



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ С ЗАДАНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

## MODELING OF SANDY SOILS WITH SPECIFIED PHYSICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

### КОРОЛЁВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, korolev@geol.msu.ru

### ЧЖАН ШЭНЖУН

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, cash\_040608@hotmail.com

### KOROLEV V.A.

Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology of Lomonosov Moscow State University, Moscow, korolev@geol.msu.ru

### CHZHAN SHENZHUN

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

### Ключевые слова:

песок; гранулометрический состав; треугольная диаграмма; треугольник Фере; физические свойства; физико-механические свойства; плотность; пористость; угол внутреннего трения; оптимальная смесь; моделирование.

### Key words:

sand; granulometric composition; triangular diagram; Feret triangle; physical properties; physical properties; physical-mechanical properties; density; porosity; angle of internal friction, optimum mixture; modeling.

### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы моделирования песчаных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами с помощью предложенного авторами оригинального графического метода — использования треугольных диаграмм, представляющих собой модифицированные треугольники Фере. Такие треугольные диаграммы, построенные на базе экспериментальных исследований, позволяют подбирать смеси из различных по крупности фракций для получения грунта с заданными значениями показателей физических и физико-механических свойств — плотности, пористости, угла внутреннего трения и др. Предложенный способ может быть весьма полезным и эффективным для дорожного строительства, а также для создания грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами для других целей.

### Введение

Песчаные и крупнообломочные грунты очень широко распространены. Они являются одними из самых часто используемых материалов в дорожном строительстве и во многих других случаях для создания насыпей, дамб, искусственных оснований сооружений и т.п. Из-за того что природные песчаные и крупнообломочные грунты обычно имеют невысокую плотность, чтобы удовлетворить условиям проекта, на практике часто используются различные способы улучшения свойств этих грунтов путем искусственного регулирования их гранулометрического состава.

Начиная с XIX века разрабатываются практические основы искусственного улучшения строительных свойств песчано-гравийных грунтов и смесей на их основе. С тех пор исследователи пытались создать искусственные грунты, обладающие заданными и наилучшими свойствами при строительстве, в т. ч. с помощью оптимальных смесей [1, 2].

В настоящее время, чтобы улучшить свойства создаваемых искусственных грунтов, большинство научных работ направлено на изучение влияющих на них факторов. В ряду этих факторов выделяют гранулометрический состав, плотность сложения, минеральный состав, влажность и др. Для песчаных и крупнообломочных грунтов ведущими факторами являются гранулометрический состав, форма частиц и плотность сложения грунта.

Однако, несмотря на то что исследователи давно занимаются анализом этих факторов, вопрос о создании песчаного или крупнообломочного грунта с заданными физическими свойствами до сих пор остается нерешенным. При этом условии задачи формулируется следующим образом: имеется ряд гранулометрических фракций (или ряд грунтов известного гранулометрического состава) с известными физическими свойствами (плотностью скелета, плотностью твердых частиц,

### Abstract

The article considers questions of modeling of sandy soils with specified physical and physical-mechanical properties using an original graphic method proposed by the authors, i.e. using triangular diagrams represented by modified Feret triangles. Such triangular diagrams constructed on the basis of experimental investigations make it possible to select mixtures of various granulometric fractions to obtain soils with specified values of their physical and physical-mechanical parameters such as the density, porosity, angle of internal friction, etc. The offered method can be very useful and efficient for road construction as well as for creation of soils with specified physical and physical-mechanical properties for other purposes.



пористостью); требуется установить, в каких пропорциях необходимо смешать данные фракции (или исходные грунты), чтобы из них получить смесь с требуемыми, например максимальными, плотностью и прочностью в плотном сложении.

Изучению этого вопроса и посвящена настоящая статья.

### Существующие представления о создании песчаных грунтов с заданными свойствами

К настоящему времени был выполнен ряд работ по изучению вопроса о создании песчаных или крупнообломочных грунтов с требуемыми (заданными) физическими свойствами. В частности, изучались закономерности изменений плотности скелета искусственных грунтовых смесей, состоящих из двух фракций. Этот вопрос был детально изучен В.В. Охотиным еще в прошлом веке [10].

Результаты некоторых его опытов представлены на рис. 1, из которого следует, что при добавке к гравийной фракции (с размером частиц 4–2 мм) песчаных (2–0,05 мм) или пылеватых (0,05–0,01 мм) фракций в различных пропорциях пористость смеси закономерно уменьшается [1]. При этом минимальная пористость не соответствует соотношению смешиваемых фракций 1:1 (или 50% заполняющей фракции), а соответствует в условиях экспериментов В.В. Охотина примерно 30% заполнителя.

Такая зависимость может быть объяснена тем, что при заполнении пор частицами более мелких фракций пористость грунта возрастает до определенного предела, обусловленного соотношением размеров используемых фракций.

Наряду с этими работами были выполнены многочисленные исследования по изучению «оптимальных гранулометрических смесей» [2]. Под такой смесью понимается грунт с гранулометрическим составом, при котором его физические и физико-механические свойства в данных условиях изменяются в наименьшей степени [2].

Оптимальная смесь состоит из различных по крупности частиц, взятых в определенном соотношении, обеспечивающем повышенное внутреннее трение и сцепление между частицами и высокую плотность смеси. Наиболее крупные частицы составляют скелет оптимальной смеси; крупные пылеватые частицы располагаются в порах, уменьшая пористость и увеличивая плотность грунта; более мелкие пылеватые и глинистые частицы соединяют составные части смеси в плотную массу [9].

А.К. Бируля предложил устанавливать состав оптимальной смеси для данных условий следующими методами:

- наблюдением за состоянием наилучших участков дороги;
- лабораторными исследованиями свойств грунтов;
- теоретическим построением гранулометрического состава грунта наибольшей плотности [2].

