ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(11):5-19
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.1:550.82 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_5

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ ДАМБ И ОТВАЛОВ

В.А. Бабелло[1], А.В. Бейдин[2], Ю.М. Овешников[1]

[1] Забайкальский государственный университет, Чита, Россия
[2] Приаргунское производственное горно-химическое объединение, Краснокаменск, Россия, e-mail: BeidinAV@ppgho.ru

Аннотация: Совершенствование расчетов устойчивости грунтовых массивов на базе современных компьютерных программных продуктов требует развития методологического обеспечения и научного обоснования подходов к определению достоверных параметров механических свойств грунтов. В настоящее время для определения параметров прочности грунтов применяют различные методы. В зависимости от методологических подходов и видов испытаний грунтов характеристики их механических свойств могут существенно отличаться. В качестве наиболее приемлемого метода определения характеристик прочности грунтов, используемых для сооружения дамб и отвалов, был выбран натурный метод среза целиков. При этом были рассмотрены и реализованы два различных подхода к определению угла внутреннего трения и сцепления грунтов на двух объектах горного производства Забайкальского края. В первом случае испытания грунтов на срез проводились в стендовых условиях без пригрузочного кольца, во-втором — с пригрузочным кольцом, имитирующим давление от вышележащих слоев грунта. Новизна авторского подхода заключается в том, что срез целиков грунта производился в условиях, адекватных реальным геомеханическим процессам в массиве грунтов, окружающем срезное кольцо. Полученные результаты позволили сделать вывод о существенной разнице характеристик прочности исследованных грунтов. Рассмотренные технические средства и методики определения характеристик прочности грунтов позволяют повысить точность и информативность геомеханических испытаний и тем самым обеспечить необходимую надежность и экономичность проектных решений дамб и отвалов.

Ключевые слова: грунты нарушенной структуры, устойчивость грунтовых массивов, стендовые испытания, механические свойства, напряженно-деформированное состояние, кольцевая пригрузка массива, геомеханические испытания, характеристики прочности грунтов.

Благодарность: Работа выполнена в рамках гранта № 328-ГР Совета по научной и инновационной деятельности ЗабГУ.

Для цитирования: *Бабелло В. А., Бейдин А. В., Овешников Ю. М.* Принципы и подходы к определению параметров прочности грунтов дамб и отвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_5.

© В.А. Бабелло, А.В. Бейдин, Ю.М. Овешников. 2022.

Determination of strength of dams and stockpiles: Concept and approaches

V.A. Babello[1], A.V. Beydin[2], Yu.M. Oveshnikov[1]

[1] Transbaikal State University, Chita, Russia
[2] Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union, Krasnokamensk, Russia,
e-mail: BeidinAV@ppgho.ru

Abstract: Improvement of the stability analyses of soil bodies using advanced computer program products needs methodologies and scientifically justified approaches to the reliable determination of mechanical properties of soils. Currently there are different methods to determine soil strength. Mechanical properties of soils differ essentially subject to methodological approaches and test modes. As the best admissible method to determine strength of soil bodies of dams and stockpiles, we selected the method of soil cutting on a full scale. In this regard, we implemented two different approaches to determining internal friction and cohesion of soil bodies at two mining facilities in Transbaikalia. In the first case, the soil cutting tests were carried out on a bench tester without a circumferencial load device; in the second case, the ring load-applying device was used to simulate pressure of overlying soil. The novelty of the authorial approach consists in the fact that the soil cutting conditions are equivalent to the real-life geomechanical processes in surrounding soil mass around a shear hoop. The results demonstrate essentially different strength characteristics obtained in test soils. The devices and methods used to determine soil strength improve the accuracy and self-descriptiveness of geomechanical tests, which ensures the required reliability and economic efficiency of dam and stockpile designs.

Key words: damaged structure soil, soil body stability, bench testing, mechanical properties, stress–strain behavior, circumferencial load application, geomechanical tests, soil strength characteristics.

Acknowledgements: The study was supported by the Council for Research and Innovation of the Transbaikal State University, Grant No. 328-GR.

For citation: Babello V. A., Beydin A. V., Oveshnikov Yu. M. Determination of strength of dams and stockpiles: Concept and approaches. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_5.

Введение

Известно, что надежность проектных решений, касающихся возведения насыпных сооружений таких как, дамбы и отвалы, зависит как от методов расчета, так и достоверности параметров физико-механических свойств грунтов нарушенной структуры. Вместе с тем вопрос о достоверности указанных параметров является наиболее проблемным в геомеханических исследованиях техногенных массивов грунтов. В зависимости от методологических подходов оборудования и видов испытаний грунтов, характеристики их свойств могут существенно отличаться и тем самым не удовлетворяют запросам практики. Изучению этого вопроса посвящены работы [1 – 11].

Наличие в массиве пород с различными параметрами механических свойств и их анизотропией заставляют при компьютерном моделировании геомеханических процессов вводить те или иные

упрощающие допущения, вносящие погрешность в получаемые результаты [12, 13].

Определению характеристик механических свойств техногенно преобразованных грунтов с учетом технологий возведения насыпных сооружений посвящено сравнительно небольшое количество работ. Это связано, прежде всего, со сложностью определения упомянутых параметров стандартными приборами (в лабораторных условиях) ввиду частой несопоставимости размеров отдельных фракций и рабочих камер приборов, а также влияния масштабного эффекта [14—16]. Это обстоятельство делает необходимым конструирование и изготовление крупногабаритных установок (стендов) либо проведение полевых (натурных) испытаний. Обзор натурных испытаний горных пород с целью определения их параметров прочности дан в работе [17].

