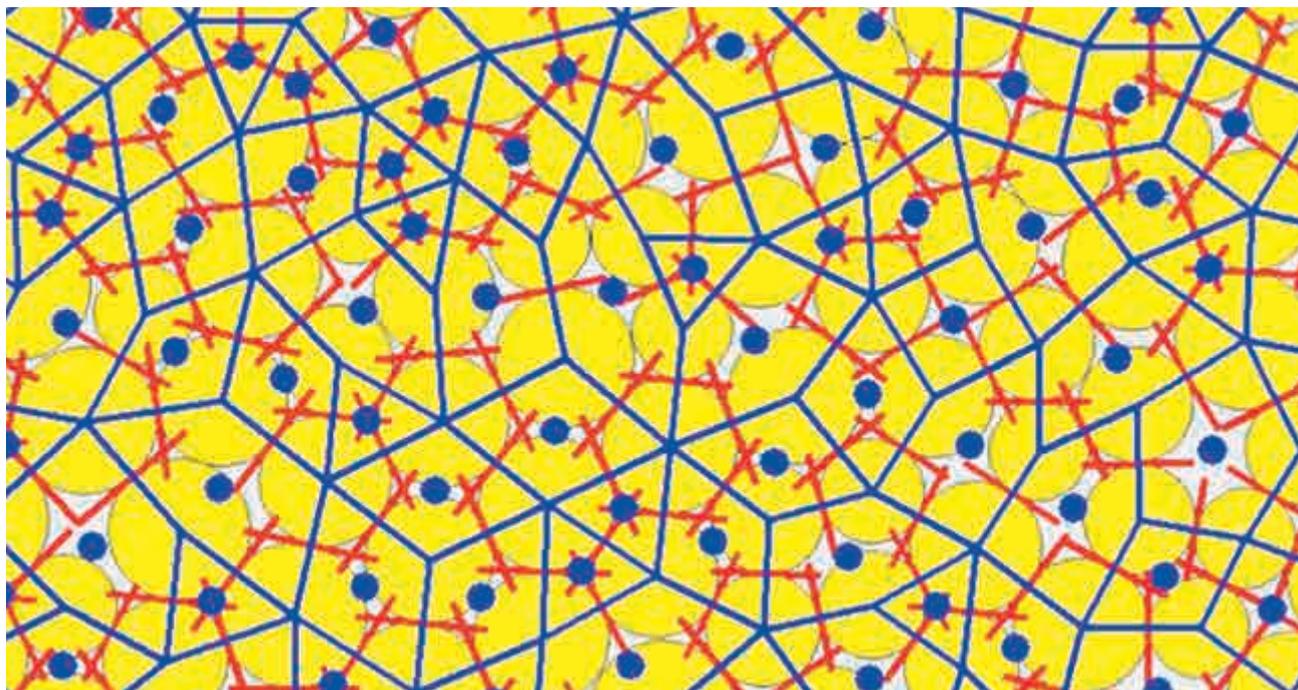


МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ ГРУНТОВЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ PFC

DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-6-20

УДК 624.131

**КОРОЛЕВ В.А.***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, va-korolev@bk.ru***ЧЖАН ШЭНЖУН***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, cash_040608@hotmail.com*

Аннотация

Физико-механические свойства гравийных и песчаных грунтов, а также смесей, изготовленных на их основе, необходимо рассматривать с позиций теории дискретной среды — как сыпучих тел. В последнее время все большее внимание ученых привлекают исследования физико-механических свойств несвязанных грунтов с помощью различных математических программ, созданных на основе теории дискретной среды. Статья посвящена рассмотрению вопроса создания модели несвязанных грунтов с заданными свойствами с учетом теории дискретной среды с использованием программы PFC. Она позволяет моделировать испытания сыпучих грунтов на сдвиг и оценивать влияние гранулометрического состава на величины угла внутреннего трения и сцепления испытываемых грунтовых смесей. Применение программы PFC для изучения физико-механических свойств грунтовых смесей очень актуально и весьма эффективно. Разработана и обоснована методика создания, исследования и моделирования смесей песчаных и песчано-гравийных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами, основанная на применении положений теории дискретной среды с помощью программы PFC. В соответствии с этой теорией распределение напряжений в дисперсной системе зависит от ее гранулометрического состава. Установлено, что крупные частицы, составляющие «скелет» грунтовой смеси, при их содержании более 30% по массе в наибольшей мере ответственны за формирование поля напряжений в объеме грунта: передача контактных напряжений внутри грунтовых смесей при сдвиге или уплотнении нормальной равномерно распределенной нагрузкой происходит преимущественно через крупные («скелетные») фракции. При массовом содержании в смеси заполнителя меньше 30% контакты между частицами формируются преимущественно «скелетными» частицами. Если массовое содержание заполнителя превышает 30%, то постепенно развиваются контактные напряжения между соседними мелкими частицами, а также напряжения между «скелетными» и более мелкими частицами. При этом прочность песчано-гравийных смесей, оцениваемая углом внутреннего трения, уменьшается и стремится к прочности самого заполнителя.

Ключевые слова:

грунтовая смесь; песок; гравий; физико-механические свойства; дискретная среда; программа PFC; контактное напряжение; угол внутреннего трения; сцепление

Ссылка для цитирования:

Королёв, В.А., Чжан Шэнжун, 2018. Моделирование физико-механических свойств песчано-гравийных грунтовых смесей с помощью программы PFC. Инженерная геология, Том XIII, № 1–2, с. 6–20. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-6-20.

MODELING OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF SAND-GRAVEL SOIL MIXTURES BY PFC-SOFTWARE

KOROLEV V.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, va-korolev@bk.ru

ZHANG SHENGRONG

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, cash_040608@hotmail.com

Abstract

The physical and mechanical properties of gravel and sandy soils, as well as mixtures made on their basis, must be considered from the standpoint of the theory of a discrete medium — as loose bodies. Recently, more and more scientists are attracted to the research of physical and mechanical properties of loose soils with the help of various mathematical programs created on the basis of discrete medium theory. The article is devoted to the problem of creating loose soils with given properties taking into account the theory of a discrete medium using the PFC software. It allows to simulate tests of loose soils on shear and to assess the effect of the grain size distribution on the magnitude of the angle of internal friction and the adhesion of test ground mixtures. PFC software is very relevant and effective when studying the physical and mechanical properties of ground mixtures. The technique of creation, research and modeling of mixtures of sandy and sandy-gravel soils with given physical and physical-mechanical properties is developed and justified, based on the application of the theory of discrete medium with the help of the PFC software. In accordance with this theory, the distribution of stresses in a dispersed system depends on its granulometric composition. It is established that the large particles that make up the "skeleton" of the soil mixture, when they compose more than 30% by weight, are most responsible for the formation of a stress field in the soil's volume: the transfer of contact stresses within soil mixtures during shear or compacting by a uniformly distributed load occurs predominantly through large fractions («skeletal» fractions). When the mass content in the aggregate mixture is less than 30%, contacts between the particles are formed mainly by «skeletal» particles. If the mass content of the aggregate exceeds 30%, then contact stresses between adjacent fine particles develop gradually, as well as stresses between «skeletal» and smaller particles. At the same time, the strength of sand-gravel mixtures, estimated by the angle of internal friction, decreases and tends to the strength of the aggregate itself.

Key words:

soil mixture, sand, gravel, physico-mechanical properties, discrete medium, PFC-software, contact stress, angle of internal friction, cohesion

For citation:

Korolev, V.A., Zhang Shengrong, 2018. Modeling of physical-mechanical properties of sand-gravel soil mixtures by PFC-software. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 1–2, pp. 6–20. DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-6-20.

Введение

Физико-механические свойства несвязных грунтов (крупнообломочных грунтов, песков, а также искусственных смесей, созданных на их основе) должны рассматриваться с позиций теории дискретной среды, а не на основе теории сплошной среды, как это делается в большинстве случаев в механике грунтов. Под дискретной средой понимается совокупность отдельных частиц, каждая из которых, взятая в отдельности, обладает всеми свойствами твердого тела, а механическое взаимодействие между ними определяется особенностями контактов между ними и контактными напряжениями^{1,2}.

Отличительной чертой модели дискретной среды является рассмотрение отдельных элементов ее структуры как механически взаимодействующих тел, иными словами, сыпучее (несвязное) тело принимается состоящим из отдельных частиц с учетом механических структурных связей между ними (зацепления) и трения. Элементами структуры модели дискретной среды являются зерна (частицы) сыпучего материала. Наиболее простым примером модели дискретной среды является система взаимодействующих шаров или цилиндров^{1,2} [1, 11].

Исходя из этого, изучение закономерностей физико-механических свойств грунтовых песчаных и песчано-гравийных смесей, создаваемых с заданными свойствами, с помощью модели дискретной среды является одним из эффективных способов, все более широко используемым в мире для подобных исследований [3–5, 8–13].

В последнее время возрастающее внимание ученых всего мира привлекают исследования физико-механических свойств несвязных грунтов с помощью различных математических программ, созданных на основе теории дискретной среды. Такими основными программами, созданными на базе теории дискретной среды и применяемыми для изучения несвязных грунтов, являются: UDEC, 3DEC, PFC, GRANULE, BLOKS3D, 2D-BLOCK, TRUDEC и SUPER-DEM [11, 13]. Среди них программа PFC («Particle Flow Code» или «Закон течения частиц») представляет собой одну из наиболее эффективных программ, успешно применяемую для анализа физико-механических свойств дисперсных грунтов с частицами микроскопического и более крупного масштаба [5, 6]. С помощью этой программы можно моделировать движение и взаимодействие частиц с точки зрения теории дискретной среды. Причем частицы могут рассматриваться как отдельные, так и соединенные

¹ Иванов, П.Л., 1985. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Высшая школа, М.

² Белов, В.В., Образцов, И.В., Иванов, В.К., Коноплев, Е.Н., 2015. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач. ТвГТУ, Тверь.

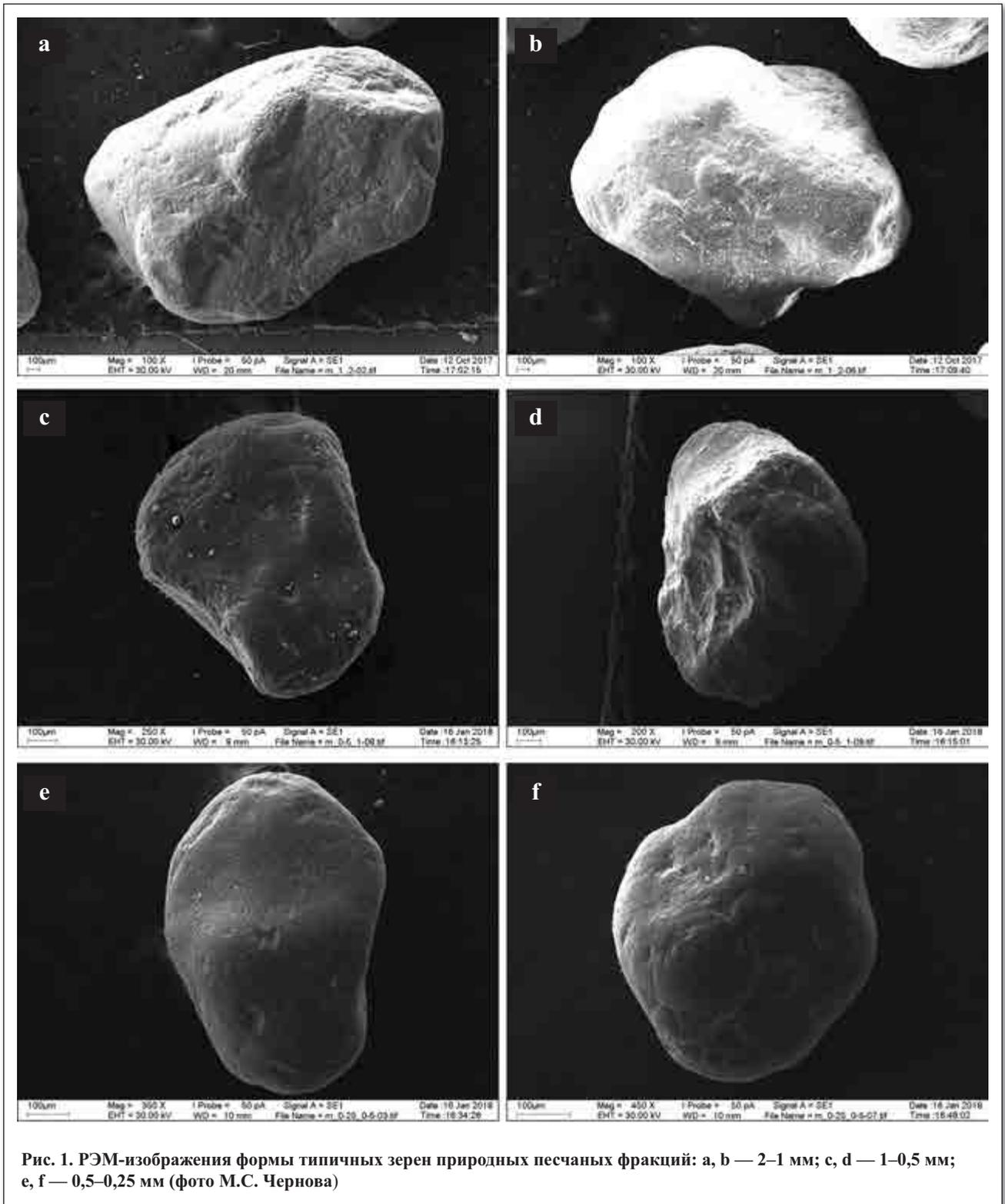


Рис. 1. РЭМ-изображения формы типичных зерен природных песчаных фракций: а, б — 2–1 мм; с, д — 1–0,5 мм; е, ф — 0,5–0,25 мм (фото М.С. Чернова)

с другими частицами в виде массива частиц (континуума). В связи с этим применение программы PFC для изучения влияния гранулометрического состава на физико-механические свойства и их моделирование очень актуально и весьма перспективно.

