

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВЫХ СМЕСЕЙ С ЗАДАНЫМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

## MODELING OF SANDY SOIL MIXTURES WITH SPECIFIED PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES



### ЧЖАН ШЭНЖУН

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, cash\_040608@hotmail.com

### КОРОЛЁВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, va-korolev@bk.ru

### ZHANG SHENGRONG

Postgraduate student of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, cash\_040608@hotmail.com

### KOROLEV V.A.

Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, va-korolev@bk.ru

### Ключевые слова:

математическая модель; графическая модель; треугольная диаграмма; песчаные грунты; грунтовые смеси; физико-механические свойства.

### Аннотация

В статье рассматривается моделирование песчаных грунтовых смесей с заданными физико-механическими свойствами. Обоснованы математические и графические модели, позволяющие качественно и количественно оценить закономерности изменений физических и физико-механических свойств грунтовых смесей, состоящих из двух и трех фракций. Предложенные модели могут быть полезными и эффективными для дорожного и иного строительства.

### Введение

Поскольку грунтовые смеси широко используются в разных видах строительства, в настоящее время исследователи уделяют большое внимание изучению их свойств [1–3, 18]. Одним из важных факторов, влияющих на их свойства, является гранулометрический состав. Подбору оптимального гранулометрического состава грунтовых смесей с наибольшей плотностью сложения были посвящены работы [2, 6, 7]. Для формирования физико-механических свойств песчано-гравийных смесей особенности гранулометрического состава имеют решающее значение.

В последнее время специалисты уделяют особое внимание моделированию смесей на основе теории зернистых (дискретных) сред [10, 17], позволяющему путем математического описания их состава рассчитывать основные ха-

### Key words:

mathematical model; graphical model; triangle diagram; sandy soils; soil mixtures; physical-mechanical properties.

### Abstract

This paper deals with modeling of sandy soil mixtures with specified physical-mechanical properties. Mathematical and graphical models are substantiated. They allow qualitatively and quantitatively assessing the regularities of changes in the physical and physical-mechanical properties of soil mixtures consisting of two and three fractions. The proposed models can be useful and efficient for road and other construction.

рактеристики их физических и физико-механических свойств. Однако в полной мере этот вопрос еще не решен.

Поэтому задача формулируется следующим образом: если имеются исходные фракции или грунты с заданными гранулометрическими характеристиками и известными физическими и физико-механическими свойствами, то можно ли составить модель, позволяющую математически описать закономерности изменений физико-механических свойств грунтовых смесей, которые состоят из этих исходных фракций или грунтов? Иными словами, проблема сводится к математическому моделированию грунтовых смесей с заданными свойствами. Данная статья посвящена рассмотрению и обоснованию таких расчетных моделей. При этом также решаются вопросы: при каком условии получаются критические (максимальные или минимальные) величины показателей свойств

грунтовых смесей и какова связь между исходными и критическими показателями?

### Исходные характеристики исследуемых объектов

Для исследований были выбраны аллювиальные и флювиогляциальные песчаные грунты различного гранулометрического состава. Из них были выделены гранулометрические фракции с размерами частиц: 1–2; 0,5–1; 0,25–0,5; 0,1–0,25 мм и менее 0,1 мм. Кроме того, в качестве добавки к смесям использовалась супесь, состоящая преимущественно из пылевой фракции.

Были определены основные физические и физико-механические характеристики указанных фракций стандартными методами [4]. Они представлены в табл. 1 и 2.

Кроме этого, наряду с описанными грунтами были проанализированы и обработаны результаты лабораторных исследований, выполненных В.В. Охотиным [2].

### Структура грунтовых смесей

Известно, что песчано-гравийная смесь состоит из более крупных зерен и обломков, образующих ее скелет, и более мелких частиц, занимающих пространство между ними, — заполнителя. При увеличении содержания последнего в смеси ее пористость постепенно уменьшается до тех пор, пока поры между крупными частицами не заполнятся максимально. Последующее добавление заполнителя приводит к противоположному влиянию на свойства грунтовой смеси — ее пористость начинает постепенно повышаться, причем ее структура постепенно приближается к структуре заполнителя (рис. 1). В промежуточном случае можно считать, что грунтовая смесь имеет переходную структуру.

К настоящему времени многими исследованиями [2, 3, 6, 7] уже доказано, что минимальная пористость грунтовых смесей ( $n_{min}$ ) получается при массовом содержании заполнителя около 30%. Кроме того, эта критическая величина обусловлена соотношением минимальных и максимальных диаметров частиц  $D = d_{min} / d_{max}$  (соответственно частиц заполнителя и скелета грунтовой смеси).

Для установления количественной связи между величинами  $n_{min}$  и  $D$  авторами были обработаны экспериментальные данные В.В. Охотина [2, 6, 7] и собственные результаты (табл. 3–6). Все испытания проводились авторами для грунтовых смесей в плотном сложении.

Из полученных результатов следует, что минимальная пористость грунтовых смесей  $n_{min}$  уменьшается при снижении отношения диаметров частиц заполнителя и скелета  $D$ . Однако, если  $D$  меньше 1/40, такое влияние отсутствует, то есть значение  $n_{min}$  остается постоянным при уменьшении величины  $D$ .