Согласно ГОСТ 20276.4-2020 (Грунты. Метод среза целиков) полевые испытания грунтов для получения характеристик прочности рекомендуется проводить с применением установки одноплоскостного среза. Главная особенность такого подхода — отсутствие отделения используемого образца от массива, размеры которого значительно больше, чем у образцов, испытываемых в стандартных лабораторных сдвиговых приборах. В этом случае исследователь имеет дело с более типичными для испытываемого грунта образцами с точки зрения структурно-текстурных особенностей и наличия крупных включений. Следует отметить, что под целиком понимается некоторый объем грунта, выделенный из массива с помощью срезного кольца без потери с ним связи. Принципиальная разница между лабораторными и описываемыми полевыми опытами заключается в том, что полевые установки снабжаются не разрезным (двойным) кольцом, а одиночным. При этом плоскость среза является граничной между образцом и грунтовым массивом. Недостатком такого эксперимента являются неизбежные организационно-технологические трудности: создание системы анкеровки для восприятия усилий от нагрузочных устройств, сложность перемещения оборудования по отвалу или дамбе, трудоемкость испытаний.

Учитывая вышеизложенное, целью работы является создание методико-технологической основы определения параметров механических свойств техногенно-преобразованных грунтов в стендовых условиях.

Методики определения характеристик прочности грунтов

Для реализации поставленной цели был разработан стенд с размерами в плане 2,52×2,52 м, который состоял из стоек, продольных и поперечных балок, имеющих коробчатое сечение, объединенных в замкнутые силовые рамы, высотой 2,47 м. При изготовлении центральной балки были использованы два двутавра № 24, объединенных при помощи стальных пластин толщиной 0,02 м. Такая конструкция центральной балки была выбрана исходя из ее функционального назначения — восприятие реактивной вертикальной нагрузки, передаваемой гидродомкратами. Упором для боковых стенок лотка, выполненных из стального листа, служили уголки № 100, горизонтально соединенные при помощи сварки со стойками силовых рам.

С помощью описываемого стенда были реализованы два принципиально различных подхода к определению характеристик прочности грунтов на двух объектах Забайкальского края. Первый подход был использован при определении параметров физико-механических

свойств грунтов нарушенной структуры месторождения Нойон-Тологой ООО «Байкалруд», предполагаемых для строительства дамбы хвостохранилища. Характеристики прочности грунтов изучались в стендовых условиях. В этом случае, одной из главных проблем являлось обеспечение фиксированной горизонтальной плоскости среза и выполнение требований, касающиеся места приложения касательной нагрузки относительно этой плоскости. Игнорирование этого условия приводит к возникновению момента сил и, как следствие, существенному искажению получаемых результатов.

Для решения указанной проблемы было изготовлено устройство, схема и фото которого приведены на рис. 1, 2. Обеспечение выполнения условия наличия фиксированной горизонтальной плоскости среза осуществлялось с помощью стальных пластин *1*, уложенных строго горизонтально на поверхность массива грунта *2*. На пластине *1* устанавливалась тележка *3* на шарикоподшипниках *4*, внутри которой было жестко закреплено стальное срезное кольцо *5* диаметром 0,30 м и высотой 0,15 м.

Восприятие реактивных усилий от гидродомкрата *6* осуществлялось центральной балкой *7*. Упором для горизонтального гидродомкрата *8* служил отрезок трубы с пластиной *9*. Передача срезающего усилия кольцу *5* реализовывалось с помощью пластины *10*.

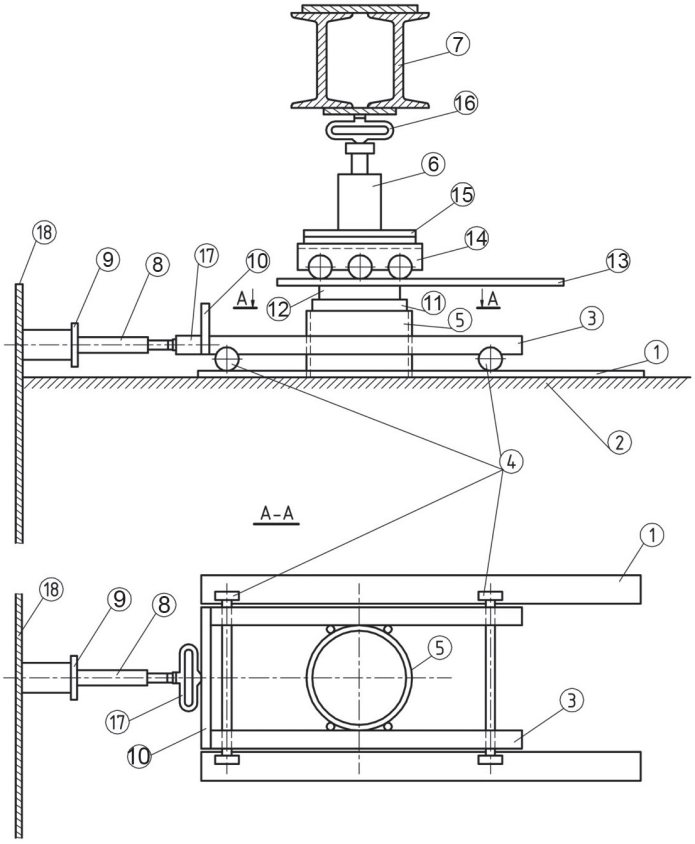

Рис. 1. Принципиальная схема устройства для определения параметров прочности грунтов
Fig. 1. Basic diagram of soil strength testing device