Исходя из этого, целью настоящей статьи является анализ физико-механических свойств искусственных песчаных и песчано-гравийных смесей, создаваемых с заданными свойствами, с помощью программы PFC, разработанной на основе теории дискретной среды. При этом необходимо было решить следующие задачи: 1. оценить возможность применения программы PFC для изучения

физико-механических свойств создаваемых песчано-гравийных смесей; 2. установить с помощью этой программы закономерности влияния гранулометрического состава смесей на их физико-механические свойства.

Характеристика исследуемых объектов

Для исследования авторами были выбраны песчаные фракции размером 2–1 мм, 1–0,5 мм, и 0,5–0,25 мм, изготовленные и выделенные из природных грунтов. Все исследуемые фракции по минеральному составу были кварцевыми для того, чтобы исключить влияние минерального состава на изучаемые физико-механические свойства.

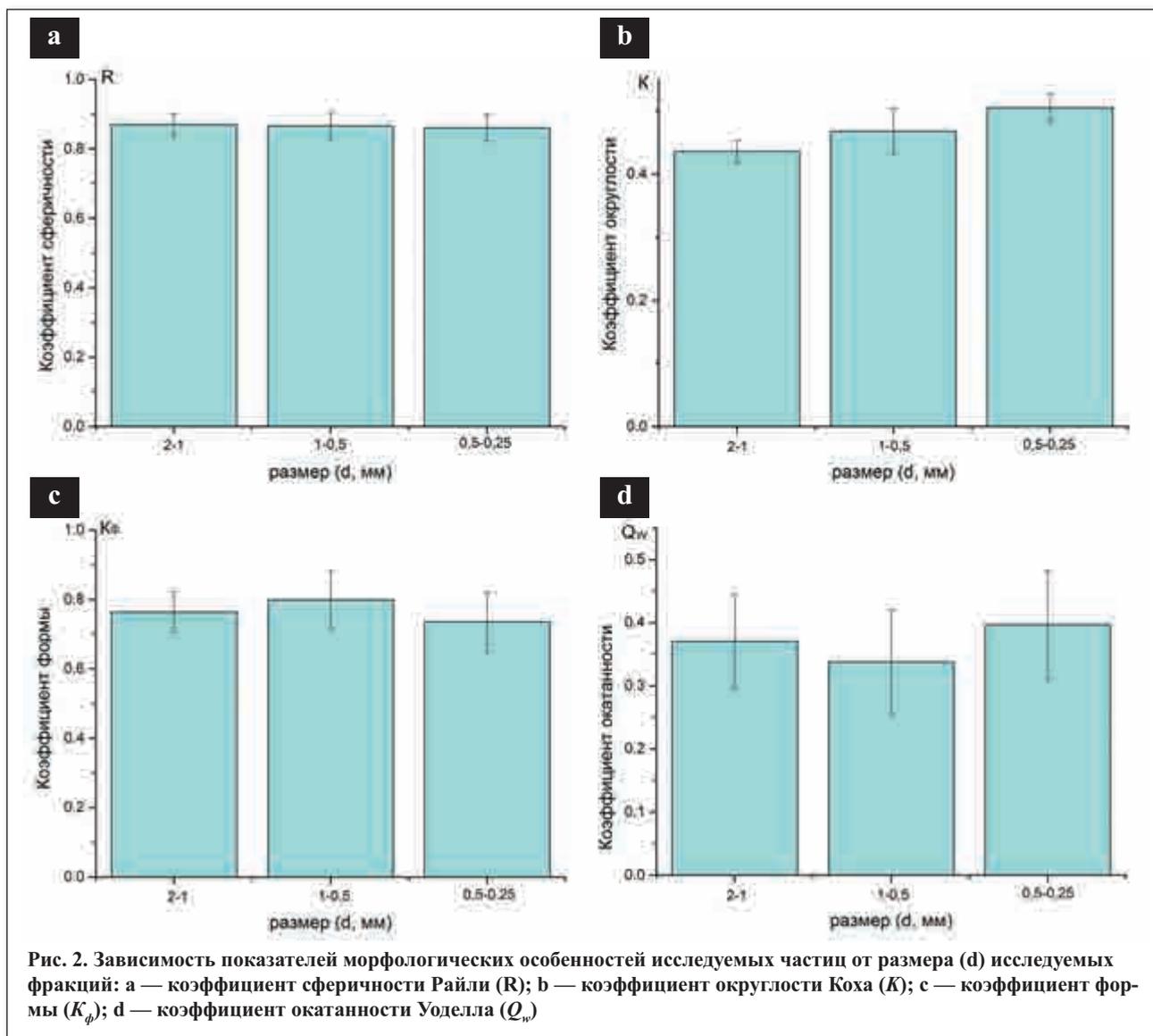


Рис. 2. Зависимость показателей морфологических особенностей исследуемых частиц от размера (d) исследуемых фракций: а — коэффициент сферичности Райли (R); б — коэффициент округлости Коха (K); с — коэффициент формы (K_φ); д — коэффициент окатанности Уделла (Q_w)

Кроме этого, для того, чтобы в исследовании исключить влияние морфологических особенностей частиц на физико-механические свойства изучаемых смесей, были выбраны частицы одинаковой формы. Все частицы изученных фракций имели окатанную форму (рис. 1).

Количественная оценка морфологических особенностей изучаемых частиц была исследована с помощью электронного микроскопа LEO 1450 VP с определением их следующих безразмерных показателей: коэффициента сферичности Райли (R), коэффициента округлости Коха (K), коэффициента формы (K_φ) и коэффициента окатанности Уделла (Q_w).

Из полученных результатов, приведенных на рис. 2, следует, что по морфологическим показателям частицы всех изученных фракций практически не отличаются друг от друга, что и требовалось в экспериментах. По классификации Петтиджона (1981 г.) частицы исследуемых фракций относятся к полуокатанным [1]. Таким образом, можно заключить, что влияние морфологии частиц на свойства изучаемых фракций и смесей из них является незначительным, и при моделировании этим влиянием можно пренебречь.

На основе этих исходных фракций разного размера было изготовлено несколько образцов грунтовых смесей. Среди них наиболее крупная фракция размером 2–1 мм

служила в виде «скелетной» части. Она смешивалась с другими более мелкими фракциями, выполнявшими роль заполнителя, при определенном массовом отношении.

В итоге были получены следующие образцы фракций и грунтовых смесей, состоящих из двух или трех фракций, для последующего их исследования: А) *монодисперсные* — обр. № 1: фракция 2–1 мм; обр. № 2: фракция 1–0,5 мм; обр. № 3: фракция 0,5–0,25 мм;

Б) *бидисперсные* — обр. № 4: смесь двух фракций 2–1 мм (70%) + 1–0,5 мм (30%); обр. № 5: смесь двух фракций 2–1 мм (50%) + 1–0,5 мм (50%); обр. № 6: смесь двух фракций 2–1 мм (30%) + 1–0,5 мм (70%);

В) *тридисперсные* — обр. № 7: смесь трех фракций 2–1 мм (60%) + 1–0,5 мм (20%) + 0,5–0,25 мм (20%); обр. № 8: смесь трех фракций 2–1 мм (40%) + 1–0,5 мм (30%) + 0,5–0,25 мм (30%); обр. № 9: смесь трех фракций 2–1 мм (20%) + 1–0,5 мм (40%) + 0,5–0,25 мм (40%).

Кроме того, в ходе проведения исследования стандартными методами были определены физические и физико-механические свойства вышеперечисленных образцов: плотность твердых частиц (ρ_s), при плотном сложении плотность скелета (ρ_d), пористость (n), коэффициент пористости (e), величины угла внутреннего трения (φ) и сцепления. Все данные по этим свойствам представлены в табл. 1.

| Характеристика физических свойств исследуемых образцов грунтов | | | | | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Показатель | Номера образцов и значения показателей: | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Плотность твердых частиц, ρ_s (г/см ³) | 2,65 | | | | | | | | |
| Плотность скелета, ρ_d (г/см ³) | 1,70 | 1,74 | 1,75 | 1,77 | 1,80 | 1,75 | 1,87 | 1,90 | 1,88 |
| Пористость, n (д.ед.) | 0,35 | 0,34 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,34 | 0,29 | 0,28 | 0,29 |
| Коэффициент пористости, e (д.ед.) | 0,55 | 0,52 | 0,51 | 0,49 | 0,46 | 0,50 | 0,41 | 0,39 | 0,41 |
| Угол внутреннего трения, ϕ (град.) | 53 | 47 | 44 | 51 | 49 | 47 | 50 | 48 | 48 |

Методика моделирования грунтов с заданными свойствами с помощью программы PFC

Хорошо известно, что физические и физико-механические свойства дисперсного грунта зависят в первую очередь от его гранулометрического состава. В этой связи нами изучалось его влияние на деформационные и прочностные характеристики грунтов, в том числе проводился поиск такого оптимального гранулометрического состава смеси, при котором прочность грунта и его устойчивость к деформированию были бы максимальными¹. С этой же целью проводилось и моделирование оптимального состава грунтовых песчаных и песчано-гравийных смесей, в нашем случае двумя способами: 1. с помощью программы PFC; 2. прямым экспериментальным методом. Для одной и той же фракции или одной и той же изучаемой смеси при плотном сложении определялся угол внутреннего трения как по результатам экспериментальных сдвиговых испытаний с помощью сдвигового прибора марки VCB-25, так и по результатам математического моделирования по программе PFC.

В общем случае, моделирование с помощью программы PFC осуществляется в следующие этапы: 1. подготовки и создания геометрической модели; 2. динамического моделирования процесса сдвига; 3. обработки и контроля достоверности результатов.

Этап подготовки и создания геометрической модели

На этом этапе прежде всего необходимо выбрать вид испытания и параметры, используемые для построения модели. Для модели, испытываемой на сдвиг, к таким параметрам относятся: размер ячейки сдвигового прибора (длина L и высота H), исходные характеристики образцов (размер и форма (R) частиц, плотность частиц (ρ_s), пористость (n), гранулометрический состав (задаваемый содержанием (%) частиц определенной фракции), величины жесткости нормального (K^n) и касательного (K^s) направления и коэффициент трения меж-

ду частицами (f), а также параметры самого испытания (т.е. способ нагружения, скорость сдвига (v), величины внешних нормальных нагрузок (σ) и др.). В нашем исследовании размер ячейки сдвигового прибора составлял 6,18 x 2 см (рис. 3, a). На верхней границе ячейки действуют нормальные напряжения (σ), а касательные напряжения (τ) прикладываются к верхней половине боковой стенки ячейки (см. рис. 3, a).