Замечено, что, несмотря на разные размеры частиц скелетов грунтовых смесей, при одинаковых значениях  $D$  относительная пористость смесей  $n_{min} / n_{sk}$  (где  $n_{sk}$  — пористость скелета смеси) различается незначительно. Поэтому с помощью программы MATLAB (разработанной компанией MathWorks) по полученным данным можно построить диаграмму зависимости относительной пористости  $n_{min} / n_{sk}$  от соотношения диаметров частиц заполнителя и скелета  $D$  (рис. 2).

Анализируя полученные данные, можно заключить, что зависимость  $n_{min} / n_{sk}$  от  $D$  описывается следующей степенной функцией (с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,96$ ):

$$n_{min} / n_{sk} = 1,087 D^{0,1885}. \quad (1)$$

При постепенном увеличении массового содержания заполнителя, если оно больше 30%, пористость грунтовой смеси, как отмечалось выше, растет. При этом она постепенно приближается к пористости заполнителя. По данным разных исследований [3, 6, 7], связь между пористостью грунтовой смеси и долей заполнителя стремится к линейной (рис. 3).

Согласно зависимости, показанной на рис. 3, пористость грунтовой смеси  $n$  при содержании заполнителя более 30% может быть описана уравнением:

$$n = n_{min} + \frac{n_{zp} - n_{min}}{70} (m - 30), \quad (2)$$

где  $n_{zp}$  — пористость заполнителя;  $m$  — содержание заполнителя, %.

Подставляя уравнение (1) в уравнение (2), пористость грунтовой смеси  $n$  с содержанием заполнителя более 30% можно описать с помощью функции:

$$n = 1,087 n_{sk} D^{0,1885} + \frac{n_{zp} - 1,087 n_{sk} D^{0,1885}}{70} (m - 30). \quad (3)$$

С помощью уравнения (3) можно рассчитать пористость грунтовой смеси в зависимости от соотношения максимальных и минимальных диаметров ее частиц  $D$ , пористости заполнителя  $n_{zp}$ , пористости скелета смеси  $n_{sk}$  и содержания заполнителя  $m$ .

### Моделирование прочностных свойств двухкомпонентных грунтовых смесей

Прочностные свойства песчано-гравийных смесей оцениваются по углу внутреннего трения  $\varphi$ , поскольку величина сцепления  $C$  для сыпучих грунтов обычно пренебрежимо мала. Значения  $\varphi$  смесей обусловлены в первую очередь содержанием наиболее крупных частиц [8]. Как было показано выше, грунтовые смеси имеют минимальную пористость при массовом содержании заполнителя около 30%. В этом случае величины  $\varphi$  теоретически максимальны. Но в ходе опытов было установлено, что это не всегда так.

Авторами были экспериментально определены углы внутреннего трения грунтовых смесей с разными размерами частиц при содержании заполнителя 30%. После этого был рассчитан коэффициент  $\alpha = \varphi / \varphi_{sk}$  (где  $\varphi$ ,  $\varphi_{sk}$  — углы внутреннего трения смеси и фракции, составляющей ее скелет, соответственно), отражающий степень изменения  $\varphi$  в зависимости от соотношения минимальных и максимальных диаметров частиц  $D$ . Результаты расчетов представлены в табл. 7.

Из таблицы 7 видно, что при массовом содержании заполнителя 30% изменения относительной прочности грунтовых смесей, оцениваемой величиной  $\alpha$ , находятся в диапазоне плюс-минус 4%. При этом, несмотря на снижение пористости при достижении содержания заполнителя 30%, прочность грунтовых смесей мало изменяется и иногда даже уменьшается. Такое явление уже было отмечено многими учеными [9, 15]. Это можно объяснить развитием зон пластических деформаций в местах непосредственного контакта между зернами скелета грунтовых смесей [5]. Однако в общем случае можно принять, что смеси могут сохранять свою прочность при содержании заполнителя от 0 до 30%. При дальнейшем увеличении доли заполнителя наблюдается явная потеря прочности (то есть уменьшение угла внутреннего трения) в связи с повышением пористости грунтовой смеси и приближением ее структуры к структуре заполнителя (рис. 4).

Показатели физических и физико-механических свойств исходных фракций и заполнителя (супеси)						
Показатель	Фракция с размером частиц, мм					Супесь
	1÷2	0,5÷1	0,25÷0,5	0,1÷0,25	< 0,1	
Плотность частиц, г/см <sup>3</sup>	2,64	2,64	2,64	2,63	2,63	2,63
Плотность скелета, г/см <sup>3</sup>	1,70	1,74	1,75	1,70	1,64	1,65
Пористость, д. ед.	0,35	0,34	0,33	0,35	0,38	0,37
Угол внутреннего трения, град.	52	47	44	45	41	43

Таблица 2

Гранулометрический состав заполнителя (супеси)								
Характеристика	Размер частиц, мм							
	< 2	< 1	< 0,5	< 0,25	< 0,1	< 0,05	< 0,01	< 0,005
Содержание, %	100	100	100	98	83	57	18	12