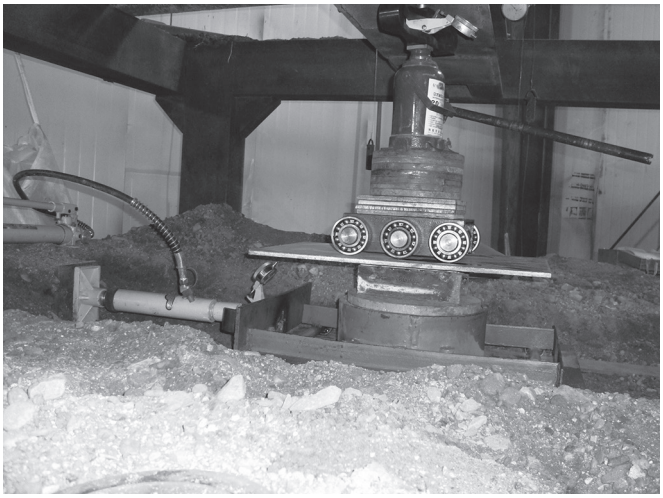

Рис. 2. Общий вид устройства для определения параметров прочности грунтов
Fig. 2. General view of soil strength testing device

Размеры пластин и тележки подбирались таким образом, чтобы обеспечить минимально необходимый зазор между поверхностью массива грунта *2* и нижней плоскостью кольца *5*. Для проведения эксперимента лоток заполнялся грунтом, на поверхности которого *2* располагались пластины *1*, тележка *3* со стальным кольцом *5*, заполненным грунтом. Сверху устанавливался штамп *11* с диаметром, допускающим его свободное перемещение в кольце *5*. Сверху штампа *11* укладывались отрезок швеллера *12* и стальная пластина *13*. На нее последовательно устанавливали тележку *14* с тремя парами шарикоподшипников, регулировочные пластины *15*, гидродомкрат *6* и переносный образцовый динамометр ДОСМ *16*. Для реализации сдвигающих усилий был горизонтально установлен гидродомкрат *8* и переносный образцовый динамометр ДОСМ *17*. Упором для этой горизонтальной конструкции служила стенка стенда *18*.

Для обеспечения необходимой плотности сложения грунтов, укладываемых в срезное кольцо, был использован глубинный вибратор (рис. 3). Контроль плотности грунта в массиве и в срезном кольце осуществлялся с помощью специально изготовленного устройства — плотномера, работающего по принципу пенетрометра [8]. Градуировка плотномера проводилась в емкости, заполненной исследуемыми грунтами.

Особенностью второго подхода являлось применение в опытах на срез со вскрышными грунтами Уртуйского угольного разреза ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского» пригрузочного штампа — кольца [18]. Обоснование использования в экспериментальных исследованиях пригрузочного кольца приведено в работе [19]. Отмечено, что если при лабораторных стандартных опытах на сдвиг вертикальное давление σ практически не ограничено и до величины $\sigma_{проп}$ (начальное критическое давление на грунт) зависимость между σ и деформациями близка к прямолинейной, то при срезе целиков величина σ не может быть выше несущей способности грунта $\sigma_{кр}$. При достижении $\sigma_{кр}$ происходит незатухающая осадка грунта в кольце и дальнейшее увеличение вертикального давления становится проблематичным. В интервале нагрузок $\sigma_{проп} - \sigma_{кр}$ грунт под кольцом находится во второй фазе де-

Рис. 3. Процесс уплотнения грунта в срезном кольце
Fig. 3. Soil compaction in shear hoop

формирования (по Н.М. Герсеванову). В грунте образуются локальные поверхности сдвига, формируются зоны выпора (рыхления), что приводит к существенному снижению характеристик прочности грунта.

По мнению авторов работы [19], нормальные уплотняющие образец давления в рассматриваемом случае не должны превышать величины первой критической нагрузки на грунт. Сравнительный анализ напряженных состояний вблизи контактов плоскости полевого срезного прибора и площадок сдвига в насыпи или отвале позволяют сделать заключение об их неадекватности, например за счет уплотняющего воздействия вышележащих слоев грунта на окружающий массив. Рассматривая методические аспекты этого вопроса, такое воздействие в полевых или стендовых опытах можно обеспечить путем пригрузки поверхности массива грунта, примыкающего к образцу.

Рассматривая второй подход, следует отметить и метод кольцевого нагружения массива грунтов, предложенный В.Л. Кубецким [20], когда сдвиг грунта осуществлялся путем приложения к штампу крутящей нагрузки. Это дает возможность реализовывать в массиве грунта различное напряженно-деформированное состояние и получить технологические преимущества.

Для реализации второго подхода потребовалось создание на уровне изобретения специального оборудования и модификация стенда [21], объединенных общим названием «устройство». Для обеспечения пригрузки массива грунта, окружающего образец, был изготовлен стальной штамп-кольцо диаметром 1,58 м с отверстием в середине радиусом 0,19 м, изгибная жесткость которого была увеличена вертикальными ребрами жесткости. На рис. 4 изображен разрез устройства, на рис. 5 — общий вид устройства сверху, на рис. 6 — разрез Б-Б, на рис. 7 — вид А конструкции срезного кольца, на рис. 8 — срезное и пригрузочное кольца.

