND MATHEMATICS**

УДК 533.21:624.13

DOI: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019

**ЗАВИСИМОСТЬ СЖИМАЕМОСТИ НЕСВЯЗНЫХ  
ГРУНТОВ ОТ СТЕПЕНИ ОДНОРОДНОСТИ  
ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА****А. Ю. Мирный, Е. А. Гайков, А. О. Зубов***ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет»  
(г. Москва, Россия)*

В статье излагаются результаты лабораторных исследований фаз сжатия несвязных грунтов различного гранулометрического состава.

*Материалы и методы*

Фото- и видеоматериалы, демонстрирующие различные механизмы микроперемещения частиц в грунтах с различным гранулометрическим составом, были получены с помощью экспериментальной конструкции грунтового лотка с возможностью микросъемки.

*Результаты исследования*

В статье представлены результаты анализа компрессионных испытаний, разделение пластических и упругих составляющих деформаций в которых позволяет сделать вывод об изменении фаз сжатия. Кроме этого, отмечается, что плотность сложения коррелирует с деформационными характеристиками только в пределах одного и того же гранулометрического состава. На основании результатов испытаний делается вывод о недостаточности критерия коэффициента уплотнения для оценки сжимаемости несвязных грунтов и необходимости его дополнения сведениями об однородности гранулометрического состава.

*Обсуждение и заключения*

Учет неоднородности гранулометрического состава позволит уточнить технологические требования к выполнению искусственных земляных сооружений, обратных засыпок, песчаных подушек. Дальнейшие работы в данном направлении могут использоваться при актуализации нормативных документов, в частности СП 45.13330.2012.

**Ключевые слова:** компрессионное сжатие, гранулометрический состав, несвязный грунт, коэффициент уплотнения, сжимаемость, искусственное основание

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность рецензенту – доктору технических наук, профессору М. Г. Зерцалову за внимательное отношение к статье и ценные замечания.

**Для цитирования:** Мирный А. Ю., Гайков Е. А., Зубов А. О. Зависимость сжимаемости несвязных грунтов от степени однородности гранулометрического состава // Вестник Мордовского университета. 2016. Т. 26, № 1. С. 12–19. doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019



## NON-COHESIVE SOILS' COMPRESSIBILITY AND UNEVEN GRAIN-SIZE DISTRIBUTION RELATION

A. Yu. Mirnyy, Ye. A. Gaykov, A. O. Zubov

*National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)*

This paper presents the results of laboratory investigation of soil compression phases with consideration of various granulometric composition.

### *Materials and Methods*

Experimental soil box with microscale video recording for compression phases studies is described. Photo and video materials showing the differences of microscale particle movements were obtained for non-cohesive soils with different grain-size distribution.

### *Results*

The analysis of the compression tests results and elastic and plastic deformations separation allows identifying each compression phase. It is shown, that soil density is correlating with deformability parameters only for the same grain-size distribution. Basing on the test results the authors suggest that compaction ratio is not sufficient for deformability estimating without grain-size distribution taken into account.

### *Discussion and Conclusions*

Considering grain-size distribution allows refining technological requirements for artificial soil structures, backfills, and sand beds. Further studies could be used for developing standard documents, SP45.13330.2012 in particular.

**Keywords:** compression, grain-size distribution, non-cohesive soil, compaction ratio, artificial foundation

**Acknowledgements:** The authors thank reviewer Prof. M.G. Zertsalov Dr.Sc. (Engineering) for constructive and elaborated comments on the manuscript

**For citation:** Mirnyy AYu, Gaykov YeA, Zubov AO. Non-cohesive soils' compressibility and uneven grain-size distribution relation. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2016; 1(26):12-19. doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019

### **Введение**

В настоящее время основным технологическим требованием при выполнении обратных засыпок, грунтовых подушек, отсыпке земляных сооружений является значение коэффициента уплотнения, указанное в СП 45.13330.2012 «Земляные сооружения, основания и фундаменты». В данном нормативном документе отмечается, что соблюдение требований к величине коэффициента уплотнения является достаточным для обеспечения проектных значений механических параметров, в первую очередь деформируемости. Коэффициент уплотнения выражается отношением достигнутой при уплотнении плотности скелета к максимальной плотности, установленной при лабораторных испытаниях методом стандартного уплотнения:

$$k_{com} = \frac{\rho_d}{\rho_{d,max}} \quad (1)$$

### **Обзор литературы**

В некоторых случаях достижение проектного значения коэффициента уплотнения связано со значительными технологическими сложностями [1]. Это объясняется использованием для выполнения обратных засыпок грунтов различного гранулометрического состава. Однако следует отметить, что в нормативных документах не приводится указаний к выбору гранулометрического состава: для большинства сооружений его предлагается подбирать в соответствии с проектом. Исключениями являются только намывные сооружения, гранулометрический состав которых должен быть постоянным во всем объеме сооружения.