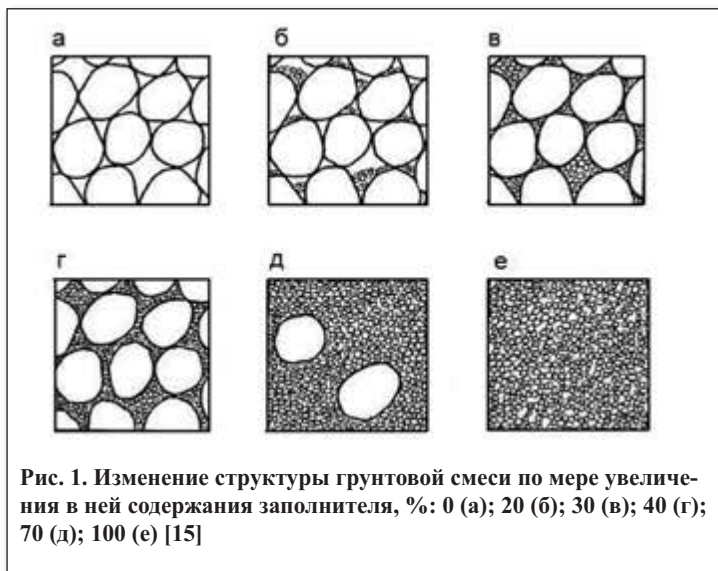


Рис. 1. Изменение структуры грунтовой смеси по мере увеличения в ней содержания заполнителя, %: 0 (а); 20 (б); 30 (в); 40 (г); 70 (д); 100 (е) [15]

Таблица 3

Результаты обработки первого набора экспериментальных данных В.В. Охотина [2, 7]						
Характеристика*	Фракция с размером частиц, мм					
	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,1	0,1÷0,05	0,05÷0,01
<i>n</i> , д. ед.	0,37	0,38	0,37	0,35	0,39	0,41
$D = d_{min} / d_{max}$	-	1/2	1/4	1/8	1/20	1/40
$n_{min}$ , д. ед.	-	0,37	0,32	0,25	0,22	0,22
$n_{min} / n_{sk}$	-	1,00	0,86	0,68	0,59	0,59

\* *n* — пористость;  $n_{sk}$  — пористость скелета;  $d_{min}$  — минимальный диаметр частиц;  $d_{max}$  — максимальный диаметр частиц.

Таким образом, между относительными величинами угла внутреннего трения и пористости существует некая зависимость:

$$\varphi/\varphi_{zp} = f(n/n_{zp}), \tag{4}$$

где  $\varphi, \varphi_{zp}$  — углы внутреннего трения грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно;  $n, n_{zp}$  — пористость грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно.

На основе анализа полученных экспериментальных данных с помощью программы MATLAB была найдена следующая степенная функция, характеризующая эту зависимость (рис. 4):

$$\varphi/\varphi_{zp} = (n/n_{zp})^{-0,34}. \tag{5}$$

График функции (5) представлен на рис. 5, из которого видно, что абсолютные отклонения расчетных данных от экспериментальных составляют 0,05–0,10. Коэффициент детерминации  $R^2$  составляет 0,63. Таким образом, эта функция может охарактеризовать зависимость угла внутреннего трения грунтовой смеси от ее гранулометрического состава. С помощью формулы (5) может быть рассчитана прочность смеси в зависимости от угла внутреннего трения ее заполнителя, пористости смеси и пористости заполнителя.

### Моделирование деформационных свойств двухкомпонентных грунтовых смесей

Одним из основных показателей, применяемых для характеристики деформационных свойств грунтов, является модуль деформации. В ходе исследования авторами была проведена серия компрессионных испытаний песчано-пылеватых смесей, в которых в качестве заполнителя использовалась супесь (рис. 6). Для них были рассчитаны модули компрессионной деформации  $E$  в диапазоне нагрузок 0,15–0,20 МПа.

Эти испытания проводились в приборе компрессионного сжатия автоматизированного испытательного комплекса АСИС (разработанного в ООО «НПП «Теотек»»). Содержание супеси в грунтовых смесях составляло 30, 50 и 70%. Внешняя нагрузка при испытаниях увеличивалась до 0,25 МПа ступенями по 0,05 МПа.

Рисунок 6 показывает, что показатели деформационных свойств снижаются при добавлении к крупным фракциям мелких частиц при нагрузке до 0,25 МПа. Если массовое содержание заполнителя равно 30%, при котором пористость минимальна, величины модуля компрессионной деформации в диапазоне нагрузок 0,15–0,20 МПа снижаются на 20 и 32% при  $D$ , равном 1/40 и 1/20 соответственно. Отсюда следует, что при нагрузке менее 0,25 МПа зоны в местах непосредственного контакта между крупными зёрнами, вероятно, частично испытывают пластические деформации, что и приводит к снижению значения  $E$ . Если массовое содержание заполнителя больше 30%, то в случае его добавления величина  $E$  при нагрузках 0,15–0,20 МПа закономерно уменьшается за счет увеличения пористости смеси.

Таким образом, между относительными величинами модуля компрессионной деформации в диапазоне нагру-

Таблица 4

**Результаты обработки второго набора экспериментальных данных В.В. Охотина [2, 7]**

Характеристика*	Фракция с размером частиц, мм						
	4÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,1	0,1÷0,05	0,05÷0,01
$n$ , д. ед.	0,37	0,38	0,38	0,36	0,36	0,40	0,40
$D = d_{min} / d_{max}$	-	1/2	1/4	1/8	1/20	1/40	1/80
$n_{min}$ , д. ед.	-	0,37	0,32	0,27	0,22	0,20	0,20
$n_{min} / n_{sk}$	-	1,00	0,86	0,73	0,59	0,54	0,54

\* Буквенные обозначения — см. табл. 3.