В конструкцию модифицированного стенда входят: вертикальные стойки *1*, продольные балки *2*, поперечные балки *3*, балки, установленные в центре каркаса *4*, боковые стенки *18* (рис. 6), подвижной грузоподъемный механизм *5* (рис. 6), обеспечивающий подъем и уста-

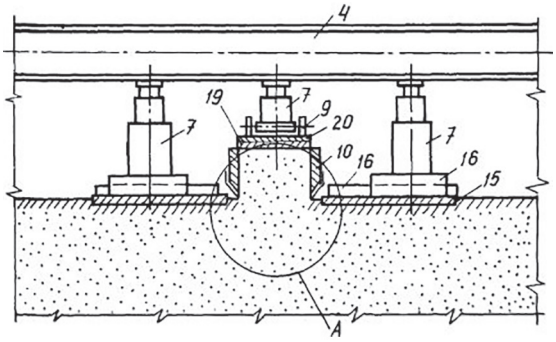

Рис. 4. Устройство в разрезе
Fig. 4. Sectional view of device

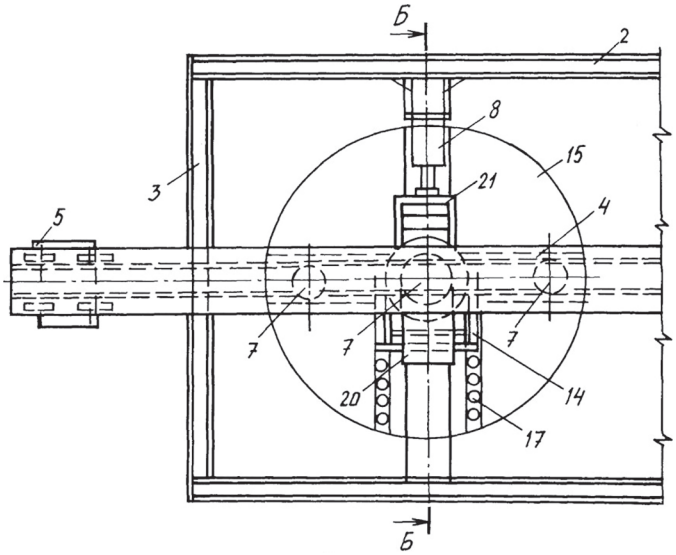

Рис. 5. Общий вид устройства сверху
Fig. 5. Top view of device

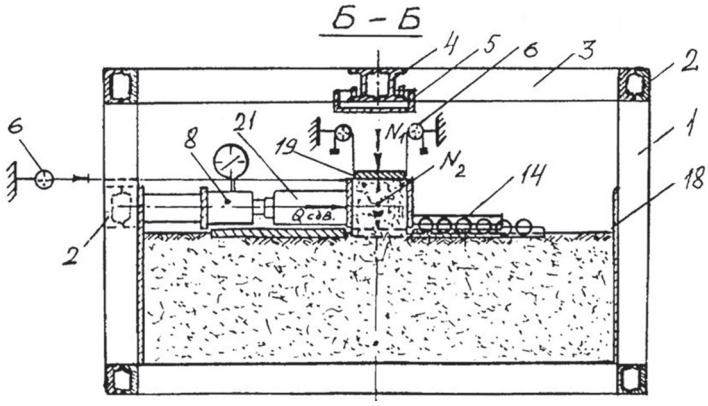

Рис. 6. Разрез Б-Б устройства
Fig. 6. Section B–B of device

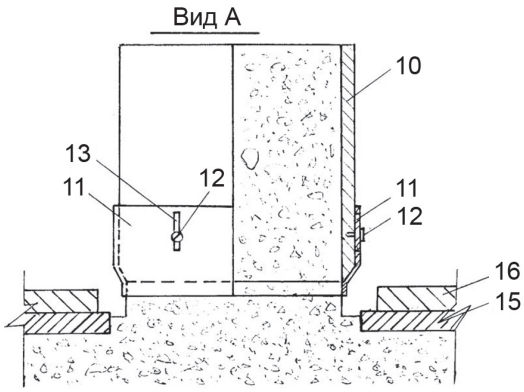

Рис. 7. Вид А конструкции срезного кольца
Fig. 7. View A of shear hoop design

новку пригрузочного кольца *15* (рис. 5), нагрузочные устройства — вертикальные гидродомкраты *7* с пластинами *16* и горизонтальный гидродомкрат *8* (рис. 4, 6). Непосредственно реализацию сдвига срезного кольца *10* с грунтом осуществляет подвижная каретка *9* с пластиной *20* (рис. 4), хомут изменяемой жесткости *11* с винтами *12* и прорезями *13* (рис. 7), бруски *14* со сферическими канавками, устанавливаемыми над пазами с шарикоподшипниками *17* (рис. 5), штамп *19* для передачи вертикальной нагрузки на грунт в кольце *10* (рис. 4). Для регистрации перемещений срезного кольца устанавливаются прогибомеры *6*. Усилие от горизонтального гидродомкрата *8* на срезное кольцо *10* осуществляется с помощью устройства *21*, имеющего коробчатое сечение.

