

DOI 10.53278/2306-9139-2025-1-24-3-10

УДК 624.131

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ

VERY COARSE SOILS MASS STUDYING PROBLEMS

© 2025 г. М. А. Булатников¹, А. Ю. Мирный²© 2025 M. A. Bulatnikov¹, A. Y. Mirnyy²

^{1,2}Геологический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119234, Россия

^{1,2}Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, bld. 1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

bulatnikovma@my.msu.ru¹, MirnyyAY@mail.ru²

Аннотация. Рассматриваются подходы к изучению физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, выявляются определяющие для этих свойств факторы, обозначаются принципы моделирования этой разновидности грунтов методом аналогий.

Abstract. Approaches to studying the physical-mechanical properties of very coarse soils are considered, the determining factors of these properties are identified, and the principles of modeling this type of soil by analogy are outlined.

Ключевые слова: крупнообломочные грунты, физико-механические свойства, метод аналогий, прочность, деформируемость, гранулометрический состав, моделирование грунтов.

Keywords: very coarse soils, physical-mechanical properties, method of analogy, strength, strain, granulometric composition, soil modeling.

Введение

Крупнообломочные грунты состоят в основном из окатанных или угловатых обломков горных пород размером более 2 мм, которые составляют более 50% грунта (в процентах от массы воздушно-сухого грунта). В общей классификации грунтов вид крупнообломочных относится к группе несвязных дисперсных грунтов. Важнейшими их особенностями являются:

— наличие в гранулометрическом составе обломков как горных пород, так и первичных минералов, а также их агрегатов, слабо или частично измененных выветриванием;

— преобладание структурных связей механической природы, вследствие чего грунты часто ведут себя как сыпучие тела.

Однако при наличии в крупнообломочных грунтах песчано-пылеватого или глинистого заполнителя они могут терять сыпучесть и приобретать определенную связность, зависящую от количества заполнителя. В этом случае отнесение крупнообломочных грунтов к группе несвязных является условным [5, 9].

Крупнообломочные грунты широко распространены в пределах щитов древних платформ, плит древних и молодых платформ, горно-складчатых

районах, где они слагают толщи отложений различных генетических типов (табл. 1). Эта разновидность грунтов представлена продуктами механического выветривания — развалами фрагментов коренных пород на поверхностях водоразделов, осыпными и обвальными отложениями на склонах, отложениями временных водотоков, речных русел и поймы, а также дельт, озер, приморских пляжей, грязекаменных потоков [9].

В практике строительства как в качестве естественных оснований, так и в качестве материала конструкций часто используются крупнообломочные грунты, параметры физико-механических свойств которых принципиально важны для расчетного обоснования инженерных сооружений.

Научно-обоснованные исследования инженерно-геологических свойств крупнообломочных грунтов тесно связаны с развитием уровня строительной техники и начали проводиться лишь с середины XX века. Эта задача была поставлена Н. В. Коломенским [17]. В 50–60-е годы параллельно выполнялись первые масштабные исследования массивов крупнообломочных грунтов: работы на Гурзуфском оползневом массиве под руководством

Таблица 1. Приуроченность генетических типов отложений к геоструктурным единицам

Генетический тип отложений*	Материковые геоструктурные единицы			
	Древние платформы		Молодые платформы	Горно-складчатые районы (орогены)
	щиты	плиты	плиты	
элювиальный	+	—	—	—
коллювиальный	+	—	—	+
пролювиальный	—	—	—	+
ледниковый	+	+	+	—
водно-ледниковый	+	+	+	—
аллювиальный	+	+	+	+
морской	в разрезах прибрежно-морских образований			

* Примечание: генетические типы приведены в порядке изменения формы обломков от угловатых до окатанных; «+» — широкое распространение, «—» — незначительное распространение.

А. И. Шеко [24] и изучение элювиальных грунтов Урала В. Б. Швецем [23]. Значительный вклад в исследование свойств крупнообломочных грунтов внесли работы институтов ВОДГЕО, Гидропроект, СоюзДорНИИ, ТНИСГЭИ. Наиболее широкие комплексные исследования физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с пылевато-глинистым заполнителем были проведены в 70–80-е годы в Дальневосточном НИИ по строительству под руководством проф. В. И. Федорова [6, 21, 22].

