

УДК 622.1:550.82; 624.131.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
РАЗДРОБЛЕННЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ “ЖЕЛЕЗНЫЙ КРЯЖ”**

В. А. Бабелло^{1,2}, В. М. Лизункин², М. В. Лизункин², С. А. Соболев³

¹Читинский филиал Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: chita_bva@mail.ru, ул. Александрo-Заводская, 30, 672039, г. Чита, Россия

²Забайкальский государственный университет,
E-mail: prmpi.zabgu@mail.ru, lmv1972@mail.ru, ул. Александрo-Заводская, 30, 672039, г. Чита, Россия

³АО “Висмут”, E-mail: info@vismut-geo.ru,
тер. ТОО Забайкалье, 674347, с. Козлово, Забайкальский край, Россия

Для расчета устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища проведены экспериментальные исследования раздробленных скальных пород на крупногабаритном стенде методом среза целиков. Определены их прочностные свойства при различных значениях гранулометрического состава и плотности, а также диаметра срезных колец и нормального давления. Установлено, что угол внутреннего трения раздробленных скальных пород в уплотненном состоянии изменяется в диапазоне 35–40°, сцепление от 0.0256 до 0.0293 МПа, в неуплотненном состоянии в диапазоне 25–30° и от 0.0163 до 0.0184 МПа соответственно.

Месторождение, хвостохранилище, дамба, раздробленные скальные породы, стенд, прочностные свойства, удельное сцепление, угол внутреннего трения, метод среза целиков

DOI: 10.15372/FTPRPI20230208

Месторождение “Железный Кряж” расположено в Калганском районе Забайкальского края, в 400 км юго-восточнее города Читы. Залежь сложена осадочно-метаморфическими породами белетуйской свиты венд-кембрийского возраста и прорывающими их палеозойскими и мезозойскими интрузиями.

Кварциты представляют верхнебелетуйскую подсвиту (Vbl₂) белетуйской свиты, занимающей основную часть площади месторождения и слагающей восточное крыло крупной синклинали северо-восточного простиранья. Породы белетуйской свиты интенсивно проработаны в результате контактового метаморфизма с превращением песчаников верхней подсвиты в кварциты и преобразованием алевролит-сланцевой толщи до амфиболовой фации с образованием скарнов и роговиков. Кварциты имеют сероватый оттенок, тонко-среднезернистую структуру, иногда полосчатую текстуру с характерным раковистым изломом.

В настоящее время АО “Висмут” проводит разработку месторождения “Железный Кряж” открытым способом. Основной объем вскрышных пород представлен скарнированными кварцитами.

Переработку руд планируется осуществлять на обогатительной фабрике с годовой производительностью 2.5 млн т железной и 850 тыс. т золотосодержащей руды. Отходы обогащения предполагается складировать в хвостохранилище, дамба которого будет построена из скальных вскрышных пород различного гранулометрического состава после отбойки их буровзрывным способом.

Предварительно рассчитаны следующие основные параметры дамбы: отметка гребня — 701.0 м; длина по гребню дамбы — 808.2 м; ширина по гребню — 8 м; крутизна верхового откоса — 1:3; крутизна низового откоса — 1:3.2; максимальная высота дамбы — 22.0 м. Оценка устойчивости и разработка проекта ограждающей дамбы должны осуществляться на основе исследований процесса деформирования массива пород нарушенного сложения — раздробленных скарнированных кварцитов.

Известно, что надежность проектных решений, касающихся геомеханического обоснования устойчивых размеров дамбы, зависит как от методов расчета, так и достоверности исходных параметров физико-механических свойств горных пород. Последнее является одним из наиболее сложных факторов объективности геомеханических расчетов. Применение в геомеханических расчетах, моделировании, аналитических исследованиях недостоверных параметров прочности и деформируемости пород может привести к возникновению недопустимых деформаций и потере устойчивости дамбы и ее отдельных элементов.