Максимальное значение вертикальной нагрузки в конкрентых условиях может быть предварительно определено по графику зависимости осадки грунта от нагрузки там, где намечается нарушение пропорциональности между осадкой

Рис. 8. Срезное и пригрузочное кольца
Fig. 8. Shear and load-applying hoops

Таблица 1

Гранулометрический состав грунтов
Grain size composition of soils

№ п/п	Лабораторный номер образца	Содержание фракций грунта, %, размерами, мм							
		>10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	<0,10
1	1/1	27,2	14,3	16,4	14,8	8,2	8,3	1,9	8,9
2	1/2	37,6	14,8	15,4	11,4	5,4	6,3	2,0	7,1
3	1/3	27,6	15,4	16,9	14,2	6,3	7,9	3	8,7
4	2/1	9,1	10,6	22,0	30,3	14,7	10,4	1,3	1,6
5	2/2	12,2	10,4	20,2	29,2	14,4	10,0	1,3	2,3
6	2/3	12,7	13,6	25,3	27,0	10,9	8,2	1,2	1,1

и нагрузкой. Для этого грунт в сдвиговом кольце *10* подвергается воздействию ступенчато возрастающей вертикальной нагрузки с непрерывным фиксированием осадок штампа *19*. Опыты проводятся как с пригрузочным кольцом, нагружаемым разными по величине нагрузками, так и без него. Таким образом, для конкретного вида грунта определяется эффект «кольцевой пригрузки», заключающийся в сопоставлении параметров прочности грунта, полученных с использованием пригрузочного кольца и по традиционной схеме применительно к выбранному сооружению.

Конечные значения характеристик прочности грунта получают, используя традиционную схему обработки результатов опытов согласно [7].

Результаты испытаний

По методике первого подхода для проведения опытов на срез и определению параметров прочности грунтов были исследованы грунты, отобранные с двух разных точек на участке Восточный месторождения Нойон-Тологой ООО «Байкалруд». Гранулометрический состав данных грунтов представлен в табл. 1.

Обобщенные результаты опытов с грунтами, предназначенными для устройства верховой части дамбы, представлены в табл. 2. Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 9.

По методике второго подхода с применением устройства, оборудованного пригрузочным кольцом, были исследованы отвальные грунты разреза «Уртуйский» ПАО «ППГХО им. Е.П. Славского».

Всего исследовано четыре разновидности грунта:

- песчано-гравийные грунты с незначительным содержанием глинистых частиц (грунт № 1);
- пылевато-глинистые грунты (№ 2);

Таблица 2

Параметры прочностных свойств грунтов
Strength characteristics of soils

Разновидность грунта	Угол внутреннего трения φ, град.	Сцепление с, кПа
Гравийный грунт с песчаным заполнителем (точка отбора проб № 1)	34	17
Песок гравелистый (точка отбора проб № 2)	32	16

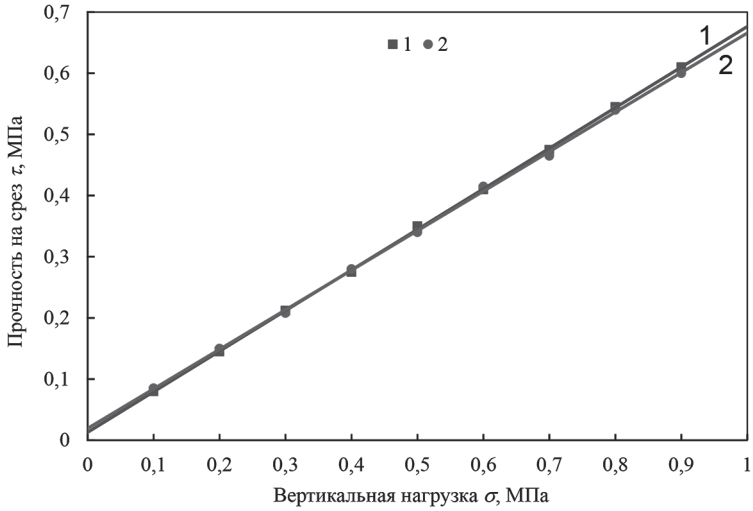

Рис. 9. Изменение прочностных свойств гравийного грунта с песчаным заполнителем (1) и песка гравелистого (2) в зависимости от величины вертикальной нагрузки

Fig. 9. Strength variation in gravelly ground with sand filler (1) and in gravel sand (2) as function of vertical load

- слабо уплотненные разрушенные алевролиты (№ 3);
- контакт песчано-гравийного грунта с алевролитами (№ 4).

Испытания грунтов выполнены как с применением, так и без применения кольцевой пригрузки основания вокруг образца. Установлено, что увеличение эффективности применения пригрузочного кольца связано с возрастанием пригрузки (рис. 10). Аналогичные результаты получены и при испытании грунтов № 2 — 4. Дополнительно были получены значения модулей деформации *E* иссле-

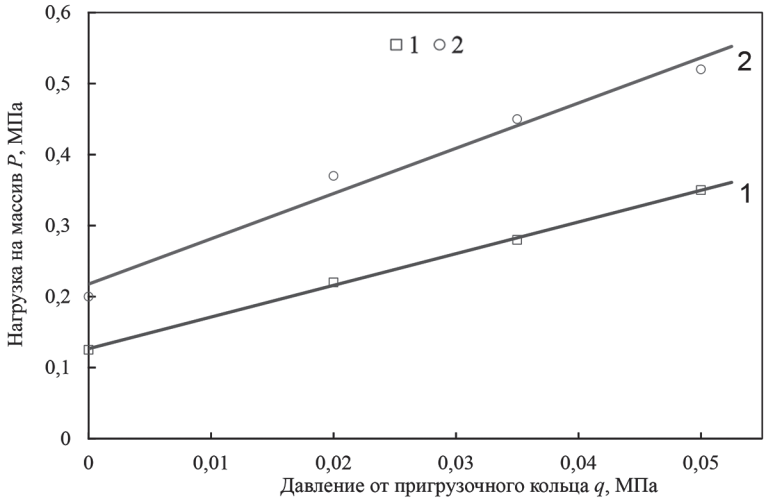

Рис. 10. Влияние давления от пригрузочного кольца q на величины первой критической P_1 (1) и второй предельной P_2 (2) нагрузок (грунт № 1)