Таблица 5

**Результаты обработки третьего набора экспериментальных данных В.В. Охотина [2, 7]**

Характеристика*	Фракция с размером частиц, мм							
	16÷8	8÷4	4÷2	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,1	0,1÷0,05
$n$ , д. ед.	0,36	0,35	0,37	0,37	0,38	0,37	0,36	0,40
$D = d_{min} / d_{max}$	-	1/2	1/4	1/8	1/20	1/40	1/80	1/160
$n_{min}$ , д. ед.	-	0,34	0,29	0,25	0,20	0,19	0,17	0,17
$n_{min} / n_{sk}$	-	0,94	0,81	0,69	0,56	0,53	0,47	0,47

\* Буквенные обозначения — см. табл. 3.

зок 0,15–0,20 МПа и пористости существует некая зависимость:

$$E / E_{zp} = f(n / n_{zp}), \quad (6)$$

где  $E, E_{zp}$  — модули компрессионной деформации грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно;  $n, n_{zp}$  — пористость грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно.

На основе полученных экспериментальных данных с помощью программы MATLAB была найдена степенная функция, наилучшим образом описывающая эту зависимость (рис. 7):

$$E / E_{zp} = 0,81(n / n_{zp})^{-4,745}. \quad (7)$$

Из рисунка 7 следует, что отклонения расчетных данных от экспериментальных в среднем составляют плюс-минус 0,4, коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,93. Таким образом, можно считать, что полученная функция (7) достаточно точно характеризует зависимость модуля компрессионной деформации грунтовой смеси от ее гранулометрического состава. С ее помощью может быть рассчитан модуль деформации смеси в зависимости от модуля деформации ее заполнителя, пористости смеси и пористости заполнителя.

**Моделирование физико-механических свойств грунтовых смесей из трех фракций**

Для грунтовых смесей из трех фракций моделирование проводится с помощью треугольной диаграммы. Методика ее построения заключается в следующем. Положения точек внутри равностороннего треугольника отражают и гранулометрический состав трехкомпонентных грунтовых смесей, который задается в вершинах треугольника по трем фракциям, и значения показателей их деформационных или прочностных свойств ( $\varphi, E$ ), которые отображаются в пределах треугольника в виде изолиний [3, 9, 11–15].

Таблица 6

**Результаты обработки экспериментальных данных авторов**

Характеристика*	Фракция с размером частиц, мм				Супесь
	2÷1	1÷0,5	0,5÷0,25	0,25÷0,1	
$n$ , д. ед.	0,35	0,34	0,33	0,35	0,37
$D = d_{min} / d_{max}$	-	1/2	1/4	1/8	1/20
$n_{min}$ , д. ед.	-	0,36	0,33	0,26	0,25
$n_{min} / n_{sk}$	-	0,94	0,83	0,74	0,71

\* Буквенные обозначения — см. табл. 3.

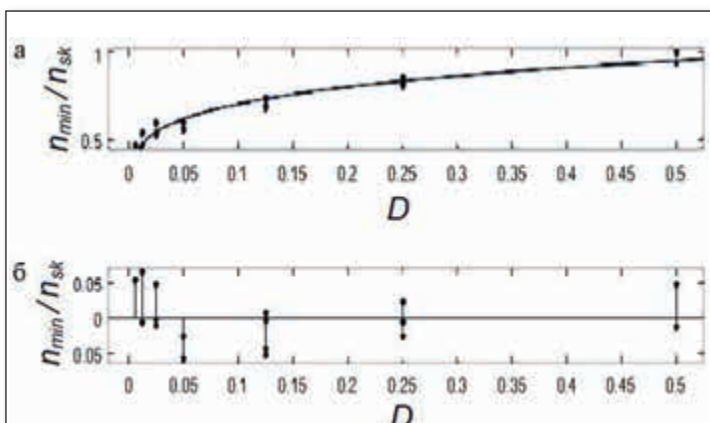


Рис. 2. Зависимость относительной пористости  $n_{min} / n_{sk}$  от отношения диаметров частиц заполнителя и скелета грунтовой смеси  $D$  (а) и диаграмма соответствующих абсолютных отклонений расчетных данных от экспериментальных (б). Обозначения: точки — экспериментальные данные; линия — расчетные данные;  $D = d_{min} / d_{max}$ ;  $d_{min}$  — минимальный диаметр частиц смеси (частиц заполнителя);  $d_{max}$  — максимальный диаметр частиц смеси (частиц скелета);  $n_{sk}$  — пористость скелета смеси



Рис. 3. Схематическая зависимость пористости грунтовой смеси  $n$  от массового содержания в ней заполнителя  $m$  при  $m > 30\%$  ( $n_{zp}$  — пористость заполнителя;  $n_{min}$  — минимальная пористость грунтовой смеси)

Таблица 7

Коэффициенты  $\alpha$  для грунтовых смесей при массовом содержании заполнителя 30%\*

$d_{max}$ , мм	$D = d_{min} / d_{max}$			
	1/2	1/4	1/8	1/40
2	1,00	0,96	0,96	1,04
1	1,00	1,02	0,98	-

\*  $\alpha = \varphi / \varphi_{sk}$ ;  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунтовой смеси;  $\varphi_{sk}$  — угол внутреннего трения фракции, составляющей скелет смеси;  $d_{min}$  — минимальный диаметр частиц смеси (частиц заполнителя);  $d_{max}$  — максимальный диаметр частиц смеси (частиц скелета).