Большой вклад в изучение прочностных свойств оптимальных смесей внес Н.Н. Иванов. В своих работах он исследовал и привел составы оптимальных смесей с ориентировочными значениями их модулей дефор-

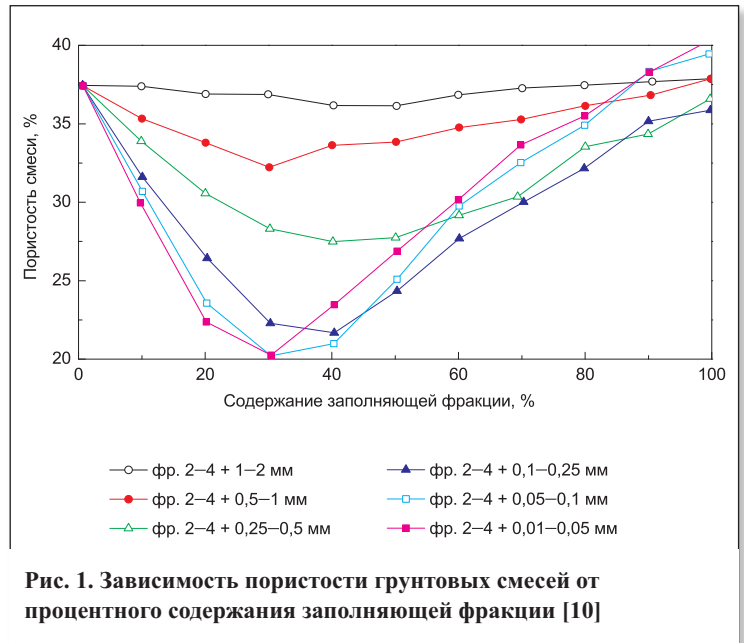


Рис. 1. Зависимость пористости грунтовых смесей от процентного содержания заполняющей фракции [10]

мации, а также предложил кривые их гранулометрического состава [2].

К настоящему времени существует ряд способов подбора оптимальных смесей. Среди них наиболее распространены методы треугольных координат, кривых полных просеивов, верхнего предела пластичности, использования номограмм Браздо — Волкова и др. [2–4].

На рисунке 2 на треугольной диаграмме представлены составы оптимальных песчано-глинистых смесей, рекомендованные на основании исследований Гусшосдора СССР [4].

Многолетний опыт показывает, что такие грунты, содержащие частицы различных размеров в определенных соотношениях и уплотненные до максимальной плотности при оптимальной влажности, являются наиболее устойчивыми как в сухом, так и в водонасыщенном состоянии [3].

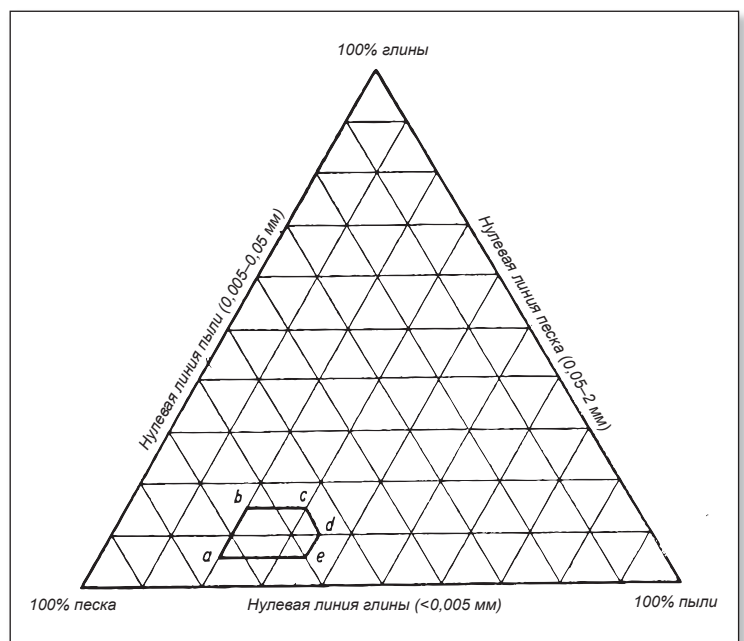


Рис. 2. Треугольная диаграмма для подбора оптимальных смесей [4]. Пятиугольник abcde — область, характеризующая состав оптимальных смесей

Физические свойства выделенных фракций при плотном сложении					
Показатель	Фракции с размером частиц, мм				
	1,0–2,0	0,5–1,0	0,25–0,50	0,10–0,25	< 0,10
Плотность частиц $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2,77	2,75	2,77	2,77	2,79
Плотность скелета $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1,70	1,74	1,75	1,70	1,64
Пористость $n$ , %	0,39	0,37	0,37	0,39	0,41
Коэффициент пористости $e$ , д.ед.	0,63	0,58	0,58	0,63	0,69

Из изложенного следует, что свойства грунтовых смесей из двух фракций и закономерности их изменений уже относительно хорошо изучены. А смеси из трех и более фракций изучены гораздо хуже, и отсутствует модель, описывающая изменения их свойств под влиянием изменений гранулометрического состава, на основе которой можно было бы подбирать их состав для получения заданных физических и физико-механических свойств.

Исходя из этого авторами были выполнены лабораторные исследования отмеченных неизученных вопросов, результаты которых изложены ниже.

### Характеристика объектов исследований

Для исследований авторами были выбраны песчаные грунты различного гранулометрического состава, из которых рассевом были выделены отдельные фракции.

Исходные природные песчаные грунты представляли собой аллювиальные или флювиогляциальные образования. Из них были выделены фракции с размерами частиц: 1,0–2,0; 0,5–1,0; 0,25–0,50; 0,10–0,25 мм. Физические свойства полученных фракций при их плотном сложении представлены в табл. 1.

Полученные таким образом фракции затем смешивались в разных соотношениях либо по две, либо по три.

Фракции и смеси на их основе анализировались в воздушно-сухом состоянии. Для всех смесей плотность определялась с помощью мерного стакана, в плотном сложении [8]. На основе известной плотности частиц грунта  $\rho_s$  и результатов определения плотности скелета грунта  $\rho_d$  рассчитывались значения пористости  $n$  и коэффициента пористости  $e$  смесей при плотном сложении. По полученным результатам строились графики и треугольные диаграммы.

### Методика исследований

Как известно, для графического отображения результатов гранулометрического анализа может применяться треугольник Фере [8], который представляет собой равносторонний треугольник, у которого сумма трех перпендикуляров, опущенных из какой-либо точки внутри него на его стороны, равна его высоте, принимаемой за 100%. Это дает возможность отобразить точкой на такой диаграмме гранулометрический состав смеси, состоящей из трех фракций, если разделить стороны треугольника на 100 частей каждую и откладывать на них процентное содержание составляющих смеси фракций.

Но помимо гранулометрического состава расположение точки внутри такого треугольника может отражать еще и значение показателя какого-либо физического или физико-механического свойства смеси ( $\rho_s$ ,  $\rho_d$  или др.) при определенном массовом соотношении фракций.