Fig. 10. Effect of circumferencial load-applying device pressure q on the first critical load P_1 (1) and on the second limit load P_2 (2) (soil no. 1)

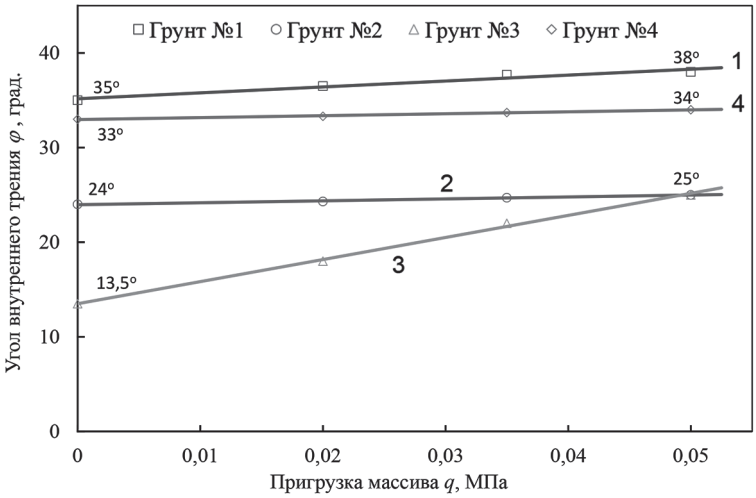

Рис. 11. Изменение параметров прочности грунтов с ростом пригрузки массива
Fig. 11. Change in soil strength with increasing load

дованных грунтов, которые показали увеличение этой характеристики при росте интенсивности пригрузки. Так, при отсутствии пригрузки величина *E* равнялась 4,8 МПа, а при наличии пригрузки 0,05 МПа значение модуля деформации увеличилось до 13,4 МПа. Результаты определения характеристик прочности грунтов показаны на рис. 11.

Необходимо отметить, что значения сцепления в опытах несущественно варьировали. В связи с этим какую-либо зависимость установить не удалось. Расчеты значений φ и *c* по зависимостям теории предельного состояния грунта [22] показали, что полученные характеристики не согласуются с описываемыми результатами прямых испытаний грунтов на срез. Логическое объяснение этого вывода заключается в том, что зависимости теории предельного состояния грунта не вполне отражают свойства реального грунта и его состояние, а описывают лишь особенности расчетной модели. Поэтому применение таким способом полученных значений параметров прочности требует своего детального обоснования.

Выводы

1. Изучение доступных источников, касающихся свойств техногенно-преобразованных грунтов показало, что в источниках очень кратко приведены или не приведены вообще сведения о методиках получения рассматриваемых характеристик прочности, о гранулометрическом составе размеров отдельных кусков, а главное, о технологиях укладки грунтов в отвалы, насыпи, дамбы. В связи с этим корректное сопоставление полученных результатов с известными в литературных источниках интересуемыми данными по грунтам не представляется вполне возможным.

2. При выборе подхода и соответствующей методики определения параметров прочности грунтов в стендовых условиях следует обосновать применение первого или второго подходов. Например, для верхней площадки отвала или дамбы возможен срез целика без кольцевой пригрузки. Для средней и нижней части отвала предпочтение должно быть отдано второму подходу — срез с кольцевой пригрузкой, имитирующей давление вышележащих слоев.

3. Рассмотренные подходы позволяют оценить степень схематизации показателей механических свойств реального грунта параметрами теоретической модели, заложенной в компьютерную программу.

Например, использование зависимостей теории предельного равновесия грунтов [22] для установления характеристик прочности грунта может привести к их существенному занижению по сравнению с результатами прямых испытаний грунта на сдвиг.

4. Рассмотренные подходы и предложенные технические средства позволяют повысить точность и информативность геомеханических испытаний и тем самым обеспечить необходимые надежность и экономичность проектных решений дамб и отвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабенко В. А.*, *Фуникова В. В.* Методические особенности испытаний крупнообломочных грунтов в условиях истинного трехосного сжатия / Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи. Материалы Второй региональной научно-практической конференции. — Краснодар, 2015. — С. 114—118.

2. *Асанов В. А.*, *Ударцев А. А.*, *Каблинов О. С.*, *Кузьминых В. С.* Инженерно-геологическое обеспечение проектирования проходки стволов при освоении новых участков Верхнекамского месторождения калийных солей / Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ. VIII Международная научно-практическая конференция, сборник научных трудов. — СПб., 2017. — С. 111—117.

3. *Просеня А. Г.*, *Вербило П. Э.* Оценка прочности блочного горного массива методом численного моделирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 4. — С. 47—54.

4. *Гоголин В. А.* Деформационные и прочностные характеристики хрупких горных пород при сжатии // Вестник КузГТУ. — 2016. — № 3. — С. 3—7.

5. *Макаров В. В.*, *Голосов А. М.*, *Ксендзенко Л. С.*, *Опанасюк Н. А.* Реверсивные деформации сильно сжатых образцов горных пород: механизм и предвестники / Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при обработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах. Материалы 4-й Российско-Китайской научной конференции. — Владивосток, 2014.