Исследованию свойств крупнообломочных грунтов за рубежом посвящены работы: Hennes R. [27], Fukuoka M. [25], Heltz W. [26], Lowe J. [29], Marschi D. [30] Indraratna B. [28], Varadaraian A. [31] и др.

Данные работы касались, в основном, отработки методик и аппаратуры для испытания грунтов, вопросов классификационной систематизации. Результаты этих исследований позволяют в различной степени качественно оценить влияние тех или иных отдельных факторов на физико-механические свойства крупнообломочных грунтов. Однако сведения о количественной оценке их влияния отличаются разнообразием и часто противоречивы.

В настоящее время прямые испытания крупнообломочных грунтов не распространены. Это связано, прежде всего, с необходимостью использования крупногабаритных установок для соблюдения допустимых соотношений между размерами наиболее крупных обломков и приборов. Трудность проведения таких опытов и малое опубликованное их количество обуславливает практически полное отсутствие обоснованных методик оценки физико-механических свойств крупнообломочных грунтов и прогноза их изменения в процессе строительства и эксплуатации сооружений.

В настоящей работе рассматриваются подходы к изучению физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, выявлены их основные преимущества и недостатки.

Методики исследований

Исследованию физико-механических свойств крупнообломочных грунтов посвящены отдельные работы, выполнявшиеся в основном в связи с оценкой устойчивости оползневых склонов и решением конкретных задач гидротехнического и дорожного строительства.

Большинство этих исследований можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся работы, целью которых было установление общих закономерностей между физическими и физико-механическими свойствами крупнообломочных грунтов (В. И. Федоров [21], В. Н. Шведов [22], О. В. Добудько [6]). Ко второй группе — исследования, которые были посвящены совершенствованию методов прямых испытаний грунтов путем разработки крупногабаритных приборов и принципов моделирования грунтов методом аналогий (Н. В. Коломенский, В. С. Соколов [17], А. И. Шеко [24], В. Б. Швец [23], Л. Н. Рассказов [4, 16], Р. Г. Тулинов [20], Б. И. Балыков [2], П. Л. Иванов [8], Р. Г. Кальбергенев [10], Р. С. Зиангиров [7], Г. Н. Петров [14, 15], С. Б. Ухов [11], З. Г. Тер-Мартиросян [18] и др.).

Следует отметить, что исследователи физико-механических свойств крупнообломочных грунтов (КОГ), как правило, рассматривают твердую компоненту как совокупность крупнообломочной (частицы более 2 мм) и мелкообломочной (частицы менее 2 мм) составляющих (КОС и МОС).

Первая группа исследований физико-механических свойств КОГ

Исследования данной группы нацелены на решение задач промышленного и гражданского, в частности дорожного, строительства.

На основе проведенных исследований проф. В. И. Федоров в 1973 г. разработал первую редакцию «Рекомендаций по определению прочностных

и деформативных характеристик крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями». Затем вышел ряд других работ, касающихся оценки прочностных характеристик обломочно-пылевато-глинистых грунтов [6, 22]. В 1989 г. Госстрой в изд-ве «Стройиздат» выпустил «Методику оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями» [12] (далее Методика).

Основными факторами, определяющими свойства крупнообломочных грунтов, по мнению авторов Методики являются:

- соотношение в зерновом составе МОС и КОС;
- разновидность МОС (супесь, суглинок, глина);
- состояние по влажности МОС;
- механическая прочность КОС;
- степень окатанности КОС.

Основой Методики является физический эквивалент грунта M_τ , предложенный В. И. Федоровым и представляющий собой комбинацию оптимального набора аргументов:

$$M_\tau = \frac{P_1}{P_2} I_p (1 + I_L),$$

где P_1 — процентное содержание МОС,
 P_2 — процентное содержание КОС,
 I_p — число пластичности МОС,
 I_L — показатель текучести МОС

Исследования были выполнены на модельных грунтах, по их результатам установлено наличие тесных связей физического эквивалента КОГ, прочности и окатанности КОС с их прочностными и деформационными параметрами:

$$M_\tau, k_e, k_o \sim \varphi, C, E$$

где k_e — коэффициент истираемости обломков,
 k_o — коэффициент, учитывающий окатанность КОС.