**Целью исследования** является выявление механизмов влияния гранулометрического состава на деформационные параметры несвязного грунта и разработка рекомендаций по его выбору для устройства земляных сооружений.

Известно, что поведение несвязных грунтов определяется в первую очередь их гранулометрическим составом. В исследованиях российских и зарубежных авторов [2–3] рассматривается его влияние на максимально возможную плотность, сжимаемость, прочностные характеристики несвязного грунта. Для абсолютного большинства объектов промышленного и гражданского строительства наибольшее значение имеет сжимаемость грунтов основания, позволяющая определить степень осадки сооружения. В случаях планомерного возведения грунтовой насыпи высокая плотность на контакте с сооружением необходима также для обеспечения достойного качества дальнейших работ, например, бетонирования.

Механизм сжимаемости дискретных сред, в частности грунтов, основывается на изменении объема пор скелета, образованного твердыми частицами [4]. Независимо от вида напряженного состояния и грунта при сжатии происходит постепенное уплотнение структуры последнего и увеличение количества контактов между частицами [5]. Традиционно в механике грунтов процесс уплотнения грунта включает в себя 3 этапа: 1) сокращение расстояния и увеличение количества контактов между частицами; 2) взаимное смещение частиц и их перераспределение в толще грунта; 3) стабилизация структуры и дальнейшее уплотнение за счет деформирования самих частиц [6]. Размеры пор при этом не превышают размеры каждой отдельной частицы.

Для грунтов с неоднородным гранулометрическим составом ярко выражена промежуточная фаза сжатия, называемая фазой сдвигов. На этом

этапе в уплотненной структуре грунта происходит потеря устойчивости отдельных мелких частиц и их мгновенное перемещение в крупные поры, в результате чего структура грунта лавинообразно изменяется. Наличие и количество таких пор зависит в первую очередь от гранулометрического состава грунта. Если он достаточно однородный, частицы компонуется таким образом, что поры имеют размер меньше характерного размера частицы. Деформирование при этом происходит за счет сжатия самих частиц, а их смещение в структуре имеет небольшое значение. Если же в гранулометрическом составе представлены частицы разных размеров, то поры между наиболее крупными из них могут быть заполнены более мелкими [7].

#### **Материалы и методы**

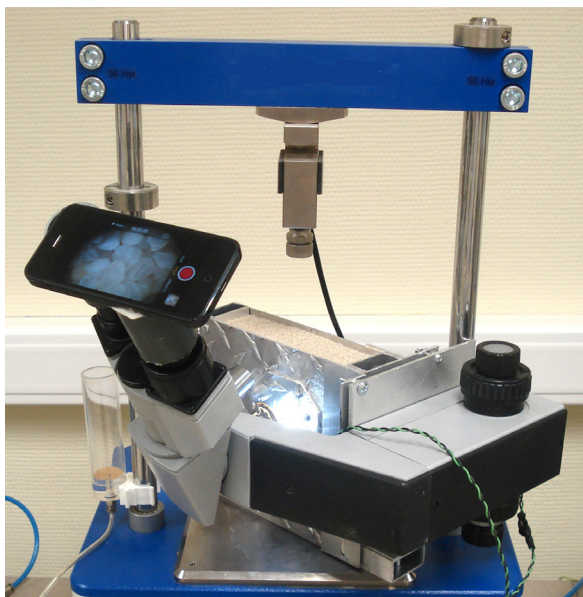
Отметим, что структура некоторых грунтов отличается высокой начальной пористостью, благодаря чему можно наблюдать описанные процессы в грунтовом лотке с прозрачными стенками и увеличительным устройством. Для проверки данной гипотезы на базе НОЦ «Геотехника» НИУ МГСУ был собран плоский грунтовый лоток размером 150x150x40 мм из алюминиевого профиля прямоугольного сечения 40x20x2 мм. В качестве штампа использовался отрезок профиля того же сечения, жесткость которого являлась достаточной для равномерной передачи давления на грунт в лотке. Лоток был зафиксирован на основании нагрузочного устройства; в одной из боковых стенок лотка имелось отверстие малого размера, закрытое стеклом таким образом, чтобы внутренняя поверхность стенки оставалась гладкой.