В программе PFC форма частиц выбирается и задается правильной или неправильной. Обычно, частицы в модели задают круглой формы за исключением тех случаев, при которых морфологические особенности частиц сильно влияют на их свойства при исследовании. Таким образом, на основе заданного размера частиц образца, а также плотности частиц, пористости и гранулометрического состава можно легко обратным расчетом получить количество частиц, которые содержатся в ячейке прибора. В программе создаваемые частицы образуются произвольно, а их распределение подчиняется закону распределения Гаусса. Примеры геометрического распределения шарообразных частиц в ячейке для моно- и бидисперсной модели показаны на рис. 4.

Кроме того, в PFC-модели учитывается характер контактов между дискретными частицами, который имеет очень важное значение для построения модели, так как все взаимодействия между соседними частицами и взаимодействия частиц с границами ячейки формируются за счет наличия этих контактов. Другими словами, дискретное взаимодействие обуславливается контактами.

Известно, что контакты между частицами несвязных грунтов (песчаных и крупнообломочных) отличаются от таковых для связных грунтов прежде всего ввиду возможного действия на контакт тех или иных категорий воды. В программе PFC предлагается несколько моделей контакта для выбора. Среди них можно выбрать модель жесткого сухого контакта, модель вязкого контакта, модель скольжения и др. Поскольку в нашем случае исследуемые объекты являются несвязными песчаными части-

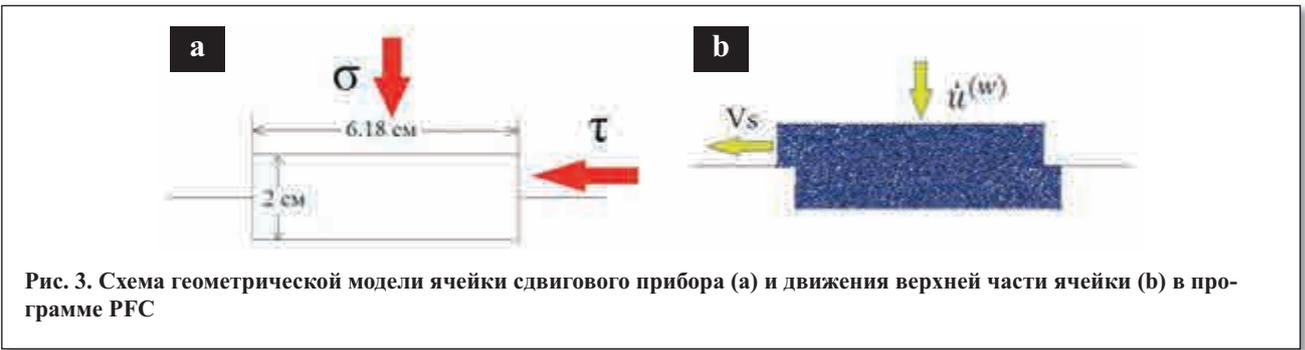


Рис. 3. Схема геометрической модели ячейки сдвигового прибора (a) и движения верхней части ячейки (b) в программе PFC

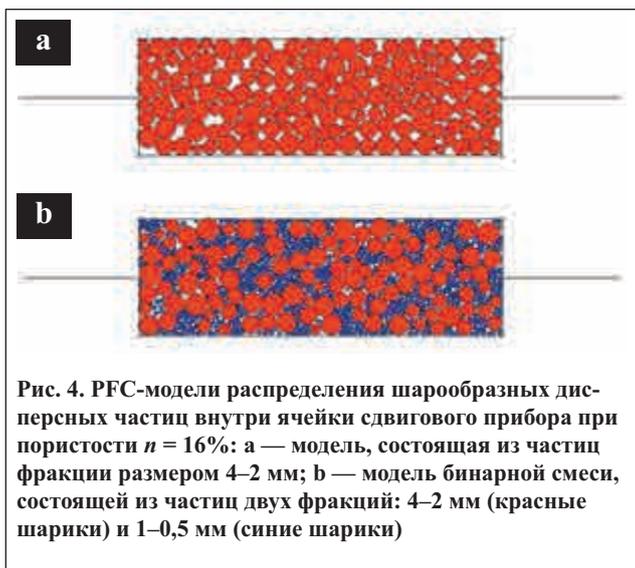


Рис. 4. PFC-модели распределения шарообразных дисперсных частиц внутри ячейки сдвигового прибора при пористости $n = 16\%$: а — модель, состоящая из частиц фракции размером 4–2 мм; б — модель бинарной смеси, состоящей из частиц двух фракций: 4–2 мм (красные шарики) и 1–0,5 мм (синие шарики)

цами, то между ними отсутствуют вязкие силы трения. Исходя из этого, нами была выбрана модель жесткого сухого контакта между частицами.

При этом в модели жесткого контакта существуют два типа контактов: «частица с частицей» и «частица со стенкой» (границей) ячейки (рис. 5).

Нормальные контактные силы между частицами или между частицей и стенкой получаются из следующих уравнений:

$$F_i^n = K^n U_i^n n_i$$

$$U_i^n = R^{[A]} + R^{[B]} - d \quad (\text{для контакта: частица с частицей})$$

$$U_n = R^{[b]} - d \quad (\text{для контакта: частица со стенкой}), \text{ где}$$

F_i^n — нормальные контактные силы, K^n — величины жесткости контакта нормального направления, n_i — единичный нормальный вектор, U_i^n — дублированная часть, $R^{[A]}$, $R^{[B]}$, $R^{[b]}$ — радиус частиц А, В и b, d — расстояние между центральными точками частиц.

Касательные контактные силы получают путем суммирования их приращений, согласно уравнениям:

$$\Delta F_i^s = K^s \Delta U_i^s$$

$$\Delta U_i^s = V_i^s \Delta t$$

$$F_i^s \leftarrow F_i^s + \Delta F_i^s,$$

где F_i^s — касательные контактные силы, ΔF_i^s — приращение касательных контактных сил, K^s — величины жесткости контакта касательного направления, ΔU_i^s — приращение касательного смещения, V_i^s — касательная скорость движения, Δt — приращения времени.

Исходя из этого, можно заключить, что контакт характеризует зависимость контактных сил между частицами от их смещения в двух направлениях: нормального и касательного. Жесткость нормального и касательного направлений является важным параметром, определяющим контактные силы между частицами. Таким образом, перед созданием модели необходимо определить величины параметров (K^n) и (K^s). Их значения зависят от особенностей состава задаваемых частиц. Обычно, когда отношение $K^n/K^s = 1\text{--}3$, созданная модель имеет хорошую сходимость [7, 11].

Необходимо отметить, что величины жесткости нормального (K^n) и касательного (K^s) направления связаны с размером частиц исследуемых фракций. Обычно имеется линейная связь между величинами жесткости и размером частиц [11]. Поэтому за величины жесткости в моделях исследуемых грунтовых смесей принимали средние арифметические величины жесткости составляющих фракций. Все исходные параметры для моделирования представлены в табл. 2.

Этап динамического моделирования процесса сдвига

На основе вышеизложенных параметров в программе PFC можно создать геометрическую модель любого требуемого грунта или грунтовой смеси. В этой программе внешние напряжения (нормальные и касательные) задаются через перемещение верхней поверхности и боковой стенки сдвиговой ячейки соответственно (рис. 3, б). Вертикальные нагрузки (σ) в модели задаются и осуществ-

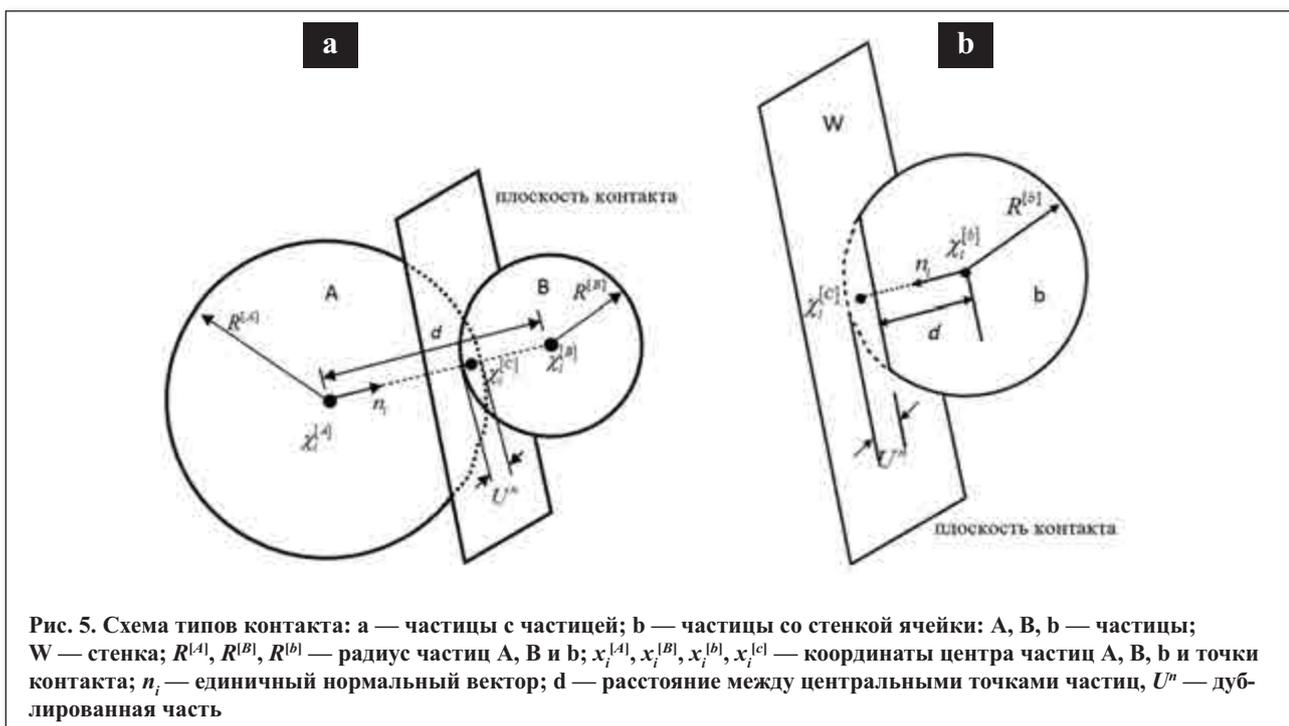


Рис. 5. Схема типов контакта: а — частицы с частицей; б — частицы со стенкой ячейки; А, В, b — частицы; W — стенка; $R^{[A]}$, $R^{[B]}$, $R^{[b]}$ — радиус частиц А, В и b; $x_i^{[A]}$, $x_i^{[B]}$, $x_i^{[b]}$, $x_i^{[c]}$ — координаты центра частиц А, В, b и точки контакта; n_i — единичный нормальный вектор; d — расстояние между центральными точками частиц, U^n — дублированная часть

| Исходные параметры PFC-модели исследуемых образцов грунтов | | | | | | | | | |
|---|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|
| Показатель | Номера образцов и значения показателей: | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Плотность твердых частиц, ρ_s (г/см ³) | 2,65 | | | | | | | | |
| Плотность скелета, ρ_d (г/см ³) | 1,73 | 1,72 | 1,72 | 1,65 | 1,79 | 1,81 | 1,79 | 1,83 | 1,81 |
| Пористость, n (д.ед.) | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,16 | 0,13 | 0,14 | 0,15 |
| Жесткость нормального направления k_n (10 ⁸ н/м) | 2,5 | 1,25 | 0,625 | 2,125 | 1,875 | 1,625 | 1,875 | 1,5625 | 1,25 |
| Жесткость касательного направления k_s (10 ⁸ н/м) | 2,5 | 1,25 | 0,625 | 2,125 | 1,875 | 1,625 | 1,875 | 1,5625 | 1,25 |
| Коэффициент трения между частицами, f | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,45 | 0,4 | 0,5 | 0,45 | 0,4 |
| Длина (L) и высота (H) ячейки сдвигового прибора: L x H (см) | 6,18 x 2 | | | | | | | | |
| Нормальное напряжение, σ (кПа) | 100, 200, 300 | | | | | | | | |
| Скорость сдвига, v (м/мин) | 0,08 | | | | | | | | |

ляются через придание определенной скорости вертикального смещения верхней стенки сдвиговой ячейки ($u^{(w)}$). В ходе испытания на сдвиг внешние вертикальные нагрузки должны оставаться постоянными ($\sigma = \text{const}$). Это условие может обеспечиваться в программе с помощью так называемого «цифрового сервомеханизма», который придает верхней поверхности постоянную внешнюю нагрузку управлением скорости перемещения границы поверхности.