По результатам проведенных опытов в «ДальНИИС» авторы исследований [6, 21, 22] выполнили типизацию крупнообломочных грунтов со связным заполнителем и связных грунтов с крупными включениями (табл. 2), основанную на отличии работы грунта под внешними нагрузками при различном соотношении МОС и КОС. Схемы работы в соответствии с выделенными типами следующие:

1. Содержание в грунте крупных обломков 90–100%. Имеют место непосредственные контакты крупных обломков друг с другом. Характерно наличие жесткого каркаса грунта

из обломков. Определяющими факторами являются характеристики КОС, влияние МОС практически отсутствует.

2. Содержание в грунте крупных обломков 70–90%. По-прежнему имеют место непосредственные контакты крупных обломков друг с другом. По мере увеличения количества заполнителя таких контактов становится все меньше, но жесткий каркас сохраняется. Возникает влияние МОС в роли контактного слоя.

3. Содержание в грунте крупных обломков 50–70%. Количество непосредственных контактов крупных обломков друг с другом уменьшается с увеличением содержания заполнителя. Жесткий обломочный каркас включается в работу постепенно по мере увеличения нагрузки и сближения обломков. Возникает существенное влияние МОС в роли среды, включающей в себя КОС.

4. Содержание в грунте крупных обломков 20–50%. Количество контактов между крупными обломками незначительное. Жесткого каркаса не образуется. Увеличивается влияние МОС в роли среды, включающей в себя КОС.

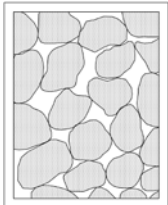
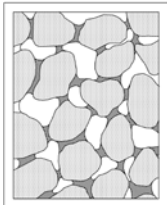
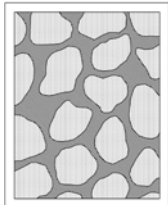
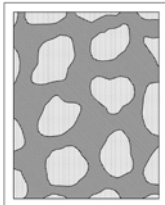
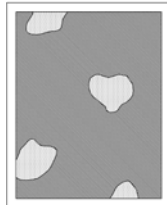
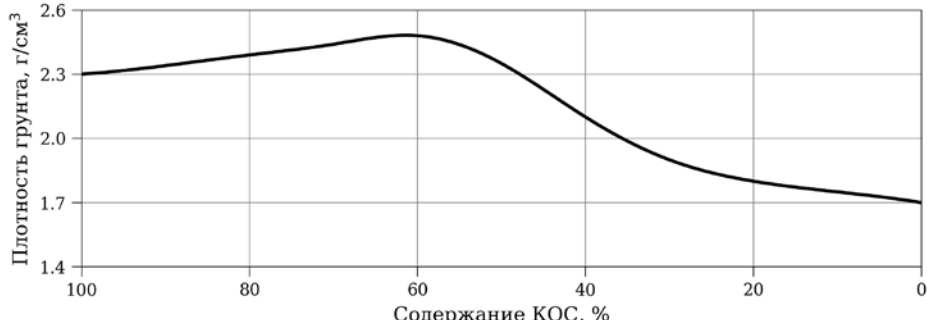
5. Содержание в грунте крупных обломков 0–20%. Грунт характеризуется преимущественно структурой грунта заполнителя. Определяющими факторами являются характеристики МОС, влияние КОС практически отсутствует.

Согласно приведенной схеме, по мере заполнения пор жесткого обломочного каркаса плотность грунта в целом постепенно увеличивается и при содержании КОС 50–70% достигает наибольшего значения, после чего резко снижается и стремится к плотности грунта заполнителя. Эта закономерность учитывается в Методике через соотношение в зерновом составе МОС и КОС (P_1/P_2). Однако оно не характеризует критически важную особенность гранулометрического состава грунта, а именно степень его неоднородности.

На рисунке 1 приведен пример того, что при одном и том же процентном соотношении МОС и КОС (по 50%) может быть совершенно разный по однородности гранулометрический состав, а именно он определяет структуру грунта, его плотность и пористость, что в свою очередь обуславливает и физико-механические свойства.