Например, при исследовании закономерностей изменений плотности скелета  $\rho_d$  смеси, состоящей из 40% фракции с размером частиц 1,0–2,0 мм, 30% фракции 0,5–1,0 мм и 30% фракции 0,25–0,50 мм, может быть построена диаграмма, показанная на рис. 3. Здесь каждая из трех точек, находящихся на вершинах треугольника, соответствует 100% содержания одной из трех исходных фракций, составляющих смесь. Точка внутри треугольника соответствует определенному гранулометрическому составу и характерной для него плотности скелета соответствующей смеси. Расположение этой точки показывает, что смесь образована тремя фракциями с массовым соотношением их содержания 4:3:3. А число 1,90 рядом с ней показывает, что плотность скелета  $\rho_d$  смеси при таком соотношении фракций составляет 1,90 г/см<sup>3</sup>.

Аналогичным образом на диаграмму треугольника Фере могут быть нанесены и другие точки, отражающие другие соотношения содержаний гранулометрических фракций (или гранулометрический состав грунта) и значения плотности скелета. Объединяя одинаковые значения показателя того или иного свойства

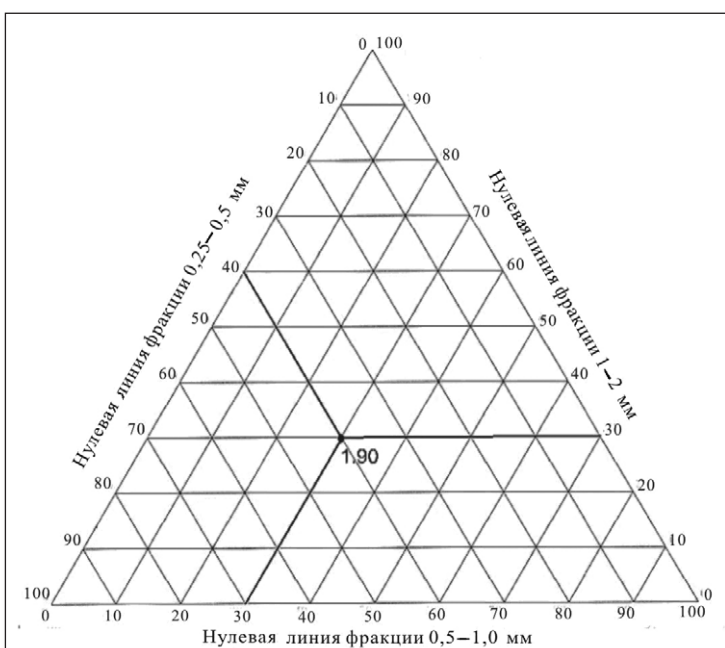


Рис. 3. Треугольник Фере с нанесенной точкой, соответствующей плотности скелета смеси  $\rho_d = 1,90$  г/см<sup>3</sup> при определенном соотношении анализируемых фракций



множества таких точек с помощью изолиний, можно построить треугольную диаграмму, отражающую изменения этого параметра (в нашем случае — плотности скелета грунта  $\rho_d$ ) при различных количественных соотношениях содержания анализируемых фракций.

Если же рассматривать множество разных фракций в качестве потенциальных компонентов смеси, то описанным способом можно с помощью треугольных диаграмм графически отражать изменения плотности скелета грунтовых смесей при любом соотношении различных фракций. Это дает возможность с помощью указанных графических моделей вести поиск наиболее подходящих грунтов (или фракций) для получения смеси с требуемыми (заданными) значениями плотности скелета или показателей иных физических свойств. В этом и состоит суть предлагаемого авторами графического способа моделирования грунтовых смесей.

Аналогичным образом на этих треугольных диаграммах вместо плотности скелета  $\rho_d$  можно отражать изолиниями значения и иных показателей физических свойств смесей — плотности, пористости, коэффициента пористости и т.д., а также показателей физико-механических свойств — модуля общей деформации, угла внутреннего трения и пр. На этом и основана методика моделирования, в результате применения которой авторами были получены серии треугольных диаграмм с изолиниями значений показателей различных физических и физико-механических свойств. Анализ этих диаграмм позволяет сделать выбор того или иного состава смеси для получения грунта с требуемыми (заданными) значениями показателей физических и физико-механических свойств.

Методика лабораторного определения физико-механических параметров смесей основывалась на стандартных методах [5, 8] и состояла в следующем. Величина угла внутреннего трения  $\phi$  определялась с помощью сдвигового прибора ВСВ-25 (производства ООО «УЭРМЗ»). Испытания каждого образца (смеси) проводились методом одноплоскостного среза по схеме быстрого сдвига [5] при вертикальных нагрузках 0,1; 0,15 и 0,2 МПа. Подготовленные смеси того или иного состава загружались в прибор ВСВ-25 при плотном сложении. При этом контролировалась плотность (пористость) испытываемых образцов.

Для получения значений модуля общей деформации  $E$  были использованы нормативные величины  $E$  (МПа) для четвертичных песчаных грунтов по СНиП 2.02.01-83 [11]. При этом значения  $E$  определялись по известным величинам пористости изучаемых смесей  $n$ .

### Результаты моделирования физических свойств грунтовых смесей

Обратимся к результатам проведенных исследований и обсудим закономерности изменений плотности скелета  $\rho_d$  и других показателей физических свойств грунтовых смесей. Результаты лабораторных опытов представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 отражены результаты определения плотности скелета  $\rho_d$  смесей, состоящих из двух различных фракций, меньшая из которых по размеру частиц выполняет роль заполнителя. Общий вид этих кривых свидетельствует о том, что зависимость  $\rho_d = f(Z)$  (где

$Z$  — содержание заполнителя, % по массе) характеризуется наличием максимума, положение которого на графике не зависит от размера частиц анализируемых фракций или размера частиц заполнителя.

Кроме того, из рис. 4 можно сделать следующие выводы.