Изучением механических свойств горных пород естественного и нарушенного сложения занимались многие отечественные и зарубежные ученые, используя разные подходы [1 – 14]. В настоящее время для определения показателей механических свойств горных пород применяются различные методы, которые разделяют на прямые и косвенные. К прямым методам относятся лабораторные и натурные эксперименты. Косвенные методы базируются на других свойствах геоматериала (например, скорость распространения волн и т. д.) и известных законах механики.

В зависимости от метода испытания и типов приборов, при помощи которых анализируется материалы, полученные характеристики пород могут значительно различаться. Известно, что на показатели механических свойств пород существенное влияние оказывают размеры и формы образцов, характер их нагружения и взаимодействия с нагружающим устройством. Особое место в рассматриваемом вопросе занимают раздробленные скальные породы различного гранулометрического состава. Определению характеристик механических свойств таких пород посвящено сравнительно небольшое количество работ, результаты которых применимы для определенных условий.

Учитывая важность вопроса прогноза физико-механических свойств раздробленных пород, рассмотрены и проанализированы известные методы и технические средства для их определения. Они делятся на три группы: лабораторные испытания пород, отобранных из толщи разрыхленного взрывом массива; натурные испытания пород, проводимые с использованием полевого оборудования; стендовые испытания пород, позволяющие моделировать поведение реального массива нарушенного сложения на специальных устройствах.

Определение механических параметров в лабораторных условиях затруднено из-за несопоставимости размеров отдельных кусков породы и камер приборов, влияния масштабного эффекта и неопределенности коэффициента перехода к параметрам механических свойств раздробленных скальных пород. Немаловажные факторы — размер кольца стандартного прибора одноплоскостного среза и зазор между кольцами — создают проблемы при испытаниях пород с крупными включениями. Известно, что напряженное состояние пород в массивах вызвано воздействием внешних нагрузок и силами собственного веса, поэтому для решения как теоре-

тических, так и практических задач большое значение имеет воспроизведение в лабораторных условиях процесса объемного напряженного состояния породы. Для этой цели применяют стабилметры, реализующие осесимметричное напряженное состояние, и приборы трехосного сжатия с независимым регулированием главных напряжений. К основному недостатку серийных стабилметров следует отнести малый размер рабочей камеры прибора, что не позволяет испытывать породы с крупными включениями.

Натурные испытания проводятся в полевых условиях, что позволяет установить механические свойства больших объемов пород в условиях естественного залегания. Сохранение естественного напряженного состояния массива пород, которое часто бывает неизвестно и не может быть воспроизведено при лабораторных испытаниях, обеспечивает качество и надежность информации о свойствах пород. К числу достоинств полевых испытаний следует отнести возможность использовать реальные образцы, размеры которых значительно превосходят размеры проб, испытываемых в лабораторных условиях. Это позволяет учитывать структурно-текстурные особенности пород и наличие крупных включений. Кроме того, результаты полевых (натурных) испытаний используются для разработки моделей (математических, физических и др.) при исследовании процессов сжимаемости и деформируемости пород с различными значениями входных параметров и факторов. К числу недостатков традиционных натурных методов определения параметров механических свойств пород нарушенного сложения следует отнести проблему анкеровки испытательных устройств в массиве для восприятия реактивной составляющей вертикального гидравлического домкрата и их ограниченные функциональные возможности с точки зрения определения только характеристик прочности либо деформируемости. Отметим, что такие опыты достаточно дорогие по стоимости и трудоемкие.

МЕТОДИКА, ОБОРУДОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель настоящей работы — определение прочностных характеристик (удельное сцепление, угол внутреннего трения) вскрышных пород месторождения “Железный кряж” с размерами фракций – 60 + 0, – 80 + 0, – 100 + 0 мм. Испытания раздробленных скальных пород проведены с помощью моделирования на стенде.

Основным методом определения указанных характеристик прочности пород принят метод среза целиков [15]. Породный массив в данном исследовании представляет собой массив горных пород нарушенного сложения, а под целиком понимается часть породы цилиндрической формы, вырезанная по боковой поверхности и заключенная в срезном кольце без отрыва от массива и соединяющаяся с ним по плоскости основания.