К грунтовому лотку крепился микроскоп, объектив которого был расположен напротив отверстия в стенке. Необходимость наблюдения частиц в отраженном свете потребовала также установки подсвечивающего



устройства. Данная конструкция позволила наблюдать перемещение частиц при нагружении лотка от 40 до 400 крат. Несмотря на то, что использованный микроскоп не позволял наблюдать стереоизображение, размер частиц был достаточно мал по срав-

нению с глубиной резкости используемого объектива, и все отснятые материалы позволили получить полное представление о положении каждой частицы в наблюдаемом пространстве. Общий вид плоского лотка представлен на рис. 1.



Р и с. 1. Общий вид плоского лотка с возможностью микросъемки  
F i g. 1. General view of a soil box with a microscale video recording

В связи с тем, что данная установка является демонстрационным прибором и не предназначена для измерений каких-либо величин в ходе исследований, необходимость соблюдения высоких требований к жесткости грунта отсутствовала. Испытания проводились с использованием песка максимально рыхлого сложения при незначительных величинах нормального давления, в связи с чем боковое давление грунта было несущественным, и трение о стенки прибора не оказало влияния на результат испытания.

#### **Результаты исследования**

Процесс исследования включал в себя поэтапное нагружение грунтов различного гранулометрического состава в лоток и постоянную виде-

офиксаций изображения в микроскопе. В течение эксперимента скорость записи была увеличена для упрощения анализа полученных данных. В результате дальнейшего изучения видеофайлов было установлено, что при сжатии однородных гранулометрических составов перекомпоновки частиц не происходит. Даже при максимально рыхлой укладке на этапе начала испытания твердые частицы сразу формируют достаточно устойчивый скелет, и в дальнейшем происходит только его уплотнение. Случаи резкого перемещения отдельных частиц носят несистематический характер.

В качестве иллюстрации приведены фотографии однородного и неоднородного гранулометрического со-

става, сделанные на начальном этапе работы (рис. 2). Хорошо видно, что в неоднородном гранулометрическом составе поры значительно крупнее и могут вмещать в себя более мелкие частицы; в однородном размер пор соизмерим с размерами частиц, но не превышает их.

В неоднородном гранулометрическом составе было хорошо заметно постоянное взаимное смещение частиц на всех этапах нагружения. Это объясняется тем, что в нем высока вероятность возникновения пор, размеры которых превышают размеры самых мелких частиц.



а)



б)

Р и с. 2. Гранулометрический состав: а) однородный; б) неоднородный  
F i g. 2. Grain-size distribution: a) even; б) uneven

Тем не менее рассмотрение данного явления с точки зрения микромеханики не позволяет оценить его количественно. Разница в проявлении фаз сжатия в грунтах с различным гранулометрическим составом может быть выявлена путем разделения упругих и пластических деформаций. Известно, что в грунтах преобладают пластические деформации, вызванные сдвиговыми усилиями и изменениями структуры. Упругие деформации определяются только упругой работой скелета грунта и высокой жесткостью частиц. При разгрузке происходит восстановление структуры грунта до деформаций за счет релаксации горизонтальных напряжений. У грунтов с однородным гранулометрическим составом значительно менее выражены пластические деформации в фазе сдвигов, т. е. перекомпоновки частиц не происходит. Даже при минимальной начальной плотности их скелет имеет устойчивую структуру и работает упруго. В грунтах с неоднородным гранулометрическим составом независимо от входящих в него фракций упругие деформации выражены

в меньшей степени, а пластические развиваются равномерно в ходе всего нагружения, что указывает на постоянные изменения структуры грунта [8].

По результатам компрессионных испытаний [9] были установлены значения модулей общей деформации при первичном нагружении и при разгрузке [10]. Из таблицы видно, что несмотря на меньшую начальную плотность и сопоставимые значения коэффициентов уплотнения, грунты с однородным гранулометрическим составом в среднем имеют более высокие значения модуля деформации.

#### Обсуждение и заключения

На основании представленных результатов лабораторных испытаний сделаем вывод о недостаточности использования коэффициента уплотнения для оценки качества искусственного сооружения без учета гранулометрического состава. В зависимости от степени его однородности при сопоставимых значениях коэффициента уплотнения разница в деформационных характеристиках достигает двух раз.