1. Плотность скелета  $\rho_d$  смесей, состоящих из двух фракций, соотношение максимальных ( $d_{max}$ ) и мини-

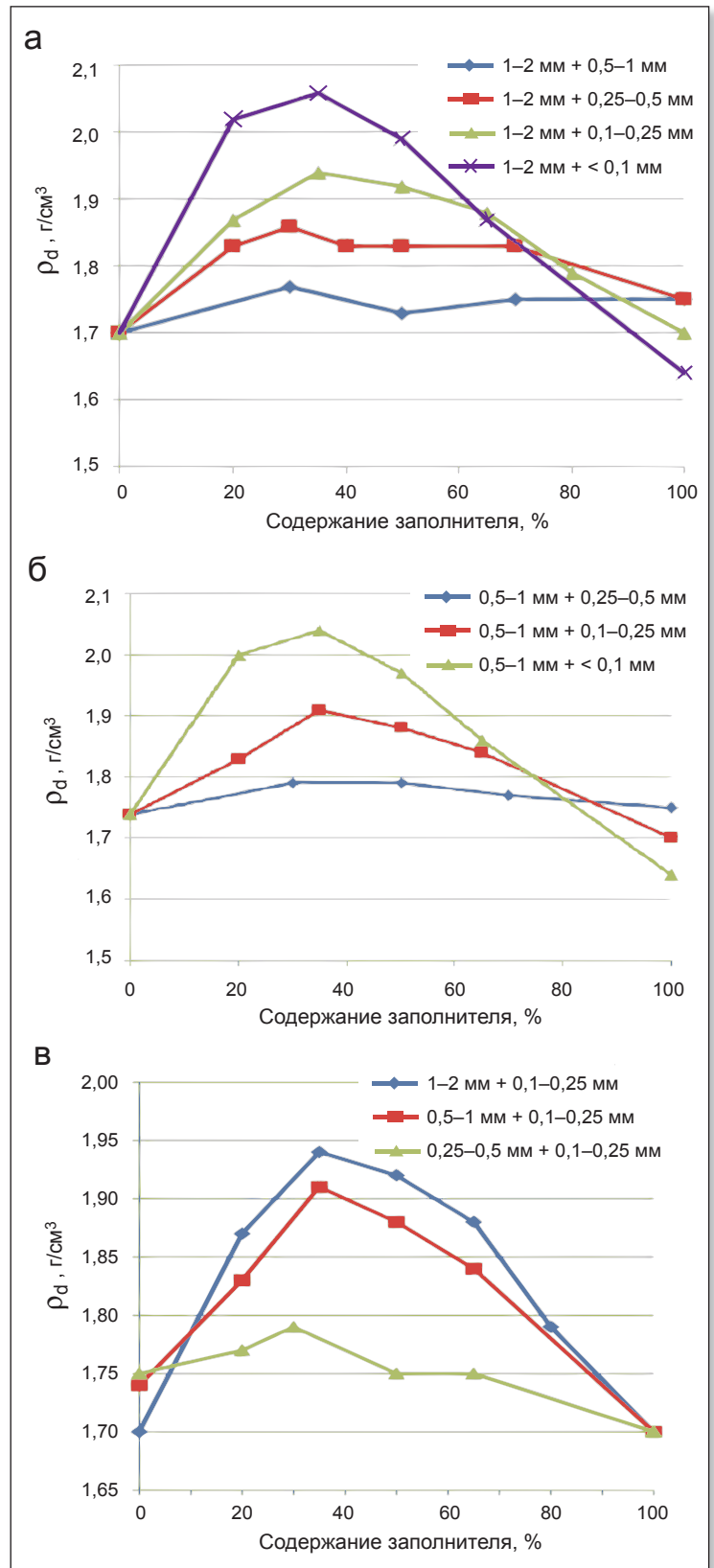


Рис. 4. Закономерности изменений плотности скелета  $\rho_d$  смесей, состоящих из двух фракций

мальных ( $d_{\min}$ ) диаметров частиц которых  $d_{\max}/d_{\min}$  составляет 2:1, почти не меняется с увеличением содержания заполнителя, т. е. фракции с более мелкими частицами (см. рис. 4, а, б).

2. Если отношение диаметров фракций  $d_{\max}/d_{\min}$  в смеси больше, чем 4:1, то наблюдаются очевидные изменения плотности скелета смесей  $\rho_d$ . Кроме того, чем больше отношение диаметров частиц фракций, составляющих смесь, тем резче происходят изменения плотности скелета этих смесей (см. рис. 4, а, в).

3. Максимальная плотность скелета  $\rho_d$  смесей, состоящих из двух фракций, отмечается тогда, когда масса заполнителя составляет около 30%.

Таким образом, для получения смеси с максимальной плотностью скелета  $\rho_d$  необходимо использовать такие две исходные фракции (или два монодисперсных грунта), соотношения диаметров которых  $d_{\max}/d_{\min}$  составляет не менее чем 4:1. Эти данные в целом согласуются с результатами В.В. Охотина [10], также полученными для смесей из двух фракций.

Перейдем к рассмотрению смесей, состоящих из трех фракций. В выполненном исследовании, как представлено на треугольных диаграммах (рис. 5), размер частиц самых крупнозернистых фракций составлял 1–2 мм, а размер частиц более мелкозернистых фракций-заполнителей изменялся в диапазоне от 0,5 мм до менее чем 0,1 мм.

Как видно из полученных данных (см. рис. 5), изолинии плотности скелета  $\rho_d$  на треугольных диаграммах располагаются в основном центрально-симметрично: максимальные значения плотности скелета  $\rho_d$  смесей, состоящих из трех фракций, располагаются в области, близкой к центру диаграммы; при этом максимум величин  $\rho_d$  несколько смещен вниз и влево, т.е. в сторону увеличения содержания наиболее крупнозернистой фракции (с размером частиц 1–2 мм). Как и для смесей из двух фракций (см. рис. 4), на значение  $\rho_d$  здесь влияет соотношение диаметров использованных фракций. Если используются только две фракции и соотношение  $d_{\max}/d_{\min}$  для них составляет не более 2:1,