Для динамического моделирования сдвигового испытания необходимо также задать скорость горизонтального смещения (v_s) верхней подвижной части ячейки сдвигового прибора, при этом нижняя часть сдвигового прибора остается в статическом состоянии.

Таким образом, с помощью программы PFC можно в динамических условиях моделировать процесс сдвига при разном режиме нагружения (см. рис. 3, b).

Этап обработки и контроля достоверности результатов

В ходе динамического моделирования процесса сдвига программа PFC может автоматически фиксировать требуемые параметры (деформацию, касательные напряжения, координационные числа и др.). По полученным данным затем могут быть рассчитаны величины угла внутреннего трения (ϕ) и сцепления. При сравнении рассчитанных в программе PFC величин угла внутреннего тре-

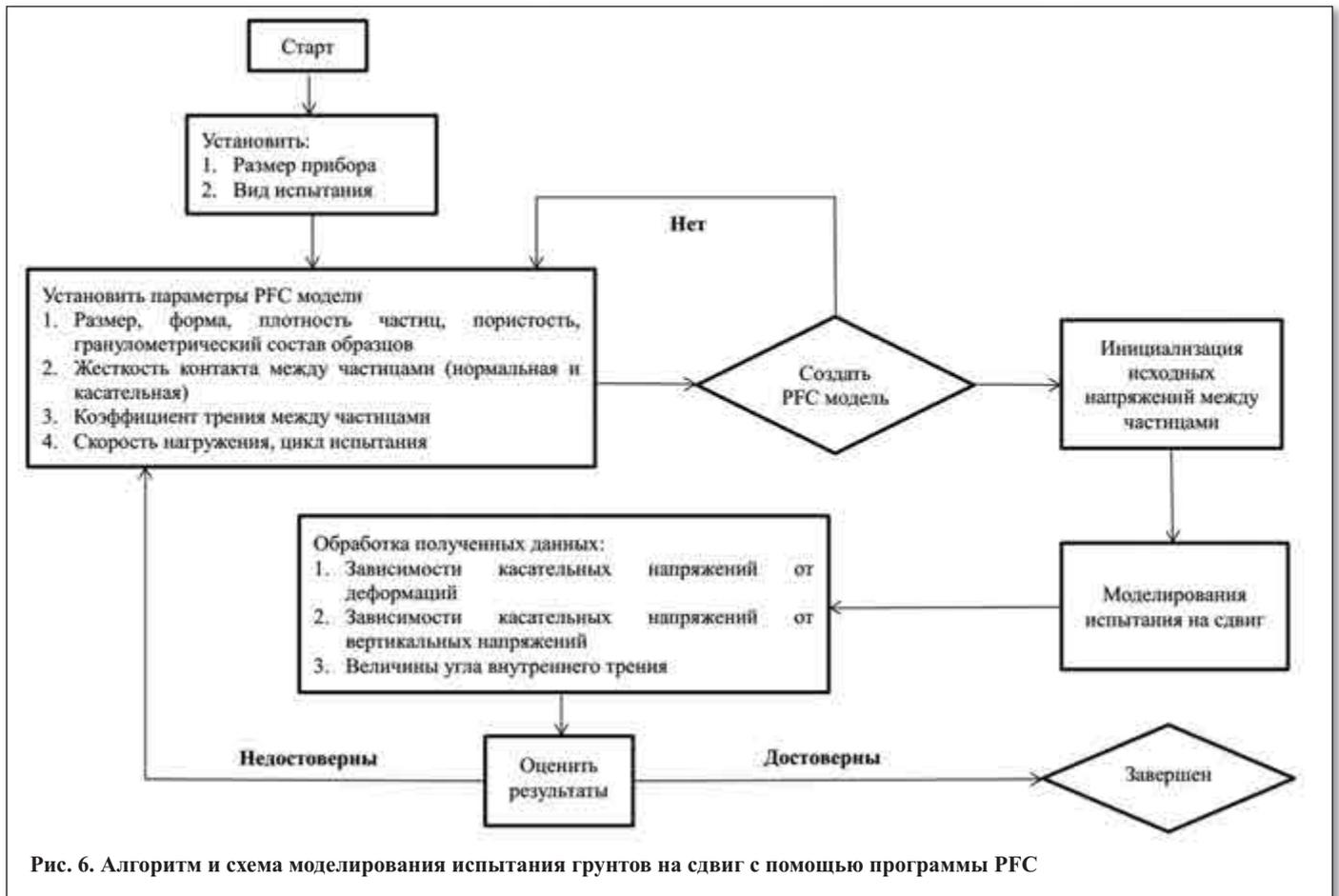


Рис. 6. Алгоритм и схема моделирования испытания грунтов на сдвиг с помощью программы PFC

ния с величинами, полученными в эксперименте, контролируется достоверность моделируемых параметров и получаемых результатов.

Если полученные результаты моделирования не соответствуют экспериментальным, то необходимо изменять величины исходных параметров (обычно, величины жесткости K^n и K^s и коэффициента трения) и вновь повторить процесс моделирования. Таким образом, осуществляется верификация применяемой модели (рис. 6).

Моделирование сдвиговых испытаний монодисперсных песчаных грунтов

В этой серии испытаний моделировались монодисперсные песчаные грунты, состоящие из окатанных и по-

луокатанных частиц (см. рис. 1). Результаты моделирования сдвигового испытания образцов, состоящих из этих фракций (2–1 мм, 1–0,5 мм и 0,5–0,25 мм), представлены ниже с помощью программы PFC (рис. 7).

Полученные данные подтверждают известный факт увеличения угла внутреннего трения (ϕ) с ростом размера частиц. Кроме того, видно, что кривые сдвига для крупных фракций размером 2–1 мм характеризуются большими скачками напряжений, чем кривые для более мелких фракций размером 1–0,5 мм и 0,5–0,25 мм, которые более плавные.

Эти многочисленные скачки напряжений (см. рис. 7, а) могут быть связаны с явлением дилатансии, а также с количеством задаваемых частиц в ячейке и отношением их

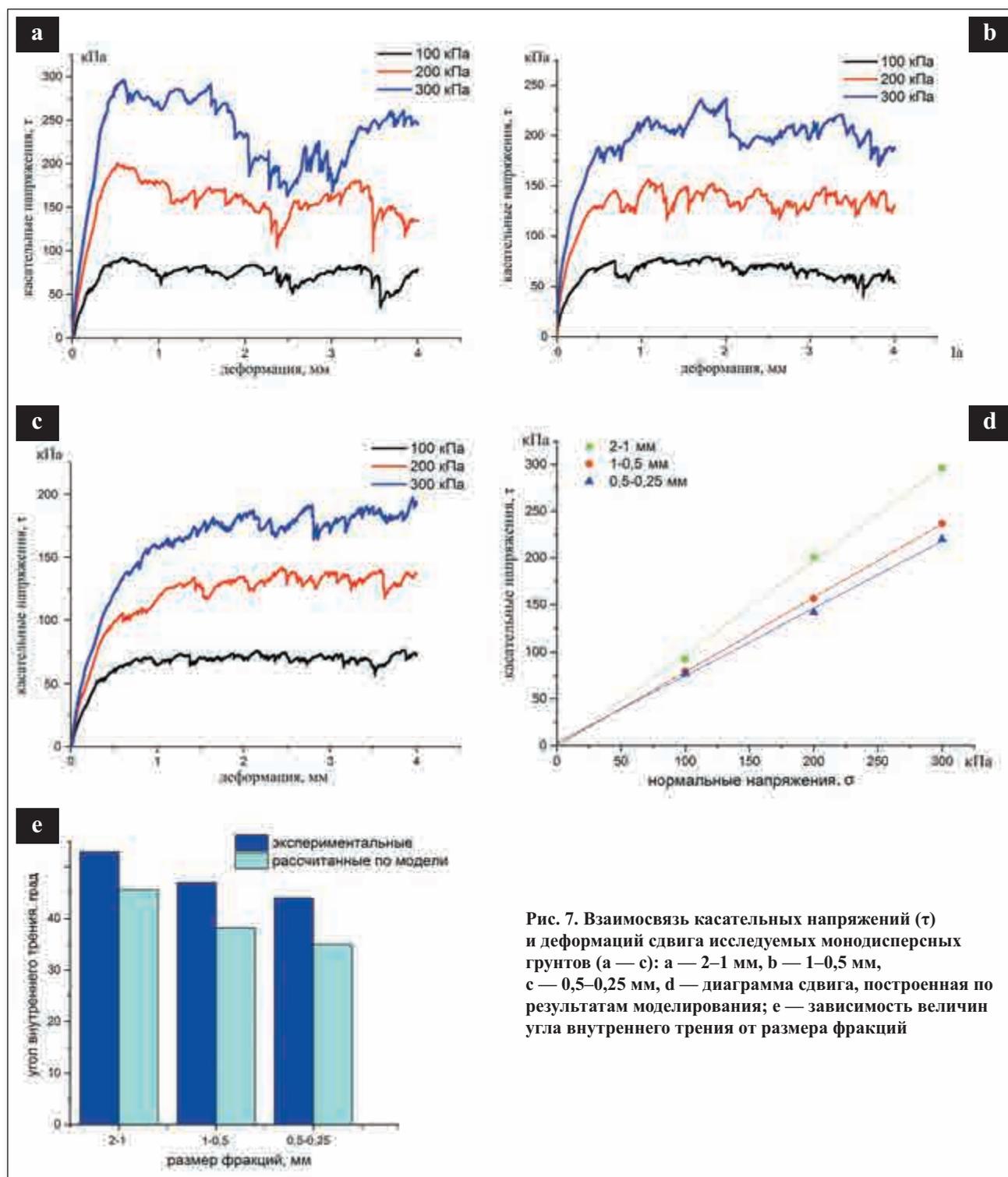


Рис. 7. Взаимосвязь касательных напряжений (τ) и деформаций сдвига исследуемых монодисперсных грунтов (а — с): а — 2–1 мм, б — 1–0,5 мм, с — 0,5–0,25 мм, д — диаграмма сдвига, построенная по результатам моделирования; е — зависимость величин угла внутреннего трения от размера фракций

Сопоставление результатов, полученных опытным путем и моделированием для монодисперсных грунтов

| Размер фракций, мм | Угол внутреннего трения, град | | $\varphi - \varphi'$, град | Относительная погрешность, $\frac{ \varphi - \varphi' }{\varphi}$, % | Сцепление, кПа |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|---|----------------|
| | Опытный, φ | Расчетный, φ' | | | |
| 2–1 | 53 | 45,6 | 7,4 | 14,02 | 0 |
| 1–0,5 | 47 | 38,2 | 8,8 | 18,72 | 0,79 |
| 0,5–0,25 | 44 | 35 | 9 | 20,45 | 3,19 |

размера (R) к размеру ячейки (L) [9]. Поскольку в опытах и модели испытывались грунты в плотном сложении, то в зоне сдвига происходит некоторое разуплотнение, что вызывает снижение напряжений сдвига, проявляющееся в виде скачков.

В случае испытаний более крупных фракций 2–1 мм в ячейке содержится меньшее количество частиц и формируется менее ровная плоскость сдвига. Это приводит к скачкам и нестабильности касательных напряжений. Увеличение отношения размера частиц (R) к размеру прибора (L) вызывает искажение результатов при моделировании, однако обычно при соотношении $L/R > 30$ влияние размера частиц снижается до минимального [8]. Это позволяет рассматривать результаты, полученные моделированием по программе PFC при $L/R > 30$, как достоверные.

Кроме того, в ходе сдвига частицы испытывают вращение и качение. При этом, более крупные частицы преодолевают большее сопротивление при сдвиге. В результате этого, с повышением размера частиц величины угла внутреннего трения закономерно увеличиваются (см. рис. 7, d), что подтверждает известный факт.

По полученным данным были рассчитаны модельные величины сцепления (C) и угла внутреннего трения (φ') исследуемых фракций, которые затем сравнивались с величинами углов внутреннего трения (φ), полученными опытным путем (табл. 3).