Во многом по этой причине параметры прочности и деформируемости, рассчитанные с использованием Методики, отличаются от тех же параметров, полученных по результатам прямых испытаний грунтов стандартными методами. Различие результатов отмечено в монографии Г. Г. Болдырева, посвященной методам определения механических свойств грунтов [3], а также в статье А. З. Тер-Мартirosяна

Таблица 2. Характерные схемы работы крупнообломочных грунтов и грунтов с крупными включениями

		Схемы работы				
		I	II	III	IV	V
Состав-ляющие КОГ, %	МОС	0–10	10–30	30–50	50–80	80–100
	КОС	90–100	70–90	50–70	20–50	0–20
Схематическое представление						
Структурный тип МОС/КОС		контактный/ каркасный		поровый/ с несовершенным каркасом		базальный/ бескаркасный
Характер изменения плотности грунта при изменении соотношения МОС/КОС						

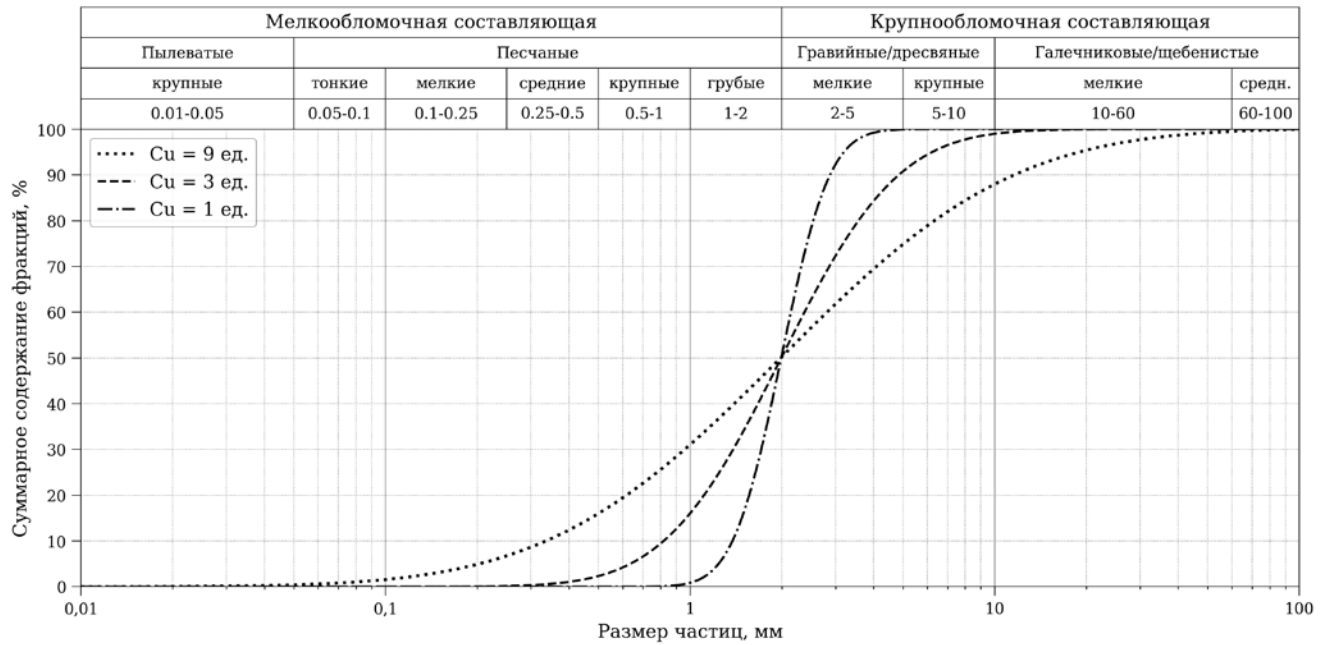


Рис. 1. Интегральные кривые гранулометрического состава грунтов при одинаковом соотношении МОС и КОС и различной степени неоднородности C_u

и А. Ю. Мирного, в которой приводятся результаты прямых испытаний крупнообломочных грунтов в приборе трехосного сжатия [18].
Методика получила широкое распространение благодаря высокой скорости, низкой трудоемкости и стоимости оценки физико-механических свойств

крупнообломочных грунтов. Однако она имеет ограничения по использованию.
Прежде всего в связи с недостаточной достоверностью расчетных значений Методику допустимо применять только для сооружений пониженного и нормального уровня ответственности. Исходя

из особенностей инженерно-геологических условий Дальневосточного края, где Методика разрабатывалась и тестировалась, приведенные выше схемы работы справедливы только для грунтов с пылевато-глинистым (связным) заполнителем. Для грунтов с песчаным (несвязным) заполнителем исследования на установление общих закономерностей между физическими и физико-механическими свойствами не выполнялись. Очевидно, что фактор неоднородности гранулометрического состава для грунтов с песчаным заполнителем будет иметь еще большее значение в оценке физико-механических свойств, при этом дополнительно возникает фактор степени уплотнения грунта, обладающего свойством сыпучести.