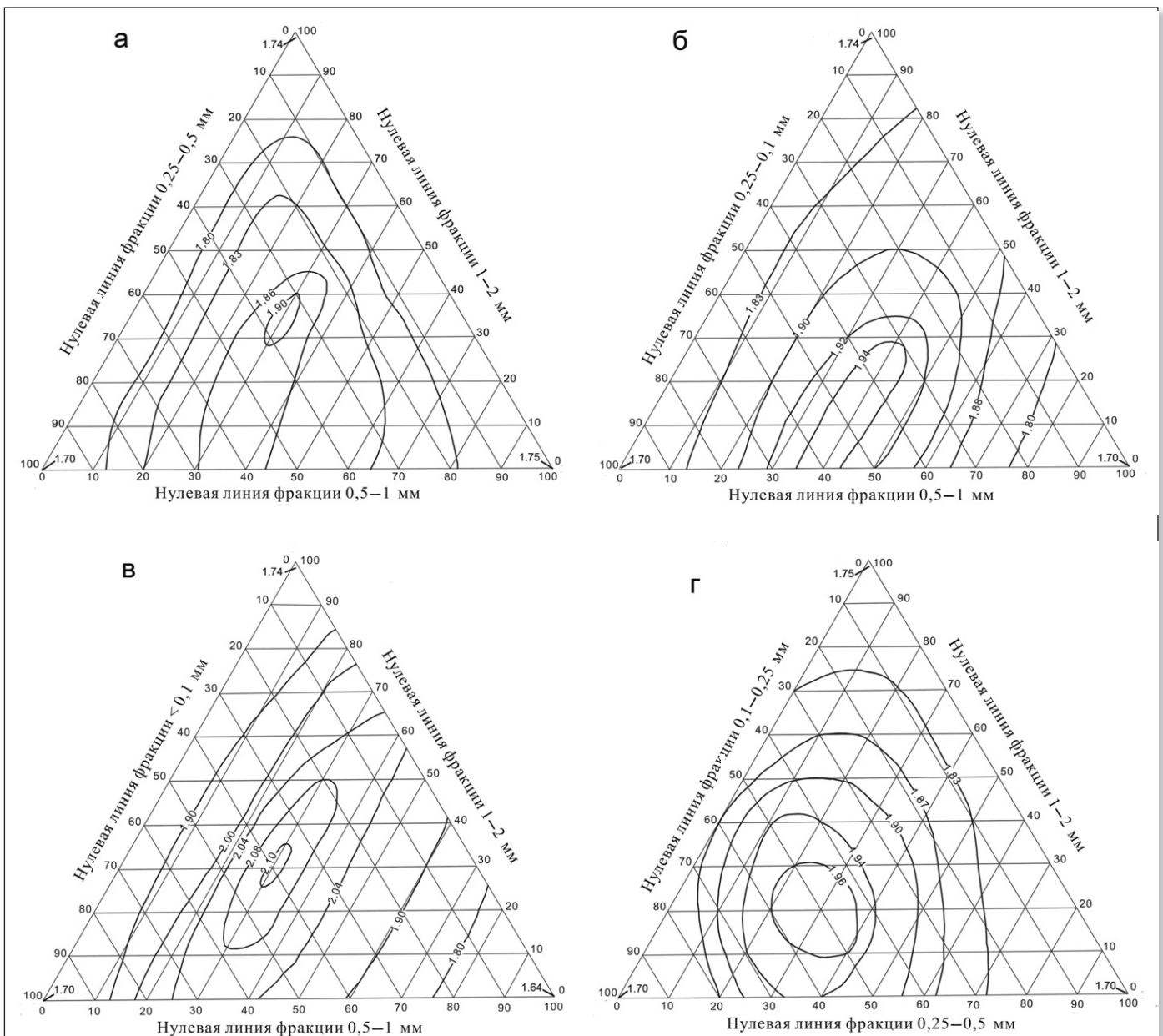


Рис. 5. Треугольные диаграммы изменений плотности скелета  $\rho_d$  (г/см<sup>3</sup>) смесей, состоящих из трех фракций с размерами частиц (мм): а — 1–2; 0,5–1; 0,25–0,5; б — 1–2; 0,5–1; 0,25–0,1; в — 1–2; 0,5–1; < 0,1; г — 1–2; 0,25–0,5; 0,1–0,25



то плотность скелета смеси  $\rho_d$  практически не меняется. На треугольных диаграммах это отражается в том, что по сторонам треугольника величина  $\rho_d$  остается постоянной (см. рис. 5).

Кроме того, из анализа треугольных диаграмм, представленных на рис. 5, следует, что при добавке к монодисперсному крупнозернистому грунту не одного, а двух заполнителей главную роль играет заполнитель с минимальным размером частиц. По сравнению с максимальными значениями плотности скелета  $\rho_d$  смесей, состоящих из двух фракций, величина  $\rho_d$  растет с уменьшением минимального диаметра частиц заполнителя. В нашем случае, когда минимальный размер частиц  $d_{\min}$  составляет менее 0,1 мм, величина плотности скелета  $\rho_d$  приобретает максимальное значение, которое составляет 2,1 г/см<sup>3</sup>. Тогда как при  $d_{\min} = 0,25 \div 0,5$  мм максимальное значение  $\rho_d$  уменьшается до 1,9 г/см<sup>3</sup>.

При добавлении более мелкозернистой фракции к двум другим составляющим смесь фракциям, имеющим постоянное процентное отношение по массе, плотность скелета  $\rho_d$  постепенно увеличивается до максимального значения.

Для смесей, состоящих из трех фракций, установлено, что максимальная плотность скелета  $\rho_d$  получается при условии, если процентное содержание каждой последующей по размеру частиц фракции относится к содержанию предыдущей примерно как 3:7 (см. рис. 5). Это обстоятельство позволяет целенаправленно смешивать различные дисперсные грунты с учетом указанного соотношения для получения смесей с максимальными (или минимальными) значениями плотности.

Аналогичные результаты следуют и из анализа треугольных диаграмм, построенных для значений коэффициента пористости  $e$  (рис. 6, а) и пористости  $n$  (рис. 6, б) смесей, состоящих из трех фракций. Эти диаграммы были получены расчетным путем на основе данных о плотности скелета для смесей, диаграммы для которых показаны на рис. 5, в, и известных значений плотности частиц фракций. С их помощью легко подобрать смесь из трех фракций для того, чтобы получить грунт с тем или иным требуемым значением пористости или коэффициента пористости. Такой подбор может оказаться особенно удобным в дорожном строительстве при создании дорожных насыпей с требуемой плотностью грунтов, а также при создании грунтовых плотин, дамб, искусственных оснований различных инженерных сооружений с контролируемой плотностью и пористостью. При этом дополнительных лабораторных экспериментов для обоснования состава подбираемых смесей не требуется.

Например, из рис. 6 следует, что при добавлении фракции с размером частиц менее 0,1 мм к смесям, состоящим из фракций с размером частиц 1,0–2,0 мм и 0,5–1,0 мм, имеющим постоянное процентное соотношение по массе, коэффициент пористости  $e$  и пористость  $n$  постепенно уменьшаются до минимальных значений, а затем снова увеличиваются. Критическая величина пористости также получается при условии, если процентное содержание каждой последующей по размеру частиц фракции относится к содержанию предыдущей примерно как 3:7.