Испытания целиков породы на срез проводятся для установки следующих характеристик прочности: сопротивления породы срезу τ , угла внутреннего трения φ , удельного сцепления c . Характеристики составляются по результатам среза целика или крупногабаритного монолита породы, отделенного по боковой поверхности от массива по фиксированной плоскости касательной нагрузкой при одновременном нагружении целика породы силой p , нормальной к плоскости среза.

Сопротивление породы срезу устанавливалось как предельное среднее касательное напряжение, при котором целик сдвигается по фиксированной плоскости при заданном нормальном давлении. Значения φ и c вычислялись по результатам не менее трех испытаний целиков породы при различных значениях нормального давления. Прочностные характеристики — угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c рассчитывались по значениям сопротивления пород срезу $\tau = p \operatorname{tg} \varphi + c$. Величину τ определяли не менее чем при трех различных значениях p .

Разработано необходимое оборудование, соответствующее методике для реализации среза целика [15]:

- кольцо с внутренним диаметром не менее $D=200$ мм. Для испытаний крупнообломочных пород с включениями более 40 мм допускается увеличение диаметра кольца, при этом его высота должна составлять $H=0.55D$, размер включений не должен превышать 0.2 диаметра кольца. На основании данных проектного института ООО “ЕМС-майнинг” для рассматриваемых фракций 60, 80, 100 мм изготовлены соответствующие срезные кольца диаметрами 0.3, 0.4, 0.5 м;

- жесткие штампы с размерами, соответствующими внутреннему диаметру кольца;

- механизмы для вертикального нагружения целика породы и создания срезающей нагрузки с анкерным устройством;

- устройства для измерения деформаций целика породы и прикладываемой нагрузки.

Конструкция установки для определения характеристик прочности пород должна обеспечивать возможность передачи:

- нормальной нагрузки центрально на штамп по оси целика породы;

- касательной нагрузки в плоскости, перпендикулярной к приложению нормальной нагрузки, при этом она должна быть приложена в плоскости среза или выше ее на расстоянии не более 30 мм;

- нормальной и касательной нагрузок ступенями или в виде непрерывно возрастающей нагрузки с постоянной скоростью.

Исследования проводились на крупногабаритном стенде, представляющем собой лоток для размещения в нем породы и силовые рамы для восприятия реактивной нагрузки (рис. 1). Конструктивно стенд состоит из стоек, продольных и поперечных балок, объединенных в замкнутые силовые рамы, высотой 2.47 м. Стойки и балки имеют коробчатое сечение, выполненное из швеллера. Центральная балка изготовлена из двух двутавров, объединенных сверху и снизу при помощи стальных пластин толщиной 0.02 м. Такая конструкция центральной балки выбрана исходя из ее функционального назначения — восприятия реактивной вертикальной нагрузки, передаваемой гидродомкратом.



Рис. 1. Стенд для исследования механических свойств пород

К стойкам силовых рам горизонтально приварены уголки, служащие упором для боковых стенок лотка, выполненных из стального листа. Для предотвращения возможных деформаций боковых стенок лотка они соединялись между собой при помощи стальных тяжей. Для установки горизонтального гидродомкрата, служащего для передачи срезающих усилий на целик

руды, к одной из стенок с помощью сварки прикреплен отрезок трубы диаметром 0.135 м и длиной 0.40 м. Размеры стенда в плане 2.52×2.52 м; высота емкости для загрузки руды 1.57 м; высота силовых конструкций над емкостью 0.90 м.

При выборе схемы испытания — срез целика или срез с использованием двойного (разрезного) кольца — предпочтение было отдано первому. Испытания проводились по схеме незаглубленного срезаемого целика, плоскость сдвига являлась граничной между целиком и массивом породы. Обеспечивалось фиксирование горизонтальной плоскости среза и выполнение требований относительно приложения касательной нагрузки не более чем на 30 мм выше этой плоскости [15]. Нарушение данного условия могло привести к возникновению момента сил и, как следствие, существенному искажению получаемых результатов. Для определения прочностных свойств раздробленной скальной породы изготовлено устройство (рис. 2).