Вторая группа исследований физико-механических свойств КОГ.

Исследования данной группы были призваны решать задачи гидротехнического строительства, в первую очередь, при возведении грунтовых плотин. Их особенностью является применение крупногабаритных приборов для прямых испытаний.

Стандартизованное оборудование для полевых и лабораторных испытаний крупнообломочных грунтов долгое время отсутствовало. Каждая организация и каждый исследователь конструировали свой прибор, имеющий отличные от других габариты испытываемого образца, траектории нагружения, вид создаваемого напряженного состояния и прочее. Методика испытаний также в каждой организации трактовалась по-разному, исходя из поставленных задач, наличия оборудования и других соображений.

В силу указанных причин, результаты определения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, полученные в различных организациях и разными исследователями, оказываются несопоставимыми и часто противоречивыми. Несмотря на это, в научной литературе предложены отдельные методы, имеющие достаточные обоснования [1, 2, 7, 11, 13, 18, 19].

В настоящее время определены принципы, которым должна удовлетворять установка для проведения испытаний на прочность и деформируемость крупнообломочных грунтов. По большому счету, они ничем не отличающихся от таковых для испытаний песчаных и глинистых грунтов, за исключением размера прибора.

Очевидно, что решение задач на основании крупномасштабных экспериментов связано с большими затратами средств и времени. В связи с этим, некоторые исследования были направлены на выявление возможности оценки физико-механических

свойств крупнообломочных грунтов в доступных стандартных приборах с помощью метода аналогий. Суть данного метода заключается в испытании модельного грунта, размер всех фракций которого уменьшен в m раз:

$$d_i^{\text{мод}} * m = d_i^{\text{нат}},$$

Где $d_i^{\text{мод}}$ — диаметр частиц модельного грунта, $d_i^{\text{нат}}$ — диаметр частиц натурального грунта, m — масштаб моделирования.

По результатам исследований В. Н. Шведова и Л. Н. Рассказова [16, 22] можно увидеть, что абсолютный размер частиц при прочих равных условиях и исключении масштабного эффекта не влияет на физико-механические свойства крупнообломочных грунтов (рис. 2).

По мнению авторов этих исследований для оценки физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с помощью метода аналогий необходимо соблюдать следующие принципы:

1. Гранулометрический состав модельного грунта должен быть аналогичен натурному по степени неоднородности C_u :

$$i. \quad C_u^{\text{мод}} = C_u^{\text{нат}}$$

2. Петрографический состав модельного грунта должен быть аналогичен натурному, что обеспечивает равенство прочности частиц k_e :

$$k_e^{\text{мод}} = k_e^{\text{нат}}.$$

3. Морфология частиц (форма, окатанность, шероховатость поверхности) модельного грунта должна быть аналогична натурной, что вместе с аналогичным гранулометрическим составом обеспечивает равенство пористости в предельных состояниях $e_{\min}$ и $e_{\max}$:

$$i. \quad e_{\min}^{\text{мод}} = e_{\min}^{\text{нат}},$$

$$ii. \quad e_{\max}^{\text{мод}} = e_{\max}^{\text{нат}}$$

4. Степень плотности I_D модельного грунта должна быть аналогична натурной (для сыпучих крупнообломочных грунтов):

$$I_D^{\text{мод}} = I_D^{\text{нат}}$$

Использование вышеперечисленных принципов создания модельного грунта допустимо только для фракций диаметром более 2 мм. Для фракций диаметром менее 2 мм характерна иная природа структурных связей, т. к. помимо связей механической природы возникают связи физической и физико-химической природы, фазовые типы контактов сменяются переходными и коагуляционными, вместе с этим проявляются физико-химические процессы.