Из этих данных следует, что расчетные величины сцепления исследуемых фракций близки к нулю, а с уменьшением размера частиц величины сцепления немного повышаются. Что касается значений угла внутреннего трения, экспериментальные значения φ несколько выше модельных, что вполне объяснимо влиянием формы частиц. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями угла внутреннего трения составляет примерно 8 градусов, а относительная погрешность находится в диапазоне 14,02–20,45%. Можно считать, что расхождение обусловлено: 1. различием в морфологии между идеально шарообразными модельными и полукруглыми экспериментальными частицами (чем больше это различие, тем сильнее расхождение); 2. особенностями применяемого прибора для проведения сдвиговых испытаний. При этом, некоторое завышение экспериментальных значений φ по сравнению с расчетными объясняется, главным образом тем, что модельные частицы имеют идеально шарообразную форму, а экспериментальные — полукруглую, которая и обуславливает большее трение частиц.

Однако хотя и отмечается некоторое расхождение между расчетными и опытными значениями, в общем случае закономерности изменения величин угла внутреннего

трения, полученные с помощью программы PFC, практически совпадают с величинами, полученными экспериментальным путем.

Моделирование сдвиговых испытаний би- и тридисперсных смесей песчаных грунтов

Бидисперсные смеси. Для установления влияния гранулометрического состава на величины угла внутреннего трения бидисперсных грунтовых смесей к «скелетной» фракции (2–1 мм) добавлялась фракция заполнителя (1–0,5 мм). После этого, по методике, аналогичной вышеописанной, экспериментально определялись величины угла внутреннего трения созданных грунтовых смесей, которые затем сравнивались с их величинами, полученными моделированием по программе PFC. Результаты моделирования сдвига для бидисперсных песчаных смесей представлены на рис. 8.

Тридисперсные смеси. Для установления влияния гранулометрического состава на величины угла внутреннего трения тридисперсных грунтовых смесей к «скелетной» фракции (2–1 мм) добавлялись более мелкие песчаные фракции (1–0,5 мм и 0,5–0,25 мм) заполнителя в разном соотношении. Затем, также по методике, аналогично вышеописанной, экспериментально определялись величины угла внутреннего трения изучаемых грунтовых тридисперсных смесей, которые затем сравнивались с их величинами, полученными моделированием по программе PFC. Результаты моделирования сдвига для тридисперсных песчаных смесей представлены на рис. 9.

Из представленных данных видно, что расчетные величины сцепления смесей также близки к нулю, но они немного выше по сравнению с этими величинами для монодисперсных песчаных фракций.

Сравнение результатов оценки значений угла внутреннего трения, полученных путем моделирования по программе PFC, с экспериментальными показало, что результаты для би- и тридисперсных грунтовых смесей имеют расхождение около 8 градусов и относительную погрешность в диапазоне от 9,38 до 19%, которые в основном обусловлены, как отмечено выше, отличием морфологии частиц. Сопоставление этих данных представлено в табл. 4. Кроме того, некоторые различия обнаруживаются и при анализе кривых «деформация — напряжение сдвига» при относительно высоких нагрузках (см. рис. 8, a, b). Видно, что в ходе сдвига касательные напряжения снижаются или повышаются скачками. Возможно, что это связано с явлениями дилатансии грунтовых смесей при плотном сложении. Напомним, что все исследования авторами проводились для плотного сложения смесей. В общем случае закономерности изменения величин угла

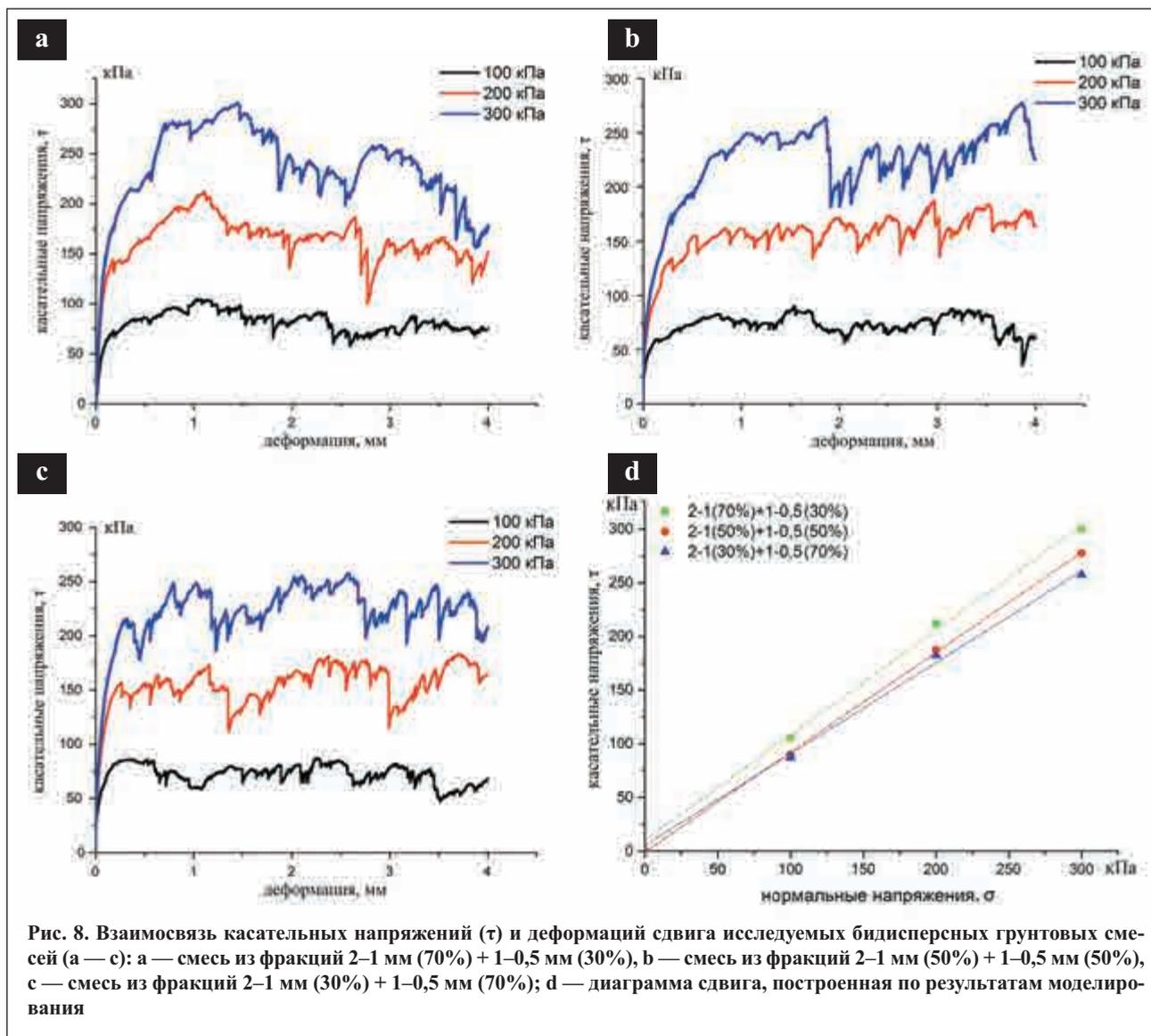


Рис. 8. Взаимосвязь касательных напряжений (τ) и деформаций сдвига исследуемых бидисперсных грунтовых смесей (a — c): a — смесь из фракций 2–1 мм (70%) + 1–0,5 мм (30%), b — смесь из фракций 2–1 мм (50%) + 1–0,5 мм (50%), c — смесь из фракций 2–1 мм (30%) + 1–0,5 мм (70%); d — диаграмма сдвига, построенная по результатам моделирования

внутреннего трения, полученные с помощью программы PFC, практически совпадают с величинами, полученными экспериментальным путем.

Также очевидно, что величины угла внутреннего трения би- и тридисперсных песчаных грунтовых смесей обусловлены, в основном, содержанием «скелетной» фракции (2–1 мм). При увеличении ее массового содержания величины угла внутреннего трения изучаемых грунтовых смесей возрастают (рис. 10). Таким образом, можно заключить, что прочность воздушно-сухих песчаных и песчано-гравийных грунтовых смесей определяется, в основном, содержанием в них наиболее крупных «скелетных» фракций.

С помощью программы PFC, основанной на модели дискретной среды, можно не только определять параметры сдвига для грунтов разного гранулометрического состава, но и оценивать распределение напряжений между отдельными частицами — то есть контактные напряжения, которые на графических моделях дисперсных систем отражаются линиями (лентами) на контакте двух соседних частиц. Ширина линии является масштабным отражением величины контактного напряжения: чем оно больше, тем шире линия.

На рис. 11 представлены графические модели распределения контактных напряжений в грунтовых песчаных

и песчано-гравийных смесях (т.е., состоящих из округлых частиц) при вертикальной равномерно-распределенной нагрузке 400 кПа и разным содержании «скелетной» фракции (4–2 мм), полученные с помощью программы PFC. Из рисунка следует, что передача наибольшего напряжения внутри таких грунтовых смесей сильно зависит от гранулометрического состава смеси. При этом, распределение основной доли контактных напряжений происходит преимущественно через контакты частиц наиболее крупных фракций, то есть — через «скелетные» фракции. Чем меньше в грунте содержание «скелетной» фракции, тем больше происходит рассеивание контактных напряжений по всему объему грунта, а сами напряжения на контактах, при этом, снижаются. Это подтверждает и объясняет положение о том, что прочность грунтовых песчано-гравийных смесей в первую очередь обусловлена содержанием в них наиболее крупных частиц.

Таким образом, рассеивание контактных напряжений внутри грунтовых смесей с ростом дисперсности постепенно увеличивается. При этом, прочность песчано-гравийной смеси в целом постепенно уменьшается и стремится к прочности самого мелкого заполнителя.

Наряду с этим, проведенные нами с помощью программы PFC исследования показали, что распределение контактных напряжений в несвязных дисперсных грун-