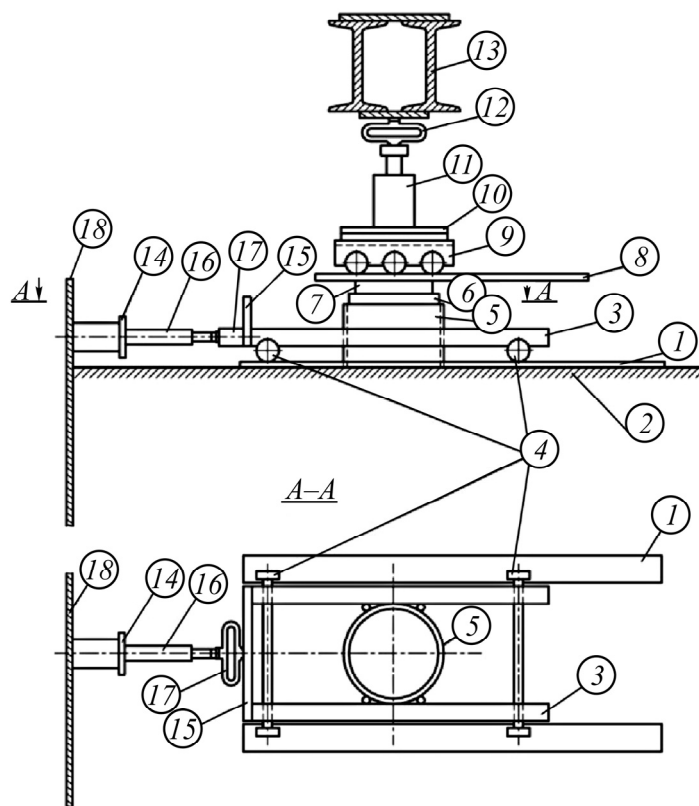


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для определения параметров прочности раздробленной скальной породы

Фиксирование горизонтальной плоскости среза осуществлялось с помощью стальных пластин 1, уложенных строго горизонтально на поверхность массива раздробленной скальной породы 2. На пластине 1 устанавливалась тележка 3 на шарикоподшипниках 4, внутри которой жестко закреплялось стальное срезное кольцо 5 (диаметром 0.30, 0.40, 0.50 м и высотой соответственно 0.150, 0.220, 0.275 м). Размеры пластин и тележки подбирали таким образом, чтобы обеспечить минимально необходимый зазор между поверхностью массива 2 и нижней плоскостью кольца 5. Для проведения эксперимента лоток заполняли породой, на поверхности 2 которой помещали пластины 1, тележку 3 со стальным кольцом 5, заполненным породой. Сверху устанавливали штамп 6 с диаметром, допускающим его свободное перемещение в кольце 5.

Сверху штампа 6 укладывали отрезок швеллера 7 и стальную пластину 8. На нее последовательно устанавливали тележку 9 с тремя парами шарикоподшипников, регулировочные пластины 10, гидродомкрат 11 и переносной образцовый динамометр ДОСМ 12 с упором в центральную балку 13, выполненную из двутавров, соединенных между собой стальными пластинами. Между упорными пластинами 14 и 15 тележки устанавливали горизонтальный гидродомкрат 16 и переносной образцовый динамометр ДОСМ 17. Упором для этой горизонтальной конструкции служила стенка стенда 18.

Разработанная конструкция устройства отвечает требованиям нормативных документов. Методика проведения испытаний раздробленной скальной породы на срез соответствовала методике, изложенной в [15]. Для исключения подъема стенда от реактивной составляющей усилия гидравлического домкрата он помещался в котлован с обратной засыпкой и обваловкой пазах породой.

