

УДК 622.1:550.82; 624.131.3

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ СКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД
НА ДАМБАХ И ОТВАЛАХ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В. А. Бабелло^{1,2}, М. В. Лизункин²

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

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

Установлены параметры сжимаемости скальных пород нарушенного сложения для прогноза осадки горнотранспортного оборудования и устойчивости дамбы. Экспериментальные исследования проведены на крупногабаритном стенде штамповым методом при различных значениях плотности скальной вскрышной породы и нормального давления. Представлен способ оценки деформируемости скальных вскрышных пород с помощью пластины и геодезической рейки. Полученные результаты использовались для оценки возможности прохождения горнотранспортного оборудования при возведении дамбы и расчета ее устойчивости.

Месторождение, хвостохранилище, дамба, отвалы скальных вскрышных пород, стенд, деформационные свойства, проходимость горнотранспортного оборудования, устойчивость, модуль деформации, штамповый метод

DOI: 10.15372/FTPRI20230407

В настоящее время в горнорудной промышленности в ряде случаев не обеспечивается проходимость горнотранспортного оборудования на отвалах и дамбах. Среди методов прогноза осадок транспорта и механизмов можно выделить главные факторы, влияющие на вертикальные сжимающие напряжения в массиве и параметры деформируемости горных пород.

Существующий подход к прогнозу таких осадок выполняется методом послойного суммирования [1], при котором рекомендуется определять значения вертикальных сжимающих напряжений в отдельных точках массива горных пород с помощью теории упругости. Экспериментальные исследования компонент напряженного состояния таких массивов [2–6] подтверждают необходимость внесения корректив в аналитические зависимости, описывающие распределение напряжений методами теории упругости, например корректировку значений напряжений в точках центральной вертикали нагруженных участков массивов, полученных с помощью формул А. Лява [1, 7]. Она заключается в введении поправочных коэффициентов в упругое решение. Для реализации такого подхода необходим детальный анализ и обобщение имеющихся результатов экспериментальных исследований напряженного состояния массивов пород нарушенного сложения. Накопленные экспериментальные данные по определению компонент напряженного состояния в массивах после соответствующих осреднений позволяют получить некоторые закономерности распределения напряжений и поправочные коэффициенты к упругому решению.

Оценка параметров деформируемости пород дамб и отвалов, согласно [1], выполняется с помощью лабораторных и полевых методов.

ЛАБОРАТОРНЫЙ МЕТОД

Не останавливаясь на известных недостатках лабораторных методов определения характеристик деформируемости горных пород, отметим наиболее существенный — влияние масштабного фактора [8–15]. К этому необходимо добавить сложность воспроизведения неоднородности и анизотропии пород нарушенного сложения, поступающих в реальных условиях из забоев в различных соотношениях литологических разностей. Тем не менее лабораторные методы испытаний пород в настоящее время имеют широкое распространение. В связи с этим следует отметить, что наиболее полно и достоверно значения механических характеристик пород могут быть определены при разумном сочетании полевых и лабораторных методов.

Одним из примеров использования лабораторных методов является случай, когда при расчете осадок горнотранспортного оборудования рекомендуется использовать результаты испытаний пород нарушенного сложения на уплотнение в условиях компрессионного сжатия [1]. Здесь параметры деформируемости принимаются по графикам уплотняемости пород в зависимости от ожидаемых значений вертикальных сжимающих напряжений в массиве. Ограниченность такого подхода заключается в том, что при изменении нагрузки на отвалы и дамбы хвостохранилищ значения параметров деформируемости пород принимаются без учета соотношения компонент вертикальных напряжений к горизонтальным.

Выходом из сложившейся ситуации, на наш взгляд, было бы применение стабилметрических испытаний горных пород нарушенного сложения [16–22]. В отличие от компрессионных испытаний таких пород, в лабораторных условиях воспроизводится процесс их трехосного сжатия, что позволяет более достоверно определять параметры деформируемости. Основной проблемой проведения таких испытаний в рассматриваемых условиях является задание параметров напряженного состояния для каждого конкретного случая дамбы или отвала.

Одним из подходов к решению данной проблемы можно считать прямое измерение вертикальных и горизонтальных напряжений с помощью датчиков, установленных в массиве пород нарушенного сложения, сформированном в условиях стенда. Это позволяет создать достаточный объем пород с необходимой плотностью и влажностью и передать на него удельную нагрузку от горнотранспортного оборудования с помощью штампов. Полученные таким образом значения вертикальных и горизонтальных напряжений и их соотношения могут быть использованы при проведении опытов по определению деформационных характеристик в стабилметре.

ШТАМПОВЫЙ МЕТОД

Основное достоинство данного вида испытаний на сжимаемость — осуществление экспериментов непосредственно в массиве горных пород нарушенного сложения, недостаток — необходимость использования сложных систем нагружения и трудоемкость опытов.

В качестве примера рассмотрим особенности оценки сжимаемости вскрышных пород месторождения “Железный Кряж” в Забайкальском крае, представленных скарнированными кварцитами [23]. Обогастительная фабрика с годовой производительностью 2.5 млн т железной и 850 тыс. т золотосодержащей руды является одним из основных элементов производственного цикла. Для размещения отходов обогащения планируется возведение дамбы из скальных вскрышных пород, состоящих из отдельных кусков различного размера, полученных после отбойки их буровзрывным способом.

Проектирование дамбы осуществлялось ООО “ЕМС-майнинг” (г. Санкт-Петербург). Для расчета параметров дамбы, обеспечивающих ее устойчивость, а также проходимость транспорта и механизмов, необходимо было определить характеристики механических свойств скальных вскрышных пород.

Лабораторные методы, как традиционный подход к исследованию, оказались неприемлемы из-за несоответствия размеров кусков вскрышных пород рабочим камерам стандартных приборов. Проведение полевых опытов по определению параметров сжимаемости таких пород было невозможно ввиду отсутствия дамбы как таковой в 2022 г. В связи с этим было принято решение о производстве испытаний скальных вскрышных пород в стендовых условиях, которые позволят обосновать характеристики механических свойств непосредственно в массиве пород нарушенного сложения. Эксперименты проводились на крупногабаритном стенде, представляющем собой лоток для размещения в нем породы и силовые рамы для восприятия реактивной нагрузки [23].