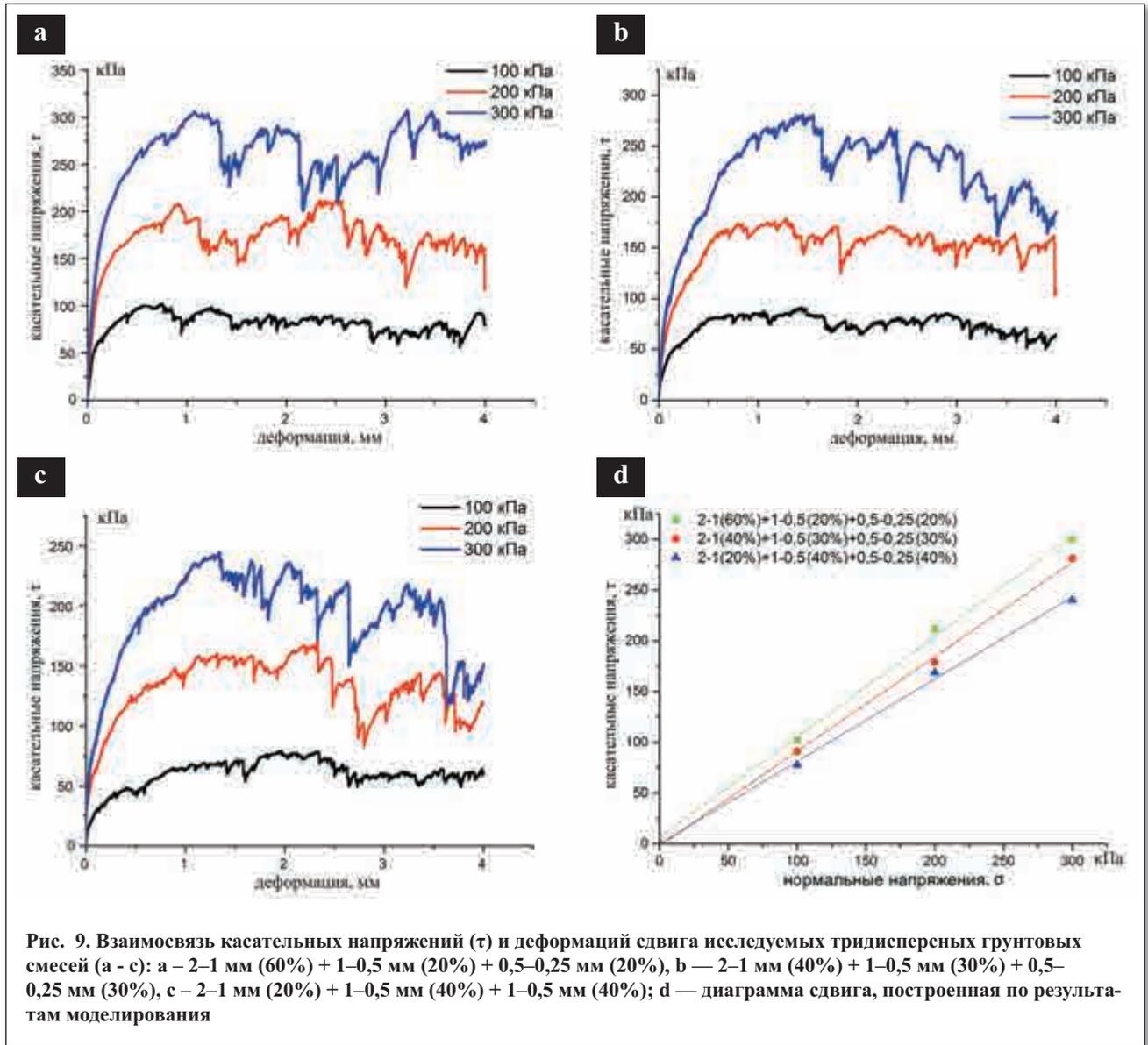


Таблица 4

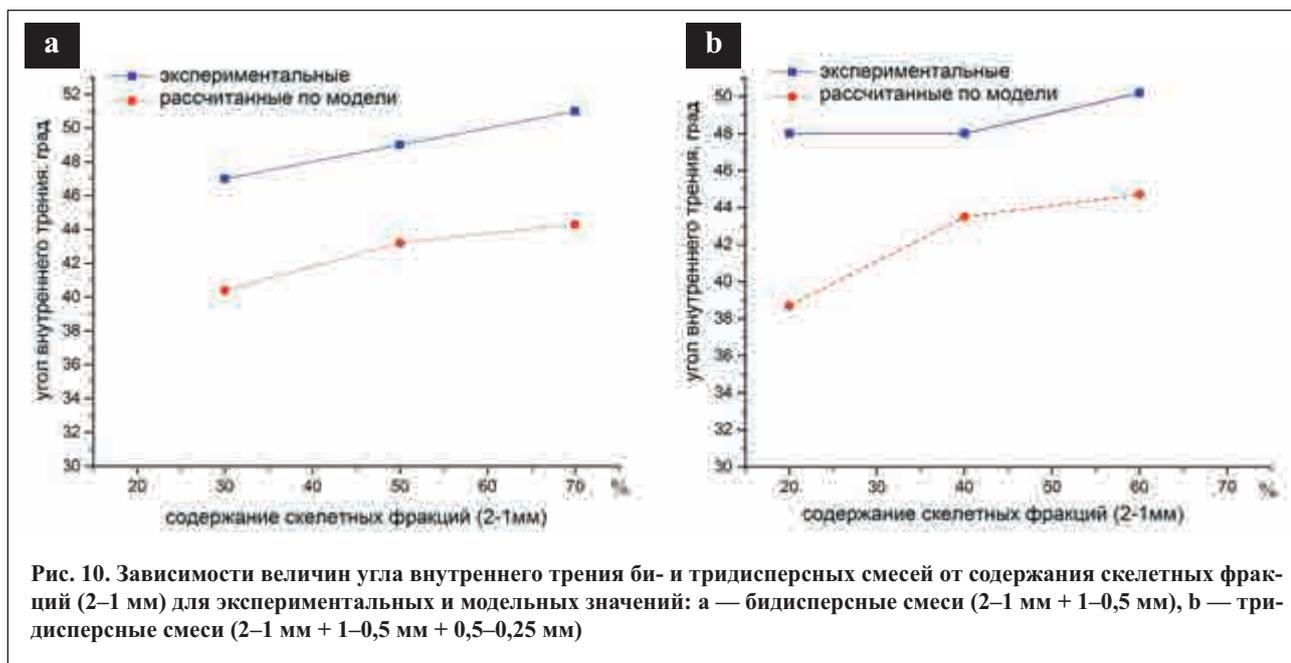
Сопоставление результатов, полученных опытным путем и моделированием для би- и тридисперсных смесей

| Смесь | Фракция, мм и содержание заполнителя, % | | Угол внутреннего трения, град. | | $\varphi - \varphi'$, град | Относительная погрешность, $\frac{ \varphi - \varphi' }{\varphi}$, % | Сцепление, кПа |
|---------------|---|------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|---|----------------|
| | | | Опытный, φ | Расчетный, φ' | | | |
| Бидисперсная | 1–0,5 | 30 | 51 | 44,3 | 6,7 | 13,14 | 10,50 |
| | | 50 | 49 | 42,9 | 6,1 | 12,44 | 0 |
| | | 70 | 47 | 40,4 | 6,6 | 14,04 | 5,33 |
| Тридисперсная | 1–0,5 / 0,5–0,25 | 40 (20/20) | 50,2 | 44,7 | 5,5 | 10,96 | 6,43 |
| | | 60 (30/30) | 48 | 43,5 | 4,5 | 9,38 | 0 |
| | | 80 (40/40) | 48 | 38,7 | 9,3 | 19,38 | 0,07 |

тах при сдвиге также является довольно сложным и в значительной степени также зависит от гранулометрического состава изучаемых би- и тридисперсных грунтовых смесей (рис. 12).

Из рис. 12 следует, что распределение контактных напряжений в ячейке сдвигового прибора не равномерно в процессе сдвига. Максимальные величины контактных

напряжений формируются между частицами вблизи боковых стенок ячейки, к которым прикладывается касательное напряжение. На рис. 12 это напряжения вблизи правой стенки в верхней части ячейки и, соответственно, напряжения вблизи левой стенки в нижней части ячейки. Интересно также отметить, что непосредственно в самой плоскости сдвига максимальные контактные напряжения



ориентируются горизонтально, т.е. вдоль плоскости сдвига.

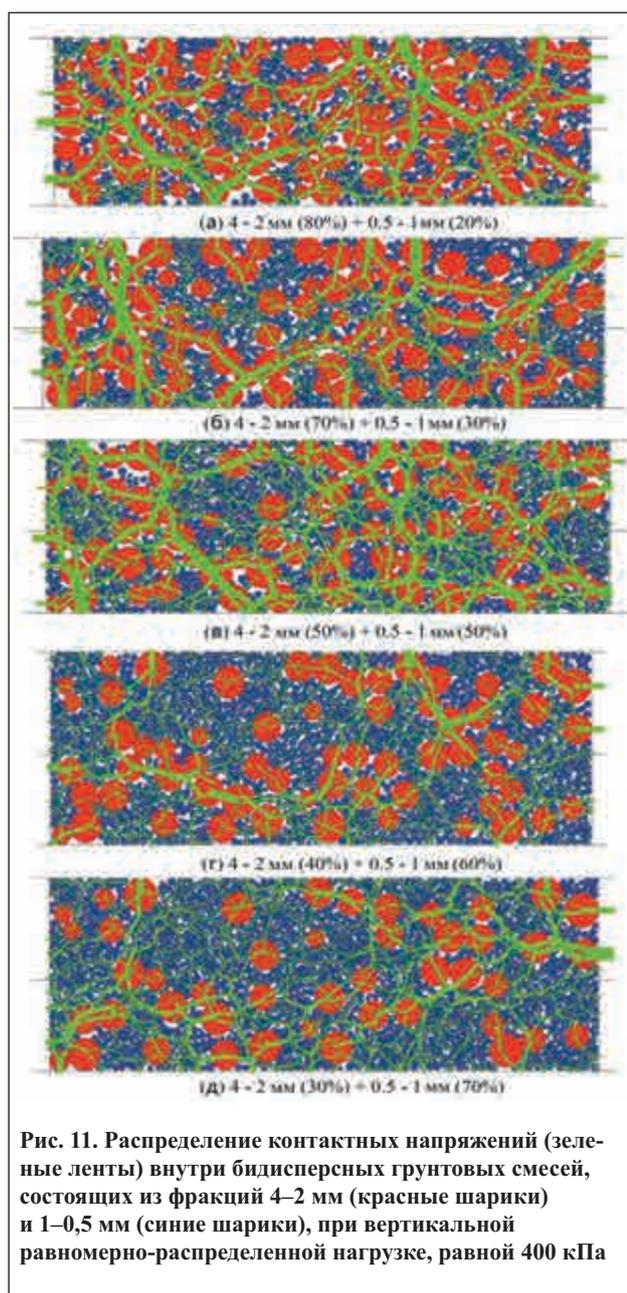
Таким образом, именно крупные частицы служат «скелетом» создаваемых грунтовых смесей, и именно через них преимущественно передаются наибольшие контактные напряжения между частицами (см. рис. 11, 12). При массовом содержании в смеси заполнителя < 30% контакты между соседними частицами состоят из преимущественно контактов между частицами «скелетной» фракции. При этом, напряжения передаются через соседние частицы, хотя в данном случае поры между частицами «скелетной» фракции могут частично заполняться более мелкими фракциями заполнителя. В этом случае, грунтовые смеси обычно могут сохранять свою прочность, соответствующую грунту без заполнителя.

Когда же массовое содержание заполнителя превышает 30%, то постепенно развиваются контакты между более мелкими частицами, а также возникают контактные напряжения между «скелетными» и частицами более мелких фракций. Это способствует рассеянию контактных напряжений. В результате этого, силы трения между частицами снижаются в связи с увеличением рассеяния контактного напряжения внутри грунтовых смесей. В конечном итоге это влечет за собой снижение сопротивления движению частиц в процессе сдвига, и в результате — прочность такой песчаной или песчано-гравийной смеси постепенно уменьшается и стремится к прочности самого мелкого заполнителя.

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Программа PFC, созданная на основе теории дискретной среды, представляет собой одну из эффективных и перспективных математических программ, которая может успешно использоваться для анализа изменения физико-механических свойств дисперсных грунтов различного гранулометрического состава, включая пески, песчано-дресвяные и песчано-гравийные смеси, и создания на этой основе смесей с заданными свойствами.



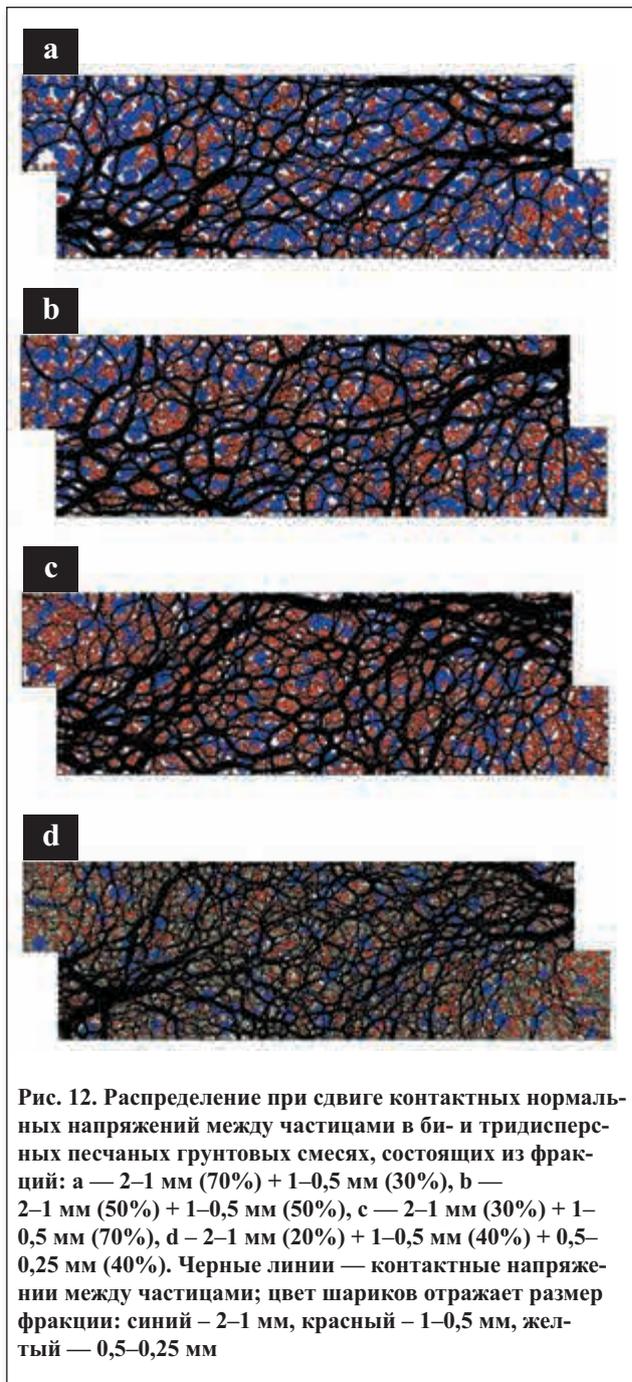


Рис. 12. Распределение при сдвиге контактных нормальных напряжений между частицами в би- и тридисперсных песчаных грунтовых смесях, состоящих из фракций: а — 2–1 мм (70%) + 1–0,5 мм (30%), б — 2–1 мм (50%) + 1–0,5 мм (50%), в — 2–1 мм (30%) + 1–0,5 мм (70%), г — 2–1 мм (20%) + 1–0,5 мм (40%) + 0,5–0,25 мм (40%). Черные линии — контактные напряжения между частицами; цвет шариков отражает размер фракции: синий — 2–1 мм, красный — 1–0,5 мм, желтый — 0,5–0,25 мм