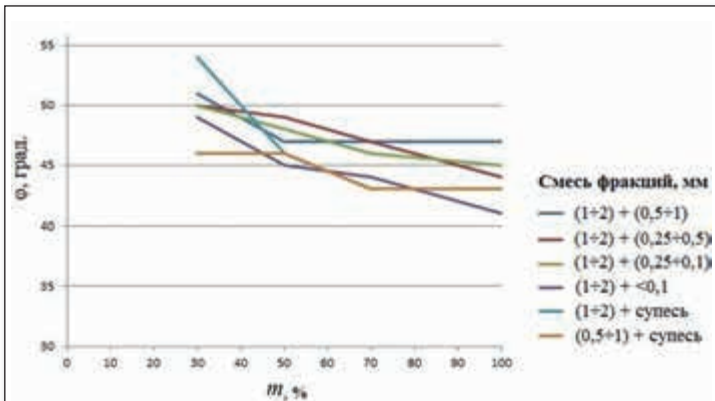


Рис. 4. Изменение угла внутреннего трения грунтовых смесей  $\varphi$  в зависимости от массового содержания заполнителя  $m$

Величины показателей для точек на каждой стороне треугольника, соответствующих смесям из двух фракций, известны и находятся с помощью степенных функций (5) и (6). Как было показано выше, критические значения пористости для двухкомпонентных смесей получаются при содержании заполнителя 30%. Им соответствуют точки D, E, F на сторонах треугольника ABC (рис. 8).

Согласно результатам исследований В.В. Охотина [6, 7] минимальная пористость грунтовых смесей из трех фракций получается при условии, что весовые отношения первой и второй, второй и третьей фракций равны 7/3 при  $D = d_{min} / d_{max} < 1/8$ . Если  $D = 1/2$ , то массовое содержание третьей фракции равно 30%. Это можно учесть и отразить с помощью треугольной диаграммы (см. рис. 8). Для этого проводятся линии AE, DC и BF, которые пересекаются в точках G, I, J. Линии EF и DC пересекаются в точке H. При этом наименьшая пористость смесей из

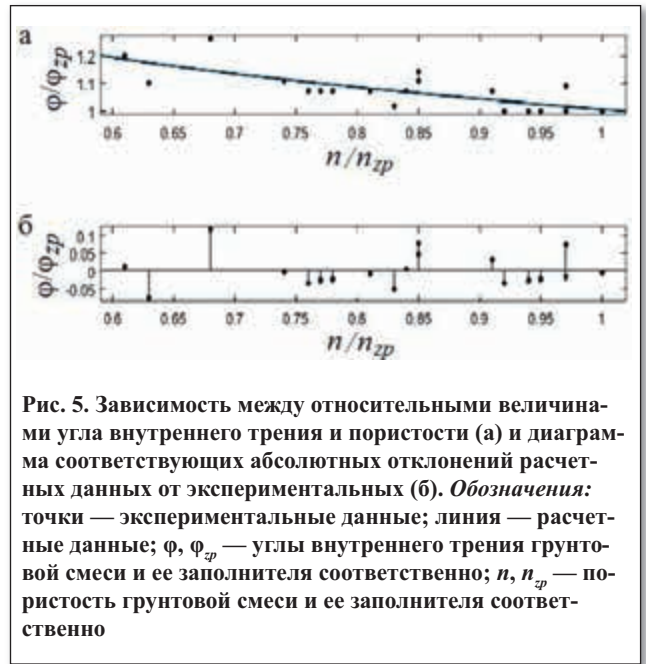


Рис. 5. Зависимость между относительными величинами угла внутреннего трения и пористости (а) и диаграмма соответствующих абсолютных отклонений расчетных данных от экспериментальных (б). Обозначения: точки — экспериментальные данные; линия — расчетные данные;  $\varphi, \varphi_{zp}$  — углы внутреннего трения грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно;  $n, n_{zp}$  — пористость грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно

трех фракций соответствует точкам внутри треугольника DEF, самая низкая пористость в его пределах — точкам внутри треугольника GIJ и на отрезке GH, снижаясь от точки H к точке G при уменьшении соотношения минимального и максимального диаметров фракций  $D = d_{min} / d_{max}$ .

Физико-механические свойства смесей, состоящих из трех фракций, как и для двухкомпонентных смесей, обусловлены содержанием фракции с наиболее крупными частицами. При этом максимальные углы внутреннего трения соответствуют точкам в пределах треугольника ADF (см. рис. 8). Дальнейшее увеличение содержания заполнителя приводит к ослаблению прочности в связи с повышением пористости грунтовых смесей.