## Результаты моделирования физико-механических свойств грунтовых смесей

**Деформационные свойства** песчаных грунтов оцениваются их модулем общей деформации  $E$ . Известно, что на деформируемость песчаных грунтов сильно влияет их плотность сложения: чем выше плотность грунта, тем ниже его деформируемость (выше значения  $E$ ) при прочих одинаковых условиях, и наоборот.

Вышеприведенные материалы показали, что плотность песчаных смесей зависит от количественного соотношения и размера частиц фракций в этих смесях, а максимальные значения плотности могут быть получены лишь при определенном соотношении содержания фракций (см. рис. 5). Поэтому следует ожидать, что значения модуля общей деформации смесей также будут зависеть от количественного соотношения в них фракций. Это предположение полностью подтверждает-

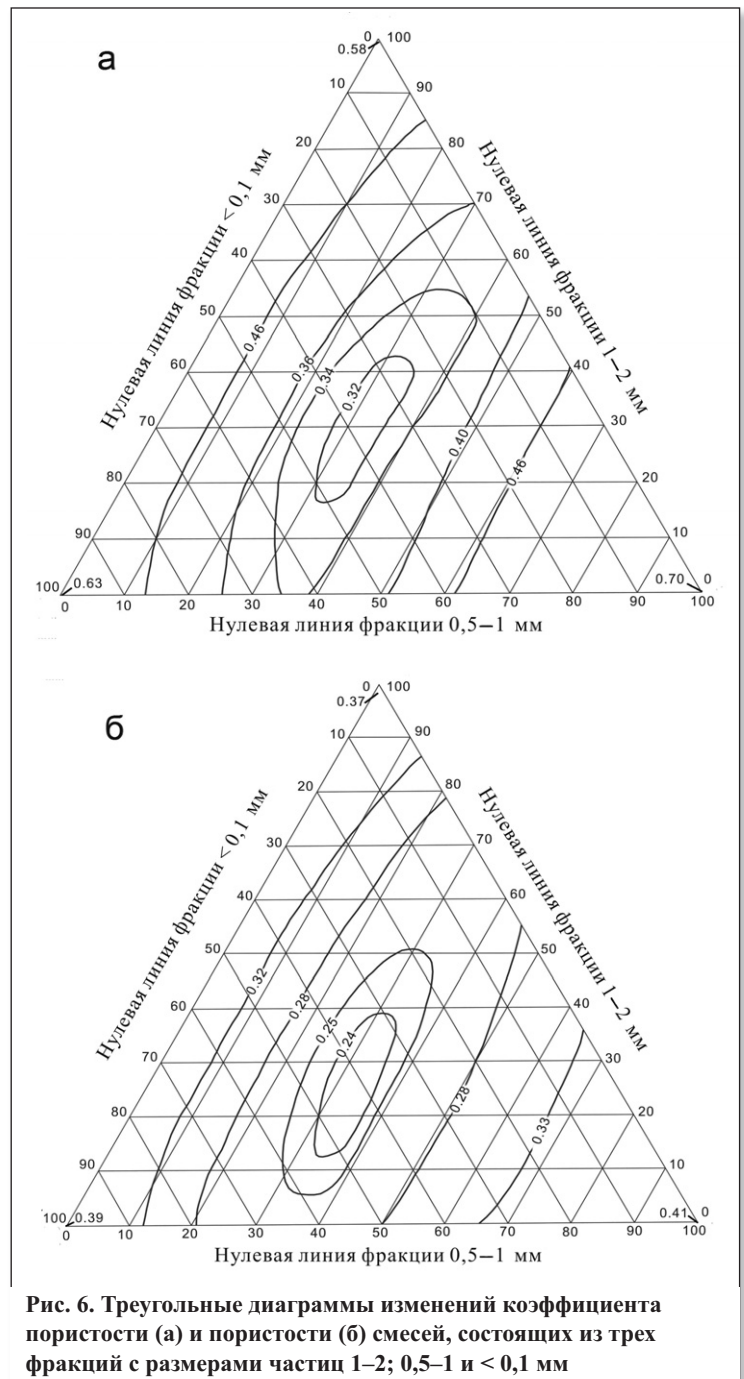


Рис. 6. Треугольные диаграммы изменений коэффициента пористости (а) и пористости (б) смесей, состоящих из трех фракций с размерами частиц 1–2; 0,5–1 и < 0,1 мм

ется результатами выполненных исследований, представленных на рис. 7. Из него следует общая закономерность изменений нормативных значений модуля общей деформации  $E$ : при добавлении мелких частиц к крупным величины  $E$  грунтовых смесей увеличиваются до максимальных, а потом постепенно уменьшаются. Другими словами, существует такая область, для которой можно получить грунтовые смеси, имеющие наибольшие нормативные значения  $E$ . Поскольку в данном случае нормативные величины  $E$  определялись по значениям пористости, то между соответствующими диаграммами для  $E$  и  $n$  наблюдается прямая связь.

Так же как и для плотности скелета, нормативные значения модуля общей деформации также, очевидно, обусловлены соотношением диаметров частиц фракций  $d_{\max}/d_{\min}$ . Чем больше это отношение, тем больше значение  $E$ . Критическая величина нормативного  $E$  также получится при условии, если процентное содержание каждой последующей по размеру частиц фракции относится к содержанию предыдущей примерно как 3:7.

**Прочностные свойства** песков оцениваются в основном по их углу внутреннего трения  $\varphi$ , поскольку величина сцепления у этих грунтов пренебрежимо мала. Что касается прочности песчаных смесей, Н.Н. Иванов показал [7], что их сопротивление трению обуславливается главным образом крупностью, однородностью, формой и окатанностью частиц. Оно больше при крупных однородных остроугольных частицах и несколько меньше при мелких разноразмерных окатанных [7].

Исследования авторов настоящей статьи также подтверждают эти данные. Результаты лабораторных определений величин угла внутреннего трения  $\varphi$  проанализированных смесей в виде треугольных диаграмм представлены на рис. 8. Из этого рисунка следует, что чем больше содержание в смеси крупнозернистой фракции (с размером частиц 1–2 мм), тем больше значение  $\varphi$ . Это обусловлено тем, что более крупные частицы, как правило, имеют более остроугольную форму и являются менее окатанными.