Первая серия опытов в стенде на срез раздробленной скальной породы выполнялась при помощи срезного кольца диаметром 0.3 м. Использовалась порода как в рыхлоотсыпанном состоянии, так и в максимально уплотненном со средней плотностью соответственно $\rho = 2.10$ и 2.28 г/см^3 . Для создания максимально возможного в рассматриваемых условиях уплотнения породы применялся глубинный вибратор, который погружался в срезное кольцо и вокруг него. Гранулометрический состав испытываемых раздробленных скальных пород определялся методом замещения объема [16] (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав раздробленных скальных пород в срезном кольце диаметром 0.3 м

Показатель	Фракция, мм				
	– 60 + 40	– 40 + 10	– 10 + 0.1	– 0.1 + 0	Итого
Масса, кг	2.47	18.26	0.98	0.12	21.83
Выход, %	11.30	83.60	4.50	0.60	100.00

Осредненные значения параметров прочности раздробленных скальных пород в срезном кольце диаметром 0.3 м представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Значения параметров прочности раздробленных скальных пород (диаметр срезного кольца 0.3 м), МПа

Нормальное напряжение σ	Касательное напряжение τ	Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление c
С уплотнением породы в срезном кольце			
0.10	0.093	35.1	0.0256
0.20	0.172		
0.30	0.232		
0.40	0.312		
0.50	0.375		
Без уплотнения породы в срезном кольце			
0.10	0.060	25.1	0.0163
0.20	0.117		
0.30	0.150		
0.40	0.210		
0.50	0.248		

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 3.

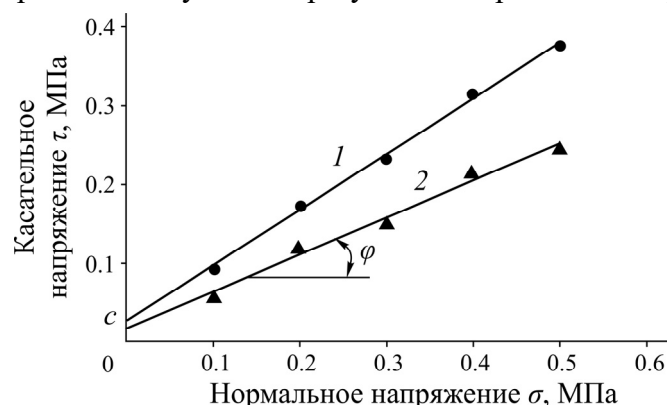


Рис. 3. Зависимости сопротивления сдвигу от нормальных напряжений $\tau=f(\sigma)$ раздробленных скальных пород в срезном кольце диаметром 0.3 м: 1 — с уплотнением; 2 — без уплотнения породы

Аналогичные опыты проводились с применением срезных колец диаметрами 0.4 и 0.5 м. Гранулометрический состав испытываемой породы приведен в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Гранулометрический состав раздробленных скальных пород в срезных кольцах*

Показатель	Фракция, мм						Итого
	– 100 + 80	– 80 + 60	– 60 + 40	– 40 + 10	– 10 + 0.1	– 0.1 + 0	
Масса, кг	— / 23.75	11.73 / 19.21	12.55 / 9.19	29.66 / 51.84	2.16 / 8.43	0.81 / 3.23	56.91 / 115.65
Выход, %	— / 20.53	20.60 / 16.61	22.00 / 7.96	52.10 / 44.80	3.80 / 7.30	1.50 / 2.80	100.00 / 100.00

*Значения для диаметров 0.4 м / 0.5 м

Плотности пород для срезных колец диаметрами 0.4 и 0.5 м составили соответственно для рыхлоотсыпанных пород 2.15 и 2.2 г/см³, уплотненных 2.31 и 2.39 г/см³. Осредненные значения параметров прочности раздробленных скальных пород в срезных кольцах диаметрами 0.4 и 0.5 м представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Значения параметров прочности раздробленных скальных пород*