Для учета этого явления рекомендации по величине коэффициента уплотнения могут быть дополнены примечанием, которое позволяет

вводить понижающий коэффициент в случаях возведения искусственного сооружения из грунта с однородным гранулометрическим составом  $C_u < 3$ .

Таблица

Table

**Характерный размер частиц и плотность грунтов**  
**Characteristic particle size and density of soils**

	Фракция несвязного грунта / Fraction of cohesive soil			
	0,10–0,25 мм	0,25–0,50 мм	0,50–1,00 мм	Смесь / Mixture 0,10–1,00 мм
Плотность скелета в начале испытания / Density of skeleton at the beginning of test, г/см <sup>3</sup>	1,46	1,48	1,55	1,75
Максимальная плотность скелета / Maximum density of skeleton, г/см <sup>3</sup>	1,71	1,71	1,76	2,03
Коэффициент уплотнения / Compaction factor	0,85	0,86	0,88	0,86
Модуль общей деформации / Module common strain, МПа	12,40	51,60	33,90	23,20
Модуль деформации при разгрузке / Modulus of deformation during unloading, МПа	119,00	212,00	190,00	173,20

На основании результатов проведенных исследований сформулируем рекомендации к выбору гранулометрического состава материала земляных сооружений и насыпок. В случаях, когда принципиальное значение для сооружения имеет масса и суффозионная устойчивость (насыпи, дамбы, обратные насыпки котлованов), следует использовать грунты с неоднородным гранулометрическим составом, содержащим фракции различного размера в равных пропорциях. Однако если требуются упругая

работа насыпи и высокие фильтрационные характеристики (насыпи под автомобильные и железные дороги, подготовка дна котлована), следует использовать однородные гранулометрические составы, обеспечивающие стабильную структуру грунта и высокие значения модуля деформации.

Введение подобных примечаний в нормативные документы позволит избежать завышения технологических требований и повысить эффективность использования грунта как материала для искусственных сооружений.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. **Махмутов М. М., Сахапов Р. Л.** О качестве уплотнения грунтов земляного полотна // Известия Казан. гос. архитектурно-строительного ун-та. 2015. № 2. С. 289–294. URL: [http://izvestija.kgasu.ru/files/2\\_2015/2\\_2015.pdf](http://izvestija.kgasu.ru/files/2_2015/2_2015.pdf).
2. **Тер-Мартirosян З. Г.** Механика грунтов : учеб. пособие для вузов. М. : АСВ, 2009. 550 с.
3. **Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю.** Влияние неоднородности грунтов на их механические свойства // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 6. С. 2–7. URL: <http://ofmg.ru/index.php?page=home.pdf>.
4. **Mc Dowell G. R., Bolton M. D.** Micromechanics of elastic soil // Japanese Geotechnical Society. 2001. Vol. 41 (6). P. 147–152. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/41/6/41\\_6\\_147/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/41/6/41_6_147/_pdf).
5. **Santamarina J. C.** Soil Behaviour at the Microscale: Particle Forces. Atlanta GA : MIT, 2001. URL: [http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Santamarina\\_2002yu.pdf](http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Santamarina_2002yu.pdf).
6. **Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю.** Effect of nonhomogeneity of soils on their mechanical properties // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. Vol. 50, № 6. С. 223–231. doi: 10.1007/s11204-014-9238-z
7. **Потапов А. Д., Платов Н. А., Лебедева М. Д.** Песчаные грунты. М. : АСВ, 2009. 256 с.
8. **Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю., Джаро М. Н.** Определение прочностных характеристик несвязных грунтов при компрессионных испытаниях / Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2012. № 3. С. 1–6. URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/TerMartirosyanMirnyJaro-2012\\_3\(23\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/TerMartirosyanMirnyJaro-2012_3(23).pdf).
9. **Чаповский Е. Г.** Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М. : Недра, 1975. 303 с.
10. **Мирный А. Ю., Тер-Мартirosян А. З.** Подбор гранулометрического состава песчано-гравийных смесей для песчаных подушек и насыпей // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 43–46. URL: <http://rifsm.ru/editions/journals/2/2014/545>.