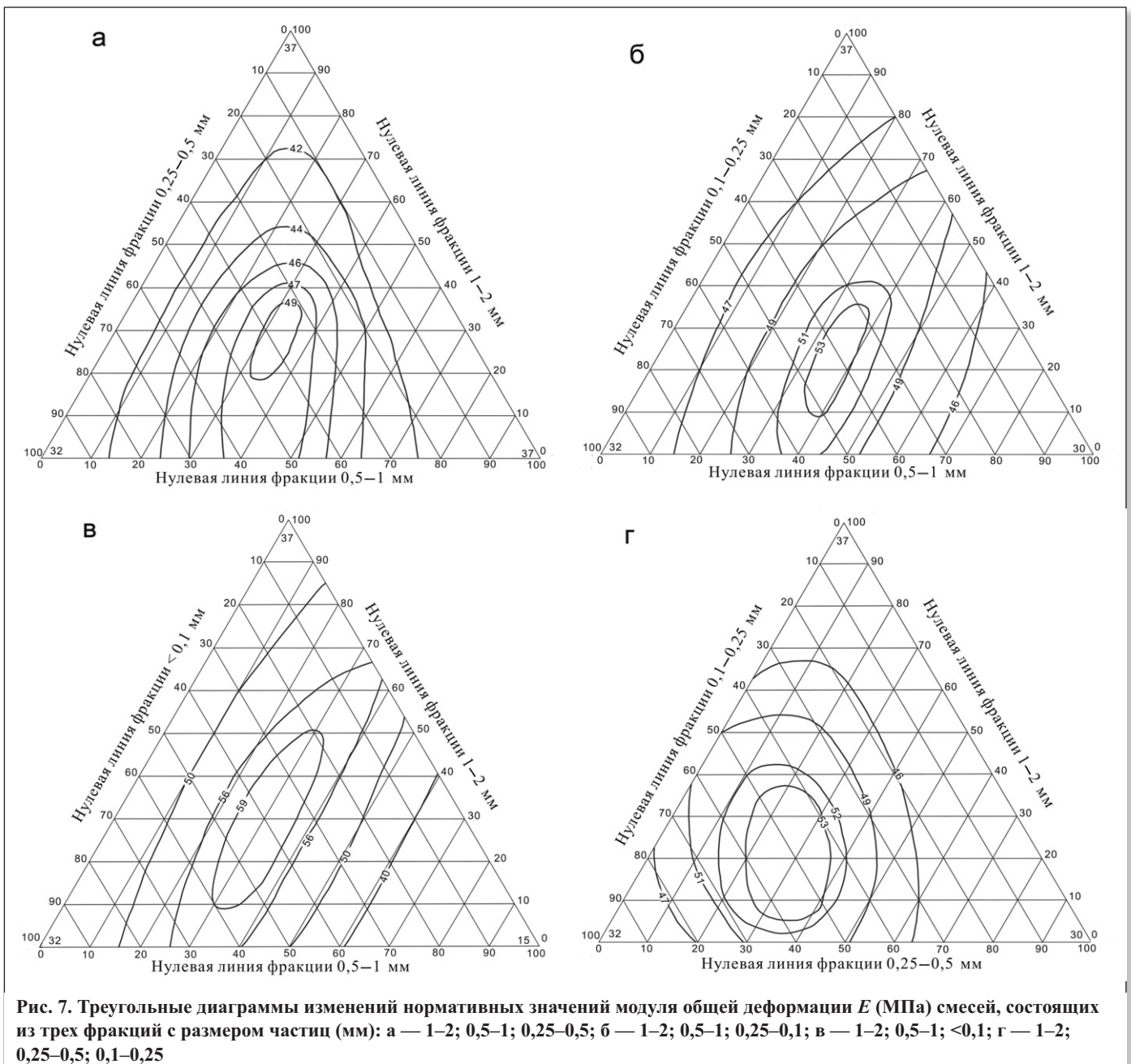


Рис. 7. Треугольные диаграммы изменений нормативных значений модуля общей деформации  $E$  (МПа) смесей, состоящих из трех фракций с размером частиц (мм): а — 1–2; 0,5–1; 0,25–0,5; б — 1–2; 0,5–1; 0,25–0,1; в — 1–2; 0,5–1; <0,1; г — 1–2; 0,25–0,5; 0,1–0,25



ми. Вследствие этого возрастает зацепление соседних частиц друг за друга. Кроме того, при плотном сложении на прочность смесей влияет главным образом содержание крупнозернистых фракций, хотя слишком большое их содержание приводит к некоторому уменьшению плотности скелета смешанных грунтов.

Добавление мелкозернистых фракций к крупнозернистым на начальном этапе позволяет повысить плотность скелета, но одновременно приводит к некоторому уменьшению прочности смесей — снижению величины  $\phi$ . Причем чем меньше угол внутреннего трения добавляемых фракций, тем резче меняются величины  $\phi$  получаемых смесей (рис. 8, б, в).

Из полученных данных также следует, что, в отличие от всех прочих рассмотренных параметров ( $\rho_d$ ,  $E$ ,  $n$  и т. д.), для угла внутреннего трения на треугольных диаграммах не выявляется замкнутая область с максимальными значениями  $\phi$ . Это, видимо, обусловлено тем, что при добавлении более мелких ча-

стиц меняется не только плотность смеси (от которой зависит  $\phi$ ), но и сам характер трения и зацепления частиц, определяющий область критических (или максимальных) значений  $\phi$ .

### Заключение

Обсудив полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Для гранулометрических смесей, состоящих из двух фракций:

- при добавлении к крупнозернистым грунтам мелкозернистых существенное изменение плотности скелета  $\rho_d$  достигается только при условии, если соотношение диаметров частиц составляющих смесь фракций  $d_{\max}/d_{\min} > 2:1$  (чем больше эта величина, тем плотнее смесь);
- самые плотные смеси получаются, когда содержание заполнителя составляет примерно 30% по массе.