Нормальное напряжение σ , МПа	Касательное напряжение τ , МПа	Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление c , МПа
С уплотнением породы в срезном кольце			
0.10 / 0.10	0.095 / 0.107	36.0 / 39.8	0.0262 / 0.0293
0.20 / 0.20	0.180 / 0.207		
0.30 / 0.30	0.233 / 0.270		
0.40 / 0.40	0.332 / 0.370		
0.50 / 0.50	0.383 / 0.442		
Без уплотнения породы в срезном кольце			
0.10 / 0.10	0.063 / 0.070	26.7 / 30.0	0.0164 / 0.0184
0.20 / 0.20	0.125 / 0.142		
0.30 / 0.30	0.160 / 0.187		
0.40 / 0.40	0.225 / 0.260		
0.50 / 0.50	0.265 / 0.300		

*Значения для диаметров 0.4 м / 0.5 м

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 4.

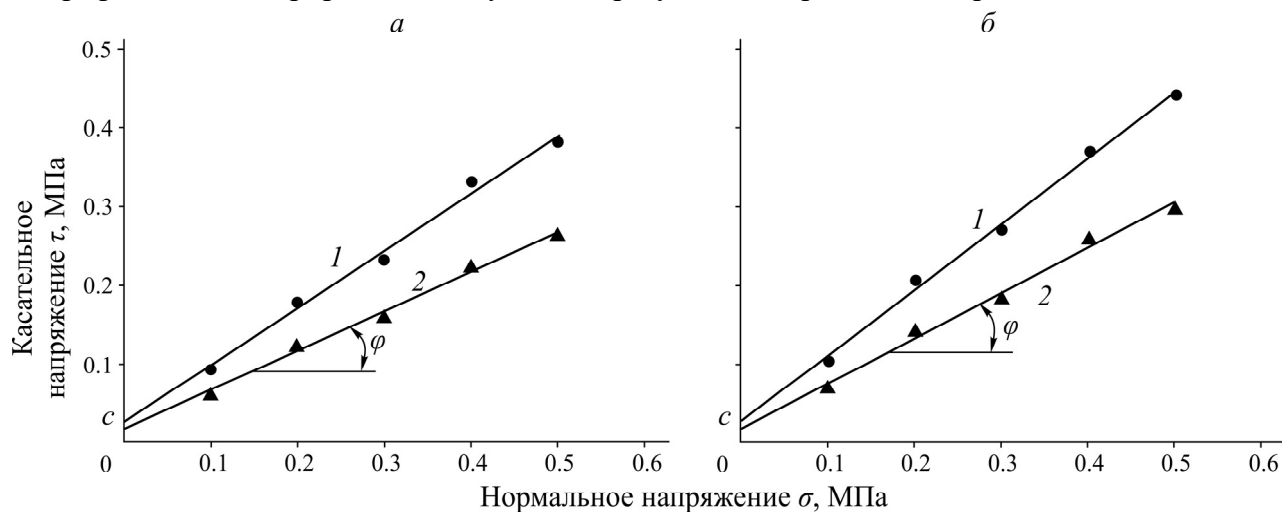


Рис. 4. Зависимости сопротивления сдвигу от нормальных напряжений $\tau=f(\sigma)$ раздробленных скальных пород в срезном кольце диаметром 0.4 м (а) и 0.5 м (б): 1 — с уплотнением; 2 — без уплотнения породы

Анализ полученных результатов показал, что угол внутреннего трения исследованных раздробленных скальных пород в уплотненном состоянии изменяется в диапазоне $35-40^\circ$, сцепление от 0.0256 до 0.0293 МПа, а в неуплотненном (рыхлоотсыпанном) в пределах $25-30^\circ$ и 0.0163–0.0184 МПа соответственно. Вероятно, такой разброс обусловлен вариативностью диаметров срезных колец (0.3, 0.4, 0.5 м), объема, массы породы в них, а также различием гранулометрического состава пород в кольцах и их оснований и степени начального уплотнения.