2. Разработана и обоснована методика создания, исследования и моделирования смесей песчаных и песчано-гравийных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами, основанная на применении положений теории дискретной среды с помощью программы PFC.
3. В соответствии с теорией дискретной среды распределение напряжений в дисперсной системе зависит от ее гранулометрического состава. При моделировании с помощью программы PFC сдвиговых испытаний грунтовых смесей необходимо учитывать отношение размера частиц (R) к размеру ячейки (L) прибора. Увеличение отношения размера частиц к размеру прибора вызывает искажение результатов при моделировании. При этом, для грунтов из гравийных фракций отмечена более высокая погрешность между величинами углов внутреннего трения, получаемых моделированием и опытным путем, чем для песчаных фракций.
4. Крупные частицы, составляющие «скелет» грунтовой смеси, при их содержании более 30% по массе, в наибольшей мере ответственны за формирование поля напряжений в объеме грунта: передача контактных напряжений внутри грунтовых смесей при сдвиге или уплотнении нормальной равномерно распределенной нагрузкой происходит преимущественно через крупные фракции («скелетные» фракции).
5. При массовом содержании в смеси заполнителя меньше 30%, контакты между частицами формируются преимущественно «скелетными» частицами. Если массовое содержание заполнителя превышает 30%, то постепенно развиваются контактные напряжения между соседними мелкими частицами, а также напряжения между «скелетными» и более мелкими частицами. При этом, прочность песчано-гравийных смесей, оцениваемая углом внутреннего трения, уменьшается и стремится к прочности самого заполнителя. 🌐

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00944а, а также с использованием оборудования, приобретенного за счет средств «Программы развития Московского университета».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петтиджон, Ф.Д., 1981. Осадочные породы. Пер. с англ. С.Е. Алферова и др. Недра, М.
2. Chong Shi, De-jie Li, Kai-hua Chen, Jia-wen Zhou, 2016. Failure mechanism and stability analysis of the Zhenggang Landslide at the Yunnan Province of China using 3D particle flow code simulation. Journal of Mountain Science, vol. 13, issue 5, pp. 891–905. DOI:10.1007/s11629-014-3399-0.
3. Chong Shi, De-jie Li, Wei-ya Xu, Rubin Wang, 2015. Discrete element cluster modeling of complex mesoscopic particles for use with the particle flow code method. Granular Matter, vol. 17, issue 17, pp. 377–387. DOI:10.1007/s10035-015-0557-1.
4. Chong Shi, Jinzhou Bai, 2015. Compositional effects and mechanical parametric analysis of outwash deposits based on the randomized generation of stone blocks. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2015, article ID 863915, pp. 1–13. DOI:10.1155/2015/863915.
5. Cundall, P.A., 1971. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Int. Symp. On Rock Fracture, Proc., paper II-8, Nancy, France, 1971, pp. 129–136.
6. Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1999. Particle flow code in 2 dimensions. Itasca consulting group, Inc.
7. Li Shuang, Liu Yang, Wu Ke-jia, 2017. Exploring mesoscopic deformation mechanism of sand in direct shear test by numerical simulation using discrete element method. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, vol. 34 (4), pp. 104–110.

8. Liu Hai-tao, Cheng Xiao-hui, 2008. Discrete element analysis for size effects of coarse-grained soils. *Rock and Soil Mechanics*, vol. 30, pp. 288–292.
9. Liu Xing-ning, Shi Chong, 2014. Meso-mechanics research of direct shear test on outwash deposits with PFC method. *Science Technology and Engineering*, vol. 14, no. 36, pp. 108–114.
10. Lorig, L.J., Gibson, W., Alvial, J., Cuevas, J., 1995. Gravity flow simulations with the particle flow code (PFC). *ISRM News Journal*, vol. 3 (1), pp. 18–24.
11. Mishra, B.K., Mehrotra, S.P, 1998. Modeling of particle stratification in Jigs by the discrete element method. *Minerals Engineering*, vol. 11 (6), pp. 511–522. DOI:10.1016/S0892-6875(98)00033-8.
12. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 41 (8), pp. 1329–1364. DOI:10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.
13. Tian Rui-xia, Jiao Hong-guang, 2011. Application status and analysis of discrete element software PFC in mining engineering. *Mining and Metallurgy*, vol. 20, no. 1, pp. 79–82.

REFERENCES

1. Pettijohn, F.J., 1981. *Sedimentary rocks*. Trans. from English by S.E. Alferov et al. Nedra, Moscow. (In Russ.).
2. Chong Shi, De-jie Li, Kai-hua Chen, Jia-wen Zhou, 2016. Failure mechanism and stability analysis of the Zhenggang Landslide at the Yunnan Province of China using 3D particle flow code simulation. *Journal of Mountain Science*, vol. 13, issue 5, pp. 891–905. DOI:10.1007/s11629-014-3399-0.
3. Chong Shi, De-jie Li, Wei-ya Xu, Rubin Wang, 2015. Discrete element cluster modeling of complex mesoscopic particles for use with the particle flow code method. *Granular Matter*, vol. 17, issue 17, pp. 377–387. DOI:10.1007/s10035-015-0557-1.
4. Chong Shi, Jinzhou Bai, 2015. Compositional effects and mechanical parametric analysis of outwash deposits based on the randomized generation of stone blocks. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, article ID 863915, pp. 1–13. DOI:10.1155/2015/863915.
5. Cundall, P.A., 1971. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. *Int. Symp. On Rock Fracture, Proc.*, paper II-8, Nancy, France, 1971, pp. 129–136.
6. Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1999. *Particle flow code in 2 dimensions*. Itasca consulting group, Inc.
7. Li Shuang, Liu Yang, Wu Ke-jia, 2017. Exploring mesoscopic deformation mechanism of sand in direct shear test by numerical simulation using discrete element method. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, vol. 34 (4), pp. 104–110.
8. Liu Hai-tao, Cheng Xiao-hui, 2008. Discrete element analysis for size effects of coarse-grained soils. *Rock and Soil Mechanics*, vol. 30, pp. 288–292.
9. Liu Xing-ning, Shi Chong, 2014. Meso-mechanics research of direct shear test on outwash deposits with PFC method. *Science Technology and Engineering*, vol. 14, no. 36, pp. 108–114.
10. Lorig, L.J., Gibson, W., Alvial, J., Cuevas, J., 1995. Gravity flow simulations with the particle flow code (PFC). *ISRM News Journal*, vol. 3 (1), pp. 18–24.
11. Mishra, B.K., Mehrotra, S.P, 1998. Modeling of particle stratification in Jigs by the discrete element method. *Minerals Engineering*, vol. 11 (6), pp. 511–522. DOI:10.1016/S0892-6875(98)00033-8.
12. Potyondy, D.O., Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 41 (8), pp. 1329–1364. DOI:10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.
13. Tian Rui-xia, Jiao Hong-guang, 2011. Application status and analysis of discrete element software PFC in mining engineering. *Mining and Metallurgy*, vol. 20, no. 1, pp. 79–82.

CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. SEM-images of the typical grains shape of natural sand fractions: a, b — 2–1 mm; c, d — 1–0,5 mm; e,f — 0,5–0,25 mm (photo M.S. Chernov)

Fig. 2. Dependences of the parameters values of the morphological features of the particles (R , K , K_ϕ , Q_w) on the size (d) of the particles, a — Riley sphericity coefficient (R); b — coefficient of roundness Koch (K); c — coefficient of shape (K_ϕ); d — coefficient of roundness Waddell (Q_w)

Fig. 3. Diagram of the geometrical model of the cell of the shear device (a) and the movement of the upper part of the cell (b) in the PFC-program

Fig. 4. PFC-models of the distribution of spherical dispersed particles inside the cell of the shearing device for porosity of $n = 16\%$: a — a model consisting of 4–2 mm size particles; b — a model of a binary mixture consisting of two fractions particles: 4–2 mm (red globules) and 1–0,5 mm (blue globules)

Fig. 5. Diagram of contact types: a — particles with a particle; b — particles with a cell wall: A, B, b, — particles; W — wall; $R^{[A]}$, $R^{[B]}$, $R^{[b]}$ — the radius of particles A, B and b; $x_i^{[A]}$, $x_i^{[B]}$, $x_i^{[b]}$, $x_i^{[c]}$ — the coordinates of the center of the particles A, B, b and the point of contact; n_i — the unit normal vector; d — the distance between the central points of the particles, U^n — the duplicated part

Fig. 6. Algorithm and scheme for simulating soil tests for shear using the PFC-program

Fig. 7. The relationship between shear stresses (τ) and shear deformations of the investigated monodisperse soils (a — b): a — 2–1 mm, b — 1–0,5 mm, c — 0,5–0,25 mm, d — the relationship between shear stresses (τ) and normal stresses (σ) of the investigated monodisperse soils; e — the dependence of the values of the angle of internal friction on the size of the fractions

Fig. 8. The relationship between the tangential stresses (τ) and the shear deformations of the investigated bis-disperse ground mixtures (a — c): a — a mixture of fractions 2–1 mm (70%) + 1–0,5 mm (30%), b — mixture of fractions 2–1 mm (50%) + 1–0,5 mm (50%), c — mixture of fractions 2–1 mm (30%) + 1–0,5 mm (70%); d — the relationship between shear stresses (τ) and normal stresses (σ) of the investigated bis-disperse ground mixtures

Fig. 9. The relationship between the tangential stresses (τ) and the shear deformations of the investigated triple-disperse ground mixtures (a — c): a — 2–1 mm (60%) + 1–0,5 mm (20%) + 0,5–0,25 mm (20%), b — 2–1 mm (40%) + 1–0,5 mm (30%) + 0,5–0,25 mm (30%), c — 2–1 mm (20%) + 1–0,5 mm (40%) + 0,5–0,25 mm (40%); d — the relationship between shear stresses (τ) and normal stresses (σ) of the investigated triple-disperse ground mixtures

Fig. 10. The dependence of the values of the angle of internal friction on the content of particles of the «skeletal» fraction (4–2 mm) for the experimental and model values, a — bis-disperse ground mixtures (2–1 mm + 1–0,5 mm), b — triple-disperse ground mixtures (2–1 mm + 1–0,5 mm + 0,5–0,25 mm)

Fig. 11. Distribution of stresses inside the bidisperse ground mixtures consisting of fractions of 4–2 mm and 1–0,5 mm, with a vertical uniformly distributed load equal to 400 kPa

Fig. 12. The shear distribution of contact normal stresses between particles in bi- and triple-disperse ground mixtures, consisting of fractions: a — 2–1 mm (70%) + 1–0,5 mm (30%), b — 2–1 mm (50%) + 1–0,5 mm (50%), c — 2–1 mm (30%) + 1–0,5 mm (70%), d — 2–1 mm (20%) + 1–0,5 mm (40%) + 0,5–0,25 mm (40%). Black lines are contact stress between particles; the color of the beads reflects the size of the fraction: blue — 2–1 mm; red — 1–0,5 mm; yellow — 0,5–0,25 mm.