Величины  $\varphi, E$  трехкомпонентных грунтовых смесей можно также рассчитать по представленным выше формулам (5) и (7) при содержании третьей фракции более 30%, то есть для смеси, которой соответствуют точки в пределах треугольника EFC (см. рис. 8). При этом за значения  $\varphi_{zp}, E_{zp}$  и  $n_{zp}$  в формулах (5) и (7) необходимо принять соответствующие величины для третьей фракции.

Если содержание третьей фракции меньше 30% (то есть для смеси, которой соответствуют точки в пределах четырехугольника DFEB, см. рис. 8), ее влияние можно игнорировать. В этом случае смесь можно рассматривать как состоящую из скелета смеси и второй фракции. Тогда за значения  $\varphi_{zp}, E_{zp}$  и  $n_{zp}$  в формулах (5) и (7) необходимо принять соответствующие величины для второй фракции.

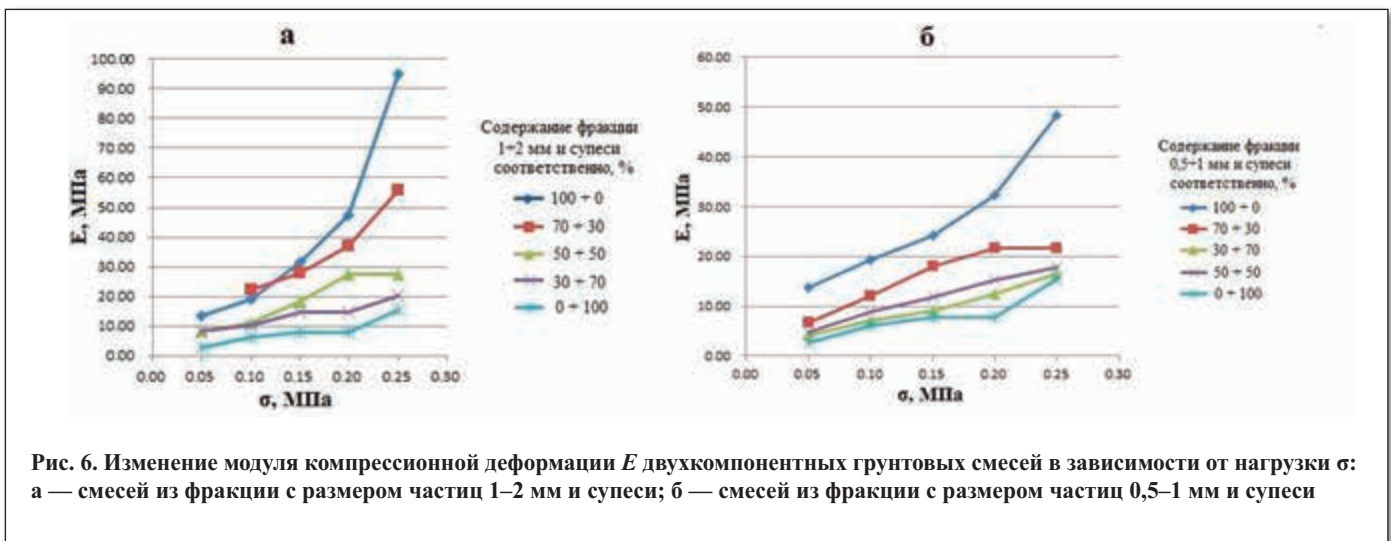
На основе этого авторами были рассчитаны углы внутреннего трения грунтовых смесей из фракций с размерами частиц 2–1, 0,5–1 и 0,1–0,25 мм (табл. 8).

По экспериментальным и расчетным данным была построена треугольная диаграмма, отражающая закономерности изменений углов внутреннего трения грунтовых смесей из фракций с размерами частиц 2–1, 0,5–1 и 0,1–0,25 мм (рис. 9). При сравнении видно, что расчетные и экспериментальные изолинии на диаграмме имеют сходные положения. Углы внутреннего трения создаваемых грунтовых смесей закономерно снижаются при уменьшении содержания в них наиболее крупной фракции (1–2 мм).

**Углы внутреннего трения грунтовых смесей, состоящих из трех фракций, полученные экспериментальным и расчетным путем**

№ смеси*	Угол внутреннего трения заполнителя $\varphi_{zp}$ , град.	Пористость заполнителя $n_{zp}$ д. ед.	Пористость смеси $n$ , д. ед.	Угол внутреннего трения смеси $\varphi$ , град.	
				экспер.	расч.
1	45	0,35	0,27	49	49
2	45	0,35	0,26	47	50
3	45	0,35	0,27	49	49
4	45	0,35	0,28	47	48
5	47	0,34	0,28	49	50
6	47	0,34	0,28	50	50

\* Номера смесей соответствуют номерам точек 1–6 на рис. 9.



**Рис. 6. Изменение модуля компрессионной деформации  $E$  двухкомпонентных грунтовых смесей в зависимости от нагрузки  $\sigma$ : а — смесей из фракции с размером частиц 1–2 мм и супеси; б — смесей из фракции с размером частиц 0,5–1 мм и супеси**

В области наименьшей пористости величина  $\varphi$  не достигает максимального значения. Вероятно, это можно объяснить тем, что грунтовые смеси, испытанные авторами в плотном сложении, не уплотняются до состояния максимальной плотности. Возможно, это приводит к образованию некоторых пластических зон в местах непосредственного контакта между крупными частицами грунтовых смесей и снижению их прочности.