ВЫВОДЫ

В целях обоснования устойчивости ограждающей дамбы для условий карьера “Железный Кряж” на крупногабаритном стенде методом среза целиков выполнен комплекс исследований прочностных характеристик раздробленных скальных пород с различным гранулометрическим составом. Проведенные испытания показали, что дамба может обладать достаточным коэффициентом запаса устойчивости в случае, если породы, формирующие ее тело, имеют известный гранулометрический состав с определенными экспериментальными характеристиками прочности. В результате исследований установлено, что угол внутреннего трения раздробленных скальных пород в уплотненном состоянии изменяется в диапазоне $35-40^\circ$, сцепление 0.0256–0.0293 МПа, в неуплотненном (рыхлоотсыпанном) — $25-30^\circ$ и 0.0163–0.0184 МПа соответственно.

Необходимы дальнейшие комплексные исследования по определению физико-механических свойств раздробленных скальных пород, в том числе и по обоснованию параметров их прочностных свойств. Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании и создании новых защитных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиангиров Р. С., Кальберген Р. Г. Оценка деформируемости крупнообломочных грунтов // Инж. геология. — 1987. — № 3. — С. 107–117.
2. Криворотов А. П. Условия разрушения образца грунта в приборе одноплоскостного среза // Изв. вузов. Строительство. — 2000. — № 1. — С. 133–136.

3. Низаметдинов Ф. К., Нагибин А. А., Левашов В. В., Низаметдинов Р. Ф., Низаметдинов Н. Ф., Касымжанова А. Е. Натурные методы исследования прочностных свойств горных пород и породных контактов // ФТПРПИ. — 2016. — № 2 — С. 26–33.
4. Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Определение деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважины // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 96–102.
5. Лизункин В. М., Бабелло В. А., Лизункин М. В., Бейдин А. В. Оценка деформируемости раздробленных скальных пород Стрельцовского рудного поля // Горн. журн. — 2017. — № 2. — С. 84–92.
6. Лизункин В. М., Бабелло В. А., Лизункин М. В., Бейдин А. В. Оценка прочностных свойств ураносодержащих руд Стрельцовского рудного поля // Горн. журн. — 2018. — № 4. — С. 51–55.
7. Gercek H. Poisson's ratio values for rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2007, Vol. 44, No. 1. — P. 1–13.
8. Kayabasi A., Gokceoglu C., and Ercanoglu M. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, Vol. 40, No. 1. — P. 55–63.
9. Seif El Dine B., Dupla J. C., Frank R., Canou J., and Kazan Y. Mechanical characterization of matrix coarse-grained soils with a large-sized triaxial device, Canadian Geotech. J., 2010, Vol. 47, No. 4. — P. 425–438.
10. Xu W. J., Wang S., Zhang H. Y., and Zhang Z. L. Discrete element modeling of a soil-rock mixture used in an embankment dam, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2016, Vol. 86. — P. 141–156.
11. Zou P., Zhao X., Meng Z., Li A., Liu Z., and Hu W. Sample rocks tests and slope stability analysis of a mine waste dump, Advances Civil Eng., 2018. — 6835709.
12. Yang Jian Ping, Chen Wei Zhong, Yang Dian Sen, and Yuan Jing Qiang. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling, Comp. Geotech., 2015, Vol. 64. — P. 20–31.
13. Ivars D. M., Pierce M. E., Darcel C., Reyes-Montes J., Potyondy D. O., Young R. P., and Cundall P. A. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modeling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2011, Vol. 48, No. 2. — P. 219–244.
14. Kouakou N. M., Cuisinier O., and Masrouri F. Estimation of the shear strength of coarsegrained soils with fine particles, Transportation Geotec., 2020, Vol. 25.
15. ГОСТ 20276.4-2020. Грунты. Метод среза целиков. Введ. 01.01.2021. — М.: Стандартинформ, 2020. — 12 с.
16. ГОСТ 28514-90. Строительная геотехника. Определение плотности грунтов методом замещения объема. Введ. 01.05.1990. — М.: Стандартинформ, 2005. — 5 с.

Поступила в редакцию 14/III 2023

После доработки 15/III 2023

Принята к публикации 16/III 2023