*Поступила 23.11.2015 г.*

*Об авторах:*

**Мирный Анатолий Юрьевич**, доцент кафедры механики грунтов и геотехники Института гидротехнического и энергетического строительства ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26), кандидат технических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8030-2302>, [reg@osonnor.ru](mailto:reg@osonnor.ru)

**Гайков Егор Александрович**, студент 4 курса ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3091-0828>, [yegorgaikov@yandex.ru](mailto:yegorgaikov@yandex.ru)

**Зубов Александр Олегович**, студент 4 курса ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4909-228X>, [finist94@yandex.ru](mailto:finist94@yandex.ru)

*Вклад соавторов:*

А. Ю. Мирный сформулировал теоретические положения статьи, провел обзор литературы, обобщил итоги реализации коллективного проекта.

Е. А. Гайков и А. О. Зубов занимались сборкой экспериментальной установки, проводили лабораторные исследования.

**REFERENCES**

1. Makhmutov MM, Sakhapov RL. O kachestve uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna [About quality of soil compaction subgrade]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo*



*universiteta* = Kazan State Architectural University Bulletin. 2015; 2:289-294. Available from: [http://izvestija.kgasu.ru/files/2\\_2015/2\\_2015.pdf](http://izvestija.kgasu.ru/files/2_2015/2_2015.pdf). (In Russ.)

2. Ter-Martirosyan ZG. Mekhanika gruntov: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Soil Mechanics: a manual for high schools]. Moscow: ASV; 2009. (In Russ.)

3. Ter-Martirosyan ZG, Mirnyy AYu. Vliyaniye neodnorodnosti gruntov na ikh mekhanicheskiye svoystva [Effect of nonhomogeneity of soils on their mechanical properties]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov* = Environmental Science and Engineering. 2013; 6:2-7. Available from: <http://ofmg.ru/index.php?page=home.pdf>. (In Russ.)

4. Mc Dowell GR, Bolton MD. Micromechanics of elastic soil. Japanese Geotechnical Society. 2001; 41(6):147-152. Available from: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/41/6/41\\_6\\_147/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/41/6/41_6_147/_pdf).

5. Santamarina JC. Soil Behaviour at the Microscale: Particle Forces. Atlanta GA: MIT, 2001. Available from: [http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Santamarina\\_2002yy.pdf](http://pmrl.ce.gatech.edu/papers/Santamarina_2002yy.pdf).

6. Ter-Martirosyan ZG, Mirnyy AYu. Effect of nonhomogeneity of soils on their mechanical properties. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2014; 50(6):223-231. doi: 10.1007/s11204-014-9238-z

7. Potapov AD, Platov NA, Lebedeva MD. Peschanyye grunty [Sandy soils]. Moscow: ASV; 2009. (In Russ.)

8. Ter-Martirosyan ZG, et al. Opredeleniye prochnostnykh kharakteristik nesvyaznykh gruntov pri kompressionnykh ispytaniyakh [Determination of strength characteristics of soil associated with compression test]. *Internet-vestnik VolgGASU* = Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Internet Bulletin. 2012; 3:1-6. Available from: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/TerMartirosyanMirnyyJaro-2012\\_3\(23\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/TerMartirosyanMirnyyJaro-2012_3(23).pdf). (In Russ.)

9. Chapovskiy YeG. Laboratornyye raboty po gruntovedeniyu i mekhanike gruntov [Laboratory work on soil science and soil mechanics]. Moscow: Nedra, 1975. (In Russ.)

10. Mirnyy AYu, Ter-Martirosyan AZ. Podbor granulometricheskogo sostava peschano-graviynykh smesey dlya peschanykh podushyek i nasypey [Selection of particle size distribution of sand and gravel to sand and mounds of pillows]. *Zhilishchnoye stroitelstvo* = Housing construction. 2014; 9:43-46. Available from: <http://rifsm.ru/editions/journals/2/2014/545>. (In Russ.)

*Submitted 23.11.2015*

*About the authors:*

**Anatoliy Mirnyy**, associate professor of Soil Mechanics and Geotechnics chair, Institute of hydraulic engineering and power construction, Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia), Ph.D. (Engineering), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8030-2302>**, [reg@oconnor.ru](mailto:reg@oconnor.ru)

**Yegor Gaykov**, student of State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3091-0828>**, [yegorgaikov@yandex.ru](mailto:yegorgaikov@yandex.ru)

**Aleksandr Zubov**, student of State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia), **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4909-228X>**, [finist94@yandex.ru](mailto:finist94@yandex.ru)

*Authors' contributions:*

A. Yu. Mirnyy formulated a theoretical framework, reviewed the literature, and summarized the results of the collective project.

Ye. A. Gaykov and A. O. Zubov assembled the experimental setup, and performed laboratory tests.