**Заключение**

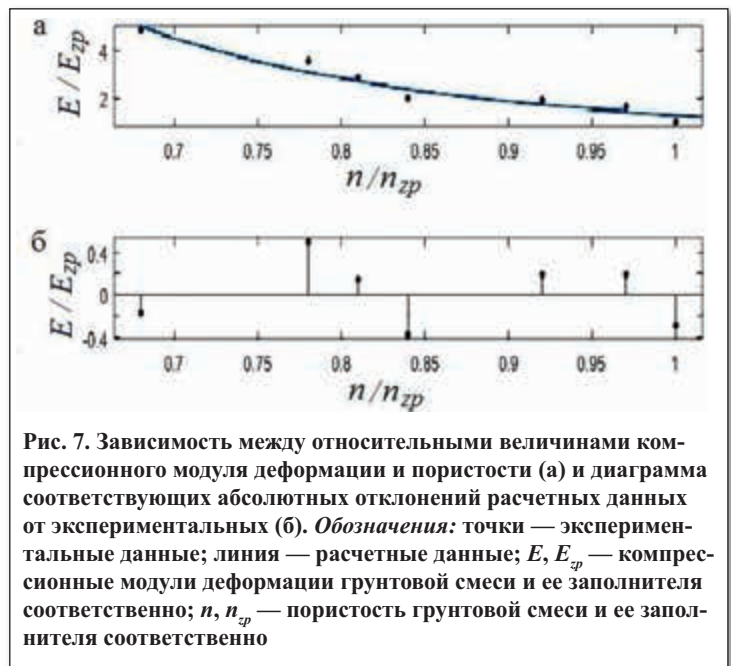
Представленные в статье модели позволяют рассчитать максимальные и минимальные значения показателей физических и физико-механических свойств песчаных грунтовых смесей на основе имеющихся исходных данных для их компонентов.

На основе результатов выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Добавление мелких фракций (заполнителя) к фракциям с более крупными частицами, составляющими скелет грунтовой смеси, приводит к уменьшению пористости смеси. Это обусловлено содержанием заполнителя и соотношением минимальных и максимальных диаметров частиц  $D = d_{min} / d_{max}$ .

2. Если известна величина  $D$  и пористость скелета грунтовой смеси, то ее минимальная пористость может быть рассчитана по уравнению (1).

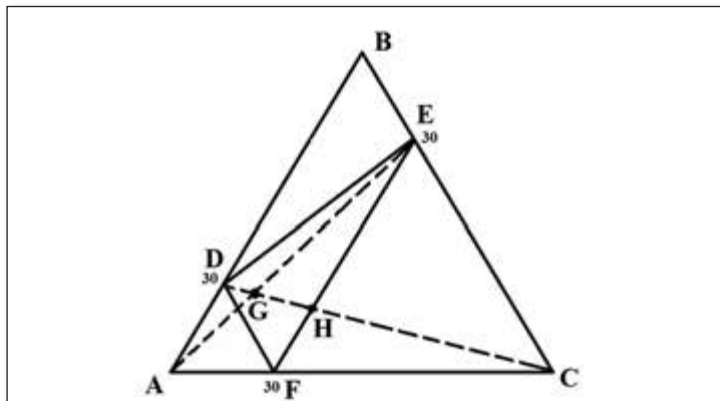
3. Подтверждено, что прочность грунтовой смеси связана с ее пористостью и содержанием в ней заполнителя. При мас-



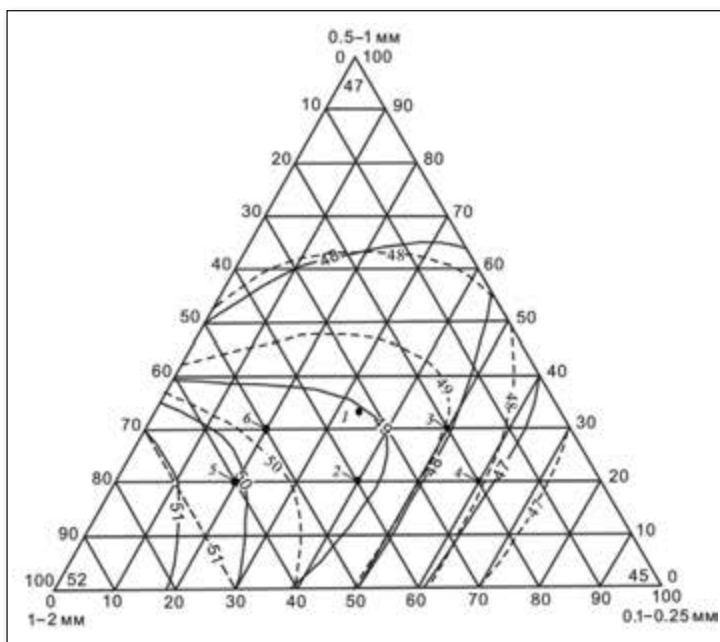
**Рис. 7. Зависимость между относительными величинами компрессионного модуля деформации и пористости (а) и диаграмма соответствующих абсолютных отклонений расчетных данных от экспериментальных (б). Обозначения: точки — экспериментальные данные; линия — расчетные данные;  $E, E_{zp}$  — компрессионные модули деформации грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно;  $n, n_{zp}$  — пористость грунтовой смеси и ее заполнителя соответственно**

совом содержании заполнителя менее 30% прочность смеси при его добавлении почти не меняется. Если же содержание заполнителя больше 30%, то при его добавлении прочность смеси уменьшается за счет повышения ее пористости.