6. *Коршунов В. А.*, *Петров Д. Н.*, *Ястребова К. Н.* Расчетный метод построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний образцов сферическими инденторами / Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ. VIII Международная научно-практическая конференция, сборник научных трудов. — СПб., 2017. — С. 256—264.

7. *Brotons V., Tomas R., Ivorra S., Grediaga A., Martinez-Martinez J., Benavente D., Gomez-Heras M.* Improver correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks // Materials and Structures. 2016, vol. 49, no. 8, pp. 3021—3037. DOI: 10.1617/s11527-015-0702-7.

8. *Trushko V. L.*, *Protosenya A. G.*, *Ochkurov V. I.* Prediction of the ge-omechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, no. 23, pp. 11095—11103.

9. *Trushko V. L.*, *Protosenya A. G.*, *Trushko O. V.* Stress-strain behavior of the workings during the rich iron ores development under the confined aquifers // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, no. 23, pp. 11153 — 11164.

10. *Wagner H., Ladinig T., Blaha H.* Design considerations for pillar systems in deep mines // Geomechanics and Tunnelling. 2016, vol. 9, no. 5, pp. 524–528. DOI: 10.1002/geot.201600045.

11. *Verbilo P. E.* Numerical investigation of the scale effect and REV of jointed rock masses to conditions of apatite-nepheline ore «Plateau Rasvumchorr» JSC «Apatit» // Scientific Reports on Resource Issues. 2016, vol. 1, pp. 117 — 124.

12. *Yang Jian Ping, Chen Wei Zhong, Yang Dian Sen, Yuan Jing Qiang* Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // Computers and Geotechnics. 2015, vol. 64, pp. 20 — 31.

13. *Ivars D. M.*, *Pierce M. E.*, *Darcel C., Reyes-Montes J.*, *Potyondy D. O., Young R. P., Cundall P. A.* The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011, vol. 48, no. 2, pp. 219 — 244. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.014.

14. *Wittke W.* Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM). Berlin: Wiley Ernst & Sohn, 2014. 865 p.

15. *Tianhong Yang, Peitao Wang, Tao Xu, Qinglei Yu, Penghai Zhang, Wenhao Shi, Gaojian Hu* Anisotropic characteristics of jointed rock mass. A case study at Shirengou iron ore mine in China // Tunneling and Underground Space Technology. 2015, vol. 48, pp. 129 — 139.

16. *Kouakou N. M.*, *Cuisinier O., Masrouri F.* Estimation of the shear strength of coarse-grained soils with fine particles // Transportation Geotechnics. 2020, vol. 25. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100407.

17. *Попов В. Н.*, *Шпаков Л. С.*, *Юнаков Ю. Л.* Управление устойчивостью карьерных откосов. — М.: Изд-во «Горная книга», 2008. — 683 с.

18. *Бабелло В. А.* Совершенствование методики оценки прочности нескальных грунтов в полевых условиях // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2004. — № 5. — С. 115 — 118.

19. *Черняк Э. Р.*, *Кальбергенов Р. Г.*, *Чуланов В. В.* Изучение прочностных свойств песков полевыми методами / Исследование инженерно-геологических свойств грунтов: сборник научных трудов. — М.: ПНИИС ГОССТРОЯ СССР, 1986. — С. 8 — 16.

20. *Кубецкий В. Л.*, *Королев М. В.* Повышение информативности испытаний методом кольцевого нагружения // Инженерные изыскания. — 2018. — Т. 12. — № 7-8. — С. 26 — 35.

21. *Бабелло В. А.* Патент РФ № 2276343. Устройство для определения прочностных свойств пород отвалов. Заявл. 21.07.2004. Опубл. 10.05.2006. Бюл. № 13.

22. *Березанцев В. Г.* Расчет оснований сооружений. — Л.: Стройиздат, 1970. — 207 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Babenko V. A., Funikova V. V. Methodological features of true triaxial compression testing of coarse-grained soil. *Inzhenernaya geologiya Severo-Zapadnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya: sovremennoe sostoyanie i osnovnye zadachi. Materialy Vtoroy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Engineering Geology of the Northwest Caucasus and Ciscaucasia: Existing Conditions and Major Challenges. The 2nd Regional Conference Proceedings], Krasnodar, 2015, pp. 114 — 118. [In Russ].

2. Asanov V. A., Udartsev A. A., Kablinov O. S., Kuz'minykh V. S. Geotechnical support of sinking design engineering at new sites of the Upper Kama Potash Salt Deposit. *Innovatsionnye napravleniya v proektirovanii gornodobyvayushchikh predpriyatiy: geomekhanicheskoe obespechenie proektirovaniya i soprovozhdeniya gornykh rabot. VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, sbornik nauchnykh trudov* [Innovative Trends in Mine Planning and Design: Geomechanical Support and Supervision of Mining. VIII International Scientific

and Practical Conference. Collection of scientific papers], Saint-Petersburg, 2017, pp. 111 — 117. [In Russ].

3. Prosenya A. G., Verbilo P. E. Numerical modeling-based assessment of strength of block rock mass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2016, no. 4, pp. 47 — 54. [In Russ].

4. Gogolin V. A. Deformation characteristics and strength properties of brittle rocks in compression. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016, no. 3, pp. 3 — 7. [In Russ].