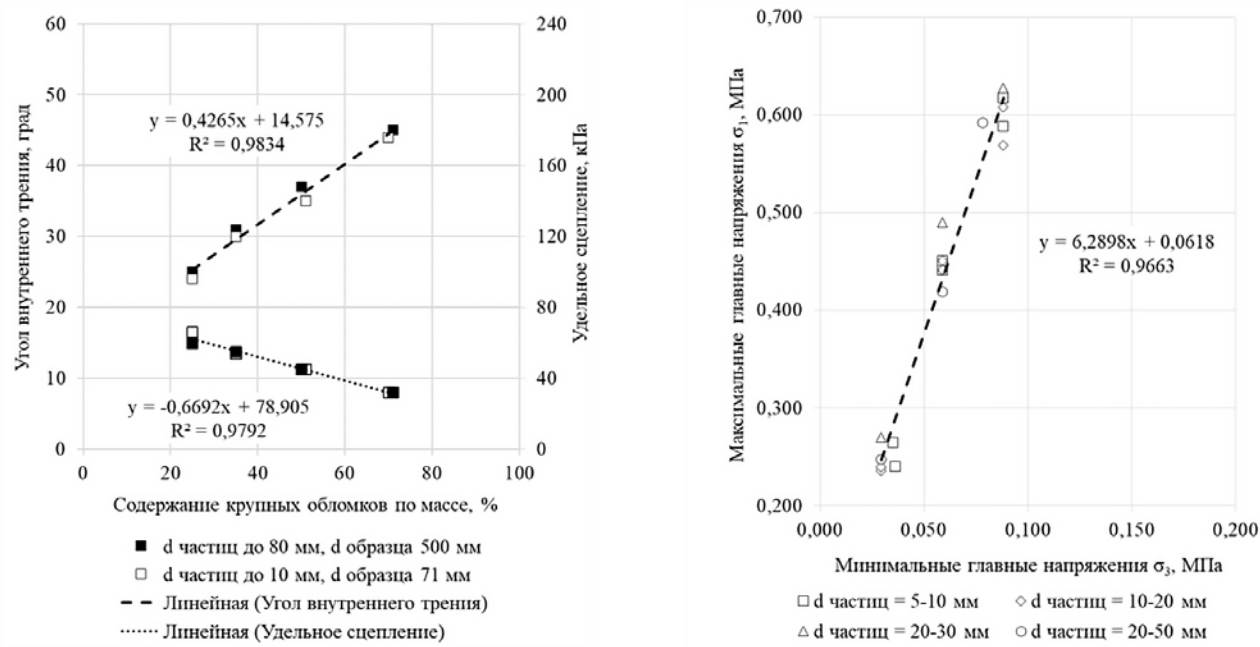


Рис. 2. Слева — результаты параллельных испытаний в большом ($d_{обр}=500$ мм) и малом ($d_{обр}=71$ мм) сдвиговых приборах грунтов разного состава (по Шведову [22]); справа — результаты параллельных испытаний в большом ($d_{обр}=250$ мм) приборе трехосного сжатия однородных грунтов разного состава (по Рассказову [16])

Вслед за уменьшением размера частиц уменьшается размер пор, что ведет к резкому падению водопроницаемости грунтов. Все это оказывает значительное влияние на физико-механические свойства крупнообломочных грунтов при взаимодействии с водой.

Для обхода этого ограничения в оценке физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с помощью метода аналогий авторами настоящей статьи предлагается рассматривать составляющие крупнообломочного грунта отдельно:

- МОС модельного грунта имеет полное соответствие МОС натурального грунта;
- размер всех фракций КОС модельного грунта уменьшается согласно принципам, приведенным выше;
- соотношение частей МОС и КОС в составе модельного грунта соответствуют соотношению в составе натурального грунта.

Изменение гранулометрического состава крупнообломочного грунта в результате подбора грунта-аналога представлено на рисунке 3. Благодаря такому подходу каркас модельного грунта аналогичен каркасу натурального грунта, при этом все свойства грунта заполнителя сохраняются.

Предполагается, что такой подход позволит производить достоверную оценку физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с заполнителем в стандартных приборах на модельных грунтах-аналогах.

Заключение

Определение физико-механических свойств крупнообломочных грунтов в лабораторных условиях осложняется необходимостью использования крупногабаритных установок для соблюдения допустимых соотношений между размерами наиболее крупных обломков и приборов, что делает актуальным разработку альтернативных подходов, таких как моделирование методом аналогий.