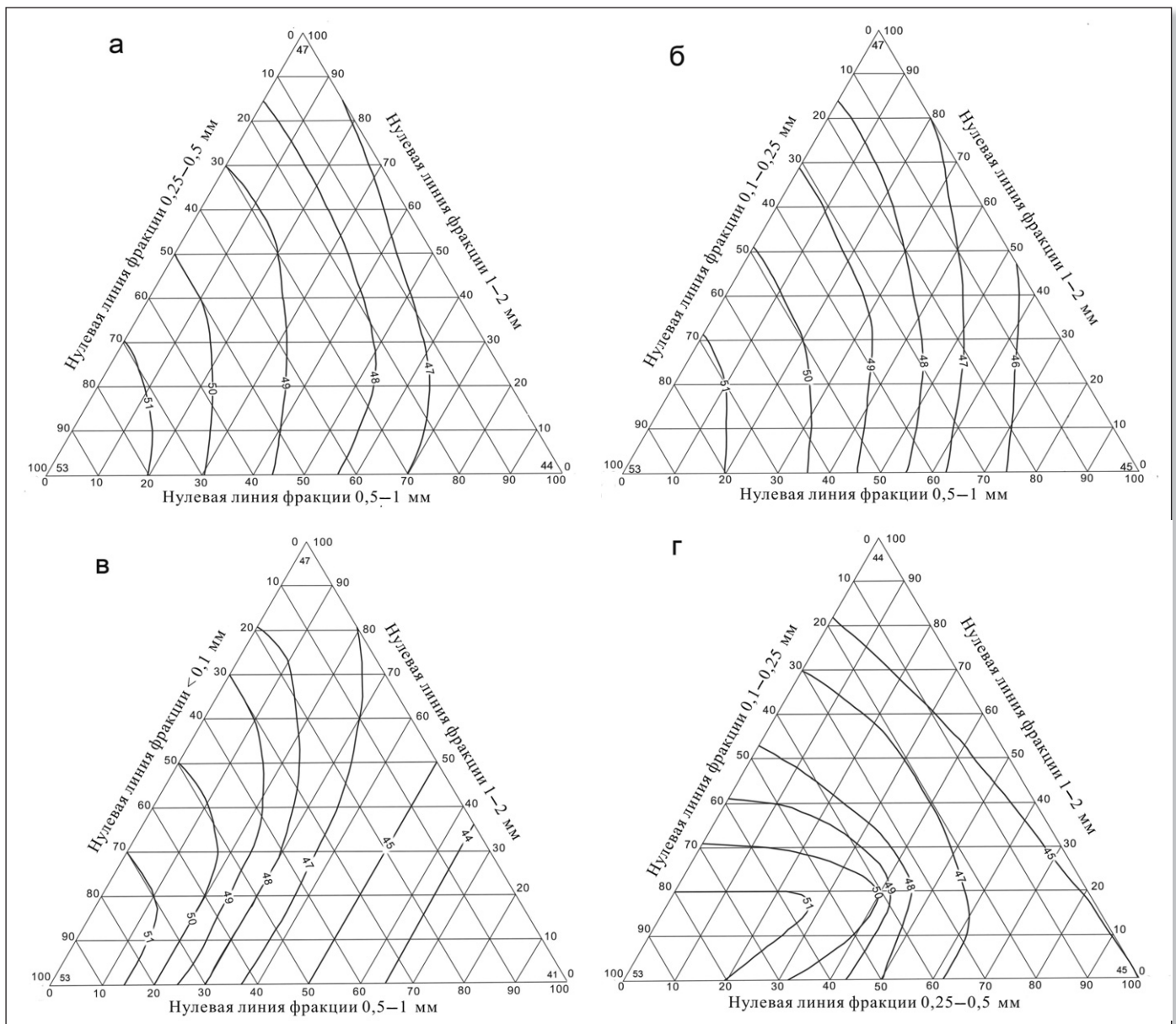


Рис. 8. Треугольные диаграммы изменений угла внутреннего трения  $\phi$  смесей, состоящих из трех фракций с размерами частиц (мм): а — 1–2; 0,5–1; 0,25–0,5; б — 1–2; 0,5–1; 0,25–0,1; в — 1–2; 0,5–1; < 0,1; г — 1–2; 0,25–0,5; 0,1–0,25



2. Для гранулометрических смесей, состоящих из трех фракций:

- плотность скелета  $\rho_d$  смесей в основном определяется соотношением диметров более крупных и более мелких частиц  $d_{\max}/d_{\min}$  (чем больше это отношение, тем больше плотность скелета созданной смеси);
- максимальная плотность скелета смеси из трех фракций получается при условии, если весовое содержание каждой последующей по размеру частиц фракции относится к содержанию предыдущей примерно как 3:7.

3. Для изменений коэффициента пористости  $e$  и пористости  $n$  характерны те же закономерности. Однако их величины изменяются обратно пропорционально изменениям плотности скелета.

4. Нормативные значения модуля общей деформации  $E$  изменяются пропорционально изменениям плотности скелета смесей.

5. На прочность смесей плотного сложения при ее оценке по углу внутреннего трения  $\phi$  влияет главным образом содержание крупнозернистых фракций. Чем меньше значение  $\phi$  добавляемой фракции, тем сильнее меняется величина  $\phi$  создаваемой смеси.

6. Предложенный метод моделирования, основанный на использовании треугольных диаграмм для анализа смесей, создаваемых из трех фракций, является удобным графическим способом подбора грунтовых смесей с заданными показателями физических и физико-механических свойств. Этот метод может успешно применяться в практике строительства и проектирования дорожных оснований или иных искусственных грунтов в основаниях различных инженерных сооружений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банник Г.И. Техническая мелиорация грунтов. М.: Высшая школа, 1976. 303 с.
2. Бируля А.К. Дороги из местных материалов. М.: Автотрансиздат, 1955. 140 с.
3. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
4. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. М.: Изд-во Московского университета, 1973. 376 с.
5. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2005.
6. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. (под ред. В.Т. Трофимова). М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
7. Иванов Н.Н., Пузаков Н.А., Тулаев А.Я., Андрулионис Е.П. Строительство автомобильных дорог (в 2-х частях) / под ред. Н.Н. Иванова. М.: Транспорт, 1969.
8. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
9. Оптимальные грунтовые смеси / Веб-сайт «Строительный архив». 2012. URL: <http://stroj-archive.ru/dorozhnye-materialy/109-optimalnye-gruntovye-smesi.html>.
10. Охотин В.В. Грунтоведение. СПб.: АНТТ-Принт, 2008. 231 с.
11. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986. 415 с.

**ЖУРНАЛ**

- о людях
- о землетрясениях
- о неустойчивых склонах и оползнях
- о вулканах
- о наводнениях и ураганах
- ...
- о прогнозировании и предупреждении ЧС
- о важности работы изыскателей

**ЖУРНАЛ**  
**GeoRisk**

ЖУРНАЛ

e-mail: [info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)