5. Makarov V. V., Golosov A. M., Ksendzenko L. S., Opanasyuk N. A. Reverse deformations of highly compressed rock samples: Mechanism and precursors. *Nelineynye geomekhaniko-geodinamicheskie protsessy pri obrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh na bol'shikh glubinakh. Materialy 4-y Rossiysko-Kitayskoy nauchnoy konferentsii* [Nonlinear Geomechanics and Geodynamics in Deep-Level Mining. The 4th Sino-Russia Conference Proceedings], Vladivostok, 2014. [In Russ].

6. Korshunov V. A., Petrov D. N., Yastrebova K. N. Computational method for rock failure envelope plotting based on the test data with spherical indenters. *Innovatsionnye napravleniya v proektirovanii gornodobyvayushchikh predpriyatiy: geomekhanicheskoe obespechenie proektirovaniya i soprovozhdeniya gornykh rabot. VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, sbornik nauchnykh trudov* [Innovative Trends in Mine Planning and Design: Geomechanical Support and Supervision of Mining. VIII International Scientific and Practical Conference. Collection of scientific papers], Saint-Petersburg, 2017, pp. 256 — 264. [In Russ].

7. Brotons V., Tomas R., Ivorra S., Grediaga A., Martinez-Martinez J., Benavente D., Gomez-Heras M. Improver correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Materials and Structures*. 2016, vol. 49, no. 8, pp. 3021 — 3037. DOI: 10.1617/s11527-015-0702-7.

8. Trushko V. L., Protosenya A. G., Ochkurov V. I. Prediction of the ge-omechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 23, pp. 11095 — 11103.

9. Trushko V. L., Protosenya A. G., Trushko O. V. Stress-strain behavior of the workings during the rich iron ores development under the confined aquifers. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 23, pp. 11153 — 11164.

10. Wagner H., Ladinig T., Blaha H. Design considerations for pillar systems in deep mines. *Geomechanics and Tunnelling*. 2016, vol. 9, no. 5, pp. 524–528. DOI: 10.1002/geot.201600045.

11. Verbilo P. E. Numerical investigation of the scale effect and REV of jointed rock masses to conditions of apatite-nepheline ore «Plateau Rasvumchorr» JSC «Apatit». *Scientific Reports on Resource Issues*. 2016, vol. 1, pp. 117 — 124.

12. Yang Jian Ping, Chen Wei Zhong, Yang Dian Sen, Yuan Jing Qiang Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*. 2015, vol. 64, pp. 20 — 31.

13. Ivars D. M., Pierce M. E., Darcel C., Reyes-Montes J., Potyondy D. O., Young R. P., Cundall P. A. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011, vol. 48, no. 2, pp. 219 — 244. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.014.

14. Wittke W. *Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM)*. Berlin: Wiley Ernst & Sohn, 2014. 865 p.

15. Tianhong Yang, Peitao Wang, Tao Xu, Qinglei Yu, Penghai Zhang, Wenhao Shi, Gaojian Hu Anisotropic characteristics of jointed rock mass. A case study at Shirengou iron ore mine in China. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 48, pp. 129 — 139.

16. Kouakou N. M., Cuisinier O., Masrouri F. Estimation of the shear strength of coarse-grained soils with fine particles. *Transportation Geotechnics*. 2020, vol. 25. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100407.

17. Popov V. N., Shpakov L. S., Yunakov Yu. L. *Upravlenie ustoychivost'yu kar'ernykh otkosov* [Pitwall slope stability control], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 683 p.

18. Babello V. A. Improvement of strength assessment procedure for rocky ground on a full scale. *News of higher educational institutions. Construction*. 2004, no. 5, pp. 115 — 118. [In Russ].

19. Chernyak E. R., Kal'bergenov R. G., Chulanov V. V. Field techniques for studying strength properties of soils. *Issledovanie inzhenerno-geologicheskikh svoystv gruntov: sbornik nauchnykh trudov* [Study of geotechnical properties of soils: Collection of scientific papers], Moscow, PNIIS GOSSTROYA SSSR, 1986, pp. 8 — 16.

20. Kubetskiy V. L., Korolev M. V. Improvement of self-descriptiveness of hoop loading tests. *Inzhenernye izyskaniya*. 2018, vol. 12, no. 7-8, pp. 26 — 35. [In Russ].

21. Babello V. A. *Patent RU 2276343*. 10.05.2006. [In Russ].

22. Berezantsev V. G. *Raschet osnovaniy sooruzheniy* [Structure base design], Leningrad, Stroyizdat, 1970, 207 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабелло Виктор Анатольевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: chita_bva@mail.ru,
Бейдин Алексей Владимирович — канд. техн. наук,
директор Центральной научно-исследовательской
лаборатории, Приаргунское производственное
горно-химическое объединение,
e-mail: BeidinAV@ppgho.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4196-1695,
Овешников Юрий Михайлович[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: ogr_chitgu@mail.ru,
[1] Забайкальский государственный университет.
Для контактов: Бейдин А.В., e-mail: BeidinAV@ppgho.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Babello[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: chita_bva@mail.ru,
A.V. Beydin, Cand. Sci. (Eng.),
Director of Central Research Laboratory,
Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union,
674673, Krasnokamensk, Russia,
e-mail: BeidinAV@ppgho.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4196-1695,
Yu.M. Oveshnikov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: ogr_chitgu@mail.ru,
[1] Transbaikal State University,
672039, Chita, Russia.
Corresponding author: A.V. Beydin, e-mail: BeidinAV@ppgho.ru.

Получена редакцией 02.12.2021; получена после рецензии 04.07.2022; принята к печати 10.10.2022.
Received by the editors 02.12.2021; received after the review 04.07.2022; accepted for printing 10.10.2022.