Предложенная методика подбора модельных грунтов, основанная на сохранении неоднородности гранулометрического состава, прочности и морфологии частиц, свойств заполнителя, может позволить проводить испытания крупнообломочных грунтов в стандартных приборах. Это открывает новые возможности для оценки параметров этой разновидности грунтов без значительных затрат на крупномасштабные эксперименты. Однако для внедрения предложенной методики требуются экспериментальные исследования.

Таким образом, дальнейшее развитие методов изучения крупнообломочных грунтов должно сочетать экспериментальные подходы с совершенствованием теоретических моделей, что позволит повысить точность прогнозирования их поведения в инженерных сооружениях.

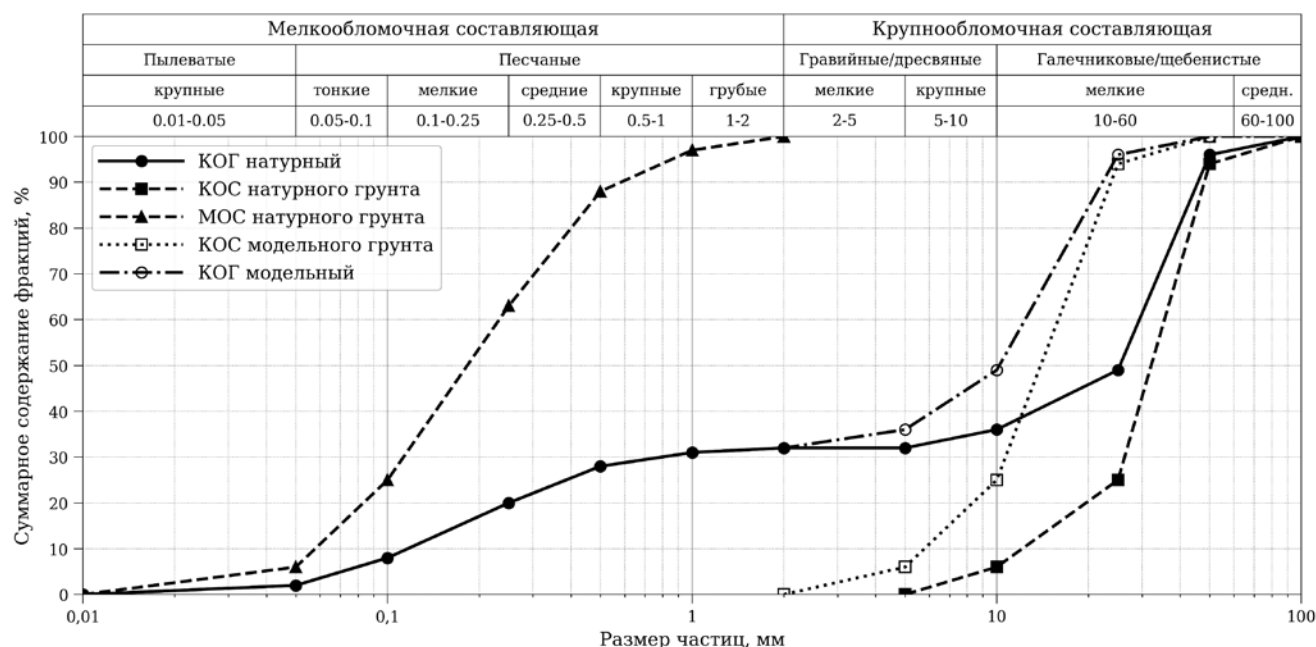


Рис. 3. Схема процедуры подбора гранулометрического состава модельного грунта, аналогичного натурному крупнообломочному грунту с заполнителем