CAPTIONS TO TABLES

Table 1. Characteristics of physical properties of soil samples under study

Table 2. Initial parameters of the PFC model of the soil samples under study

Table 3. Comparison of the results obtained experimentally and modeling for monodisperse soils

Table 4. Comparison of the results obtained experimentally and modeling for bi- and triple -disperse mixtures

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРОЛЕВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., г. Москва, Россия

ЧЖАН ШЭНЖУН

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KOROLEV V.A.

Professor of the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

ZHANG SHENGRONG

Postgraduate student of the Department of Engineering and Environmental Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ



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

www.geomark.ru



ОБЪЕДИНЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛОВ
ДЛЯ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

СОЮЗ ИЗЫСКАТЕЛЕЙ
при поддержке
Ассоциации «Инженерные изыскания в строительстве» (АИИС)
ПРОДОЛЖАЕТ НАБОР ИЗЫСКАТЕЛЕЙ

СОЮЗ ИЗЫСКАТЕЛЕЙ СОЗДАН:

- для объединения физических лиц — специалистов в области инженерных изысканий
- для содействия своим членам в осуществлении их профессиональной деятельности;
- для повышения качества инженерных изысканий в РФ.

Вступать могут специалисты-исыскатели, работающие в организациях, входящих в любые СРО.
Союз изыскателей открыт для вступления аспирантов и студентов в ряды профессионалов в инженерных изысканиях!

СОЮЗ ИЗЫСКАТЕЛЕЙ: ОБЪЕДИНЯЯ, СОВЕРШЕНСТВУЕМ!

Ознакомиться с уставом и положением о членстве в Союзе Изыскателей можно на сайте www.np-si.ru

Контактная информация: тел. +7 (926) 234-21-05 или +7 (926) 234-22-07; e-mail: press@np-si.ru
фактический адрес: г. Москва, ул. Электрозаводская, д. 60

ПОЗДРАВЛЯЕМ ПРОФЕССОРА ВЯЧЕСЛАВА НИКОЛАЕВИЧА КОНИЩЕВА С ЮБИЛЕЕМ! (к 80-летию со дня рождения)



14 февраля 2018 г. исполнилось 80 лет члену редколлегии журнала «Инженерная геология», заведующему кафедрой криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, доктору географических наук, профессору Вячеславу Николаевичу Конищеву.

Вячеслав Николаевич родился 14 февраля 1938 г. в Москве. В 1955 г. поступил на географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, в 1960 г. окончил кафедру географии полярных стран по специальности «физическая география» и с тех пор навсегда связал свою деятельность с Московским университетом, пройдя путь от старшего лаборанта до профессора, заведующего кафедрой.

В 1965 году на географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова В.Н. Конищев защитил кандидатскую диссертацию «Генезис и палеогеографические условия формирования покровных лессовидных образований восточной части Большеземельской тундры» под научным руководством профессора А.И. Попова.

В 1978 году на географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова Вячеслав Николаевич защитил докторскую диссертацию «Криогенное выветривание как фактор формирования лессовидных образований Северной Евразии».

В.Н. Конищев — всемирно известный ученый-мерзотовед и географ, педагог и организатор науки. Он автор более 250 научных и учебно-методических работ, в том числе 7 монографий и 9 учебных пособий, ряд его работ издан за рубежом: в Канаде, США, ФРГ, Франции, Китае, Польше.

Исследовательская работа Вячеслава Николаевича связана с изучением значения и места криогенеза в системе природных процессов на Земле, динамики минерального вещества в криолитозоне, эволюции и геоэкологической

роли криосферы Земли. За время работы в МГУ он организовал и провел полевые экспедиционные исследования в суровых условиях различных районов Арктики, Восточной Сибири, севера Европейской части России, участвовал в экспедициях в Канадскую Арктику и высокогорный Тибет. Материалы, полученные в этих экспедициях, позволили ему решить ряд фундаментальных научных проблем. Им обоснован и доказан на ряде многочисленных примеров принципиально новый ряд устойчивости минеральных образований, присущий только криолитозоне. На этой теоретической базе Вячеслав Николаевич открыл криогенную природу минерального вещества лессовидных отложений; обосновал полигенетическую природу ледового комплекса Сибири и показал ведущую роль криогенеза в формировании минерального вещества этих широко распространенных отложений. Им предложена концепция защитной роли пленки незамёрзшей воды в ходе криогенного преобразования минерального вещества, обоснован количественный критерий — показатель степени криогенного преобразования минерального вещества дисперсных грунтов и почв криолитозоны и перигляциальных районов. Он предложил новый метод определения палеотемператур криогенных толщ, повсеместно развитых на территории России; определил геологический возраст золотоносных россыпей на севере Якутии, что позволило существенно расширить сферу их поиска. Большое научное значение получила предложенная Вячеславом Николаевичем концепция расширяющейся криосферы Земли. В последние годы Вячеслав Николаевич развивает представление о неоднозначности реакции различных ландшафтов криолитозоны на изменение климата. В определенных ландшафтах криолитозоны мерзлотные условия при потеплении климата могут оставаться стабильными или даже испытывать тенденцию к посуровению.

Более полувека Вячеслав Николаевич ведет активную педагогическую работу, сочетая требовательность и доброжелательность, высокую культуру и профессионализм, постоянную готовность помочь молодежи советом и делом. Он многие годы читает курсы лекций по общему и региональному мерзлотоведению, истории криосферы Земли, методам криолитологических исследований. В разные годы Вячеслав Николаевич читал лекции по мерзлотоведению в университетах Канады (Ванкувер, Оттава), Исландии (Рейкьявик, Отару), Китая (Пекин, Ланчжоу), Финляндии (Хельсинки), Франции (Канн), Японии (Саппоро), Польши (Лодзь).

Вячеслав Николаевич — активный пропагандист знаний о криосфере, им опубликованы популярные издания для юношества, он участвовал в научно-популярных проектах на телевидении.

С 1993 по 2017 г. Вячеслав Николаевич возглавлял кафедру криолитологии и гляциологии — единственную в мире кафедру, готовящую специалистов в сфере комплексного изучения криосферы Земли. За эти годы ка-

федру закончили более 250 молодых специалистов, работающих в разных областях науки и практики. Под его руководством подготовлено девять кандидатов и один доктор наук.

Долгие годы Вячеслав Николаевич ведет большую научно-организационную работу: в течение 16 лет он был заместителем декана географического факультета МГУ по научной работе, с 1981 г. по 2016 г. был председателем специализированного Совета ВАК по защите докторских и кандидатских диссертаций. В разное время он был членом ученого совета по естественным наукам МГУ им. М.В. Ломоносова, ученого совета Института географии РАН, членом Экспертного совета Госкомобразования, в настоящее время — член ученого совета географического факультета МГУ и объединенного совета РАН по криологии Земли, эксперт Российского научного фонда (РНФ), Российского фундаментального фонда исследований (РФФИ) и президентских фондов по поддержке молодых ученых и научных школ. Он входит состав редколлекции целого ряда журналов: «Вестник Московского университета. Серия 5. География» (с 1974 года), «Криосфера Земли» (с 1997 года), «Инженерная геология» (с 2005 года), международного журнала «Permafrost and Periglacial Processes» (с 2001 года).

В 1998 г. Вячеславу Николаевичу присуждено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», в 2004 г. — «Заслуженный профессор МГУ».

Многие годы Вячеслав Николаевич вел научную и научно-организационную работу в международных организациях мерзлотоведов и географов, был секретарем терминологической комиссии Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA). Научная школа кафедры, возглавляемая В.Н. Конищевым, была отмечена как одна из ведущих научных школ России на первом конкурсе научных школ в 1996 г. и в качестве таковой отмечалась долгие годы.

В международном сообществе коллег-географов, мерзлотоведов и гляциологов Вячеслав Николаевич заслуженно пользуется авторитетом и уважением как выдающийся ученый, талантливый педагог, организатор науки, доброжелательный, чуткий и отзывчивый человек.

Сердечно поздравляем Вячеслава Николаевича с юбилеем и желаем ему здоровья, долгих лет жизни, благополучия и, конечно, дальнейших творческих успехов в научной и педагогической деятельности! 🌍

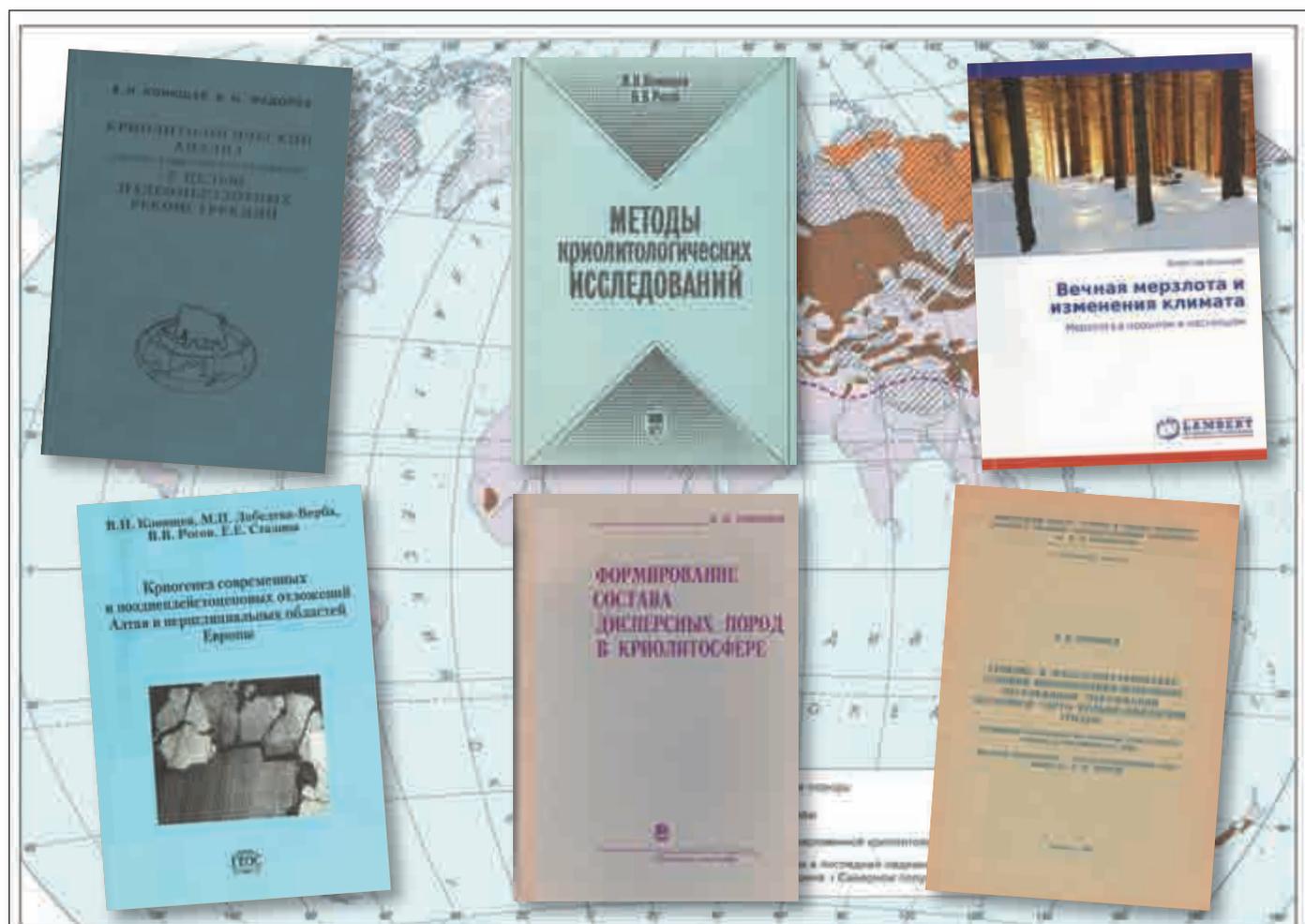
Коллектив кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

ООО «ИГИИС»

Журнал «Инженерная геология»

СРО «АИИС»

НП «Союз изыскателей»



Карта распространения лессов, лессовидных пород, современной и позднелейстоценовой криолитозон (составлена В.Н. Конищевым, Н.А. Королевой) из статьи Конищев, В.Н., 2015. Лессовые породы: новые возможности изучения их генезиса. Инженерная геология, № 5, с. 22–36.