4. Деформационные свойства грунтовых смесей также обусловлены их пористостью и содержанием в них за-



**Рис. 8.** Построение графической модели изменений свойств грунтовых смесей, состоящих из трех фракций. Точке А соответствует процентное содержание крупной фракции, точке В — средней фракции, точке С — мелкой фракции. Точкам D, E, F на сторонах треугольника соответствуют критические значения пористости для двухкомпонентных смесей при содержании заполнителя 30%. Положения точек внутри треугольника отражают и гранулометрический состав трехкомпонентных грунтовых смесей, и значения показателей их деформационных или прочностных свойств. Наименьшая пористость смесей из трех фракций соответствует точкам внутри треугольника DEF (самая низкая пористость в его пределах соответствует точкам внутри треугольника GIJ и на отрезке GH)



**Рис. 9.** Треугольная диаграмма изменений углов внутреннего трения грунтовых смесей из фракций с размерами частиц 2–1, 0,5–1 и 0,1–0,25 мм. Сплошные изолинии соответствуют экспериментальным данным, пунктирные — расчетным. Номера точек 1–6 внутри треугольника соответствуют номерам смесей в табл. 8

полнителя. Добавление заполнителя приводит к снижению компрессионного модуля деформации  $E$  при нагрузке до 0,25 МПа. При минимальной пористости смесей величины  $E$  в диапазоне нагрузок 0,15–0,20 МПа снижаются на 20 и 32% при  $D$ , равном 1/40 и 1/20 соответственно.

5. Физико-механические характеристики грунтовой смеси ( $\phi$ ,  $E$ ) с массовым содержанием заполнителя более 30% могут быть рассчитаны на основе полученных авторами уравнений (5) и (7) с учетом заданных свойств исходных грунтов или фракций, использованных для приготовления смеси.

6. Для получения грунтовых смесей с заданными свойствами можно использовать полученные модели. Математические модели дают возможность количественно оценить изменения свойств грунтовых смесей. Графические модели позволяют более наглядно представить закономерности этих изменений. Совместное использование этих двух типов моделей является эффективным способом получения грунтовых смесей с заданными свойствами.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00944а.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ермолаева А.Н. Экспериментально-аналитические исследования и оценка механических свойств грунтов с крупнообломочными включениями // Известия ВНИИГ. 1999. Т. 235. С. 17–24.
2. Иванов Н.Н., Охотин В.В. Дорожное почвоведение и механика грунтов. Л.: Гострансиздат, 1934. 387 с.
3. Королёв В.А., Чжан Ш. Моделирование песчаных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 6–14.
4. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королёва. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
5. Мирный А.Ю. Экспериментально-теоретические исследования механических свойств песчаных грунтов неоднородного состава // Материалы геотехнического семинара. М.: Изд-во МГСУ, 2012. С. 14–19.
6. Охотин В.В. Грунтоведение. СПб.: Центр генетического грунтоведения, 2008. 231 с.
7. Охотин В.В. Лабораторные опыты по составлению дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей пористости. М.: Транспечать, 1929. 32 с.
8. Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров П.С. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
9. Чжан Ш., Королёв В.А. Создание грунтовых смесей с заданными физико-механическими свойствами на основе графического моделирования // Материалы 12-й Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2016. С. 78–84.
10. Jing Yin Gjun, Ren Jiaolon G., Xu Yinshan, Li Di. Simulation method of mechanical properties of graded broken stone based on particle flow code // Journal of Tongji university (natural sciences). 2001. V. 39. № 5. P. 699–704.
11. Kezdi A. Handbook of Soil Mechanics. Vol. 1. Soil physics. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1974. 294 p.

12. *Kezdi A.* Handbook of Soil Mechanics. Vol. 2. Soil testing. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1980. 258 p.
13. *Kezdi A.* Handbook of Soil Mechanics. Vol. 3. Soil mechanics of earthworks. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1979. 160 p.
14. *Kezdi A.* Handbook of Soil Mechanics. Vol. 4. Application of soil mechanics in practice: examples and case histories. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1990. 335 p.
15. *Korolev V.A., Zhang Shengrong.* The application of graphical method to create sandy soils with given physic-mechanical properties // Journal of Civil Construction and Environmental Engineering. 2016. V. 1. № 1. P. 1–11.
16. *Ni Q., Tan T.S., Dasari G.R., Hight D.W.* Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils // Geotechnique, 2004. V. 54. № 9. P. 561–569.
17. *Sun Qicheng, Wang Guangqian.* Introduction to particulate matter mechanic (M-science). Beijing: Science Press, 2009. 302 p.
18. *Vallejo L.E.* Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures // Canadian Geotechnical Journal. 2001. V. 38. P. 1098–1104.

## ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,  
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Лузганов Григорий  
+7 (495) 210-89-92  
PR@GEOMARK.RU  
WWW.GEOMARK.RU

[www.geomark.ru](http://www.geomark.ru)