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабенко В. А., Никифоров Н. В., Вознесенский Е. А. Теоретические и методические аспекты экспериментального изучения состава и свойств песчано-глинистого заполнителя крупнообломочных грунтов // Инженерная геология. — 2012. — № 5. — С. 20–35.
- Балыков Б. И. Исследование прочностных характеристик крупнообломочных грунтов при сложном нагружении: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.02. — Ленинград, 1983.
- Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248–2010 — М.: ООО «Прондо», 2014.
- Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин. / учебное пособие — М.: Издательство Ассоциации Строительных Вузов, 2001.
- Грунтоведение / Трофимов В. Т., Королев В. А., Вознесенский Е. А., Голодковская Г. А., Васильчук Ю. К., Зянгириков Р. С. / под ред. В. Т. Трофимова / 6-е изд., переработ. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2005.
- Добудько О. В. Влияние механической прочности обломков на прочностные свойства обломочно-глинистых грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений: дис.... канд. тех. наук: 05.23.02. — Владивосток, 1993.
- Зянгириков Р. С., Кальберген Р. Г. Оценка деформируемости крупнообломочных грунтов // Инженерная геология. — 1987. — № 3. — С. 107–118.
- Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. / учеб. для гидротехн. спец. вузов — М.: Высш. шк., 1985.
- Инженерная геология России. Том 1. Грунты России: [монография] / под ред. В. Т. Трофимова, Е. А. Вознесенского, В. А. Королева — М.: КДУ, 2011.
- Кальберген Р. Г. Методика определения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов: дис.... канд. геол.-мин. наук: 04.00.07. — Москва, 1986.
- Конвиз А. В., Семенов В. В., Ухов С. Б. Механические свойства крупнообломочных грунтов с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1993. — № 1.
- Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями/ДальНИИС. — М.: Стройиздат, 1989.
- Мирный А. Ю., Идрисов И. Х. Испытания трехосного сжатия крупнообломочных грунтов // Электронный журнал «Геоинфо». — 2021. — № 1.
- Петров Г. Н. Физико-механические свойства крупнообломочных грунтов и их использование при строительстве каменно-земляных плотин: дис.... канд. тех. наук: 05.23.02. — Санкт-Петербург, 1991.
- Петров Г. Н., Радченко В. Г., Дубиняк В. А. Крупнообломочные грунты в гидротехническом

- строительстве — С.-Петербург: Изд-во АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 1994.
16. Рассказов Л. Н. Сопротивление крупнообломочного грунта сдвигу при расчете гидротехнических сооружений на устойчивость: дис.... канд. тех. наук: 05.23.02. — Москва, 1966.
17. Соколов В. С. Методика и результаты исследований инженерно-геологических свойств галечниковых пород при повышенных требованиях к основанию: дис.... канд. геол.-мин. наук: 04.00.07. — Москва, 1974.
18. Тер-Мартirosян А. З., Мирный А. Ю. Определение механических характеристик крупнообломочных грунтов прямыми испытаниями в трехосном приборе // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций — Москва: ООО «Геомаркетинг», 2016.
19. Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю. Зависимость механических свойств грунтов от степени их неоднородности // Инженерная геология. — 2013. — № 4. — С. 60–67.
20. Тулинов Р. Г. Исследование основных факторов, определяющих сопротивление сдвигу крупнообломочных пород: дис.... канд. геол.-мин. наук: 04.126. — Москва, 1970.
21. Федоров В. И. Прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочно-глинистых грунтов — М.: Стройиздат, 1988.
22. Шведов В. Н. Исследование прочностных свойств обломочно-глинистых грунтов как оснований зданий и сооружений: дис.... канд. тех. наук: 05.23.02. — Владивосток, 1979.
23. Шве́ц В. Б. Элювиальные грунты как основания сооружений. / 2-е изд., переработ. и доп. — М.: Стройиздат, 1993.
24. Шеко А. И. Основные вопросы инженерно-геологической оценки оползневых склонов Южного Берега Крыма (на примере района г. Гурзуфа). / автореф. дис. на соискание учёной степени канд. геол. — минер. наук. — Москва, 1958.
25. Fukuoka M. Testing of gravelly soils with large-scale apparatus // Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundations. — London, 1957.
26. Holtz W. G. Triaxial shear characteristics of clayey gravel soils // 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — Paris, 1961.
27. Hennes R. G. The strength of gravel in direct shear // Symposium on Direct Shear Testing of Soils. — ASTM International, 1953.
28. Indraratna B., Wijewardena L. S. S., Balasubramaniam A. S. Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill // Géotechnique. — 1993. — № 1 (43). — С. 37–51.
29. Lowe J. Shear strength of coarse embankment dam materials // Proceedings of 8th congress on large dams — Paris, 1964.
30. Marschi N. D., Chan C. K., Seed H. B. Evaluation of Properties of Rockfill Materials // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. — 1972. — № 1 (98). — С. 95–114.
31. Varadarajan A. [и др.]. Testing and Modeling Two Rockfill Materials // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2003. — № 3 (129). — С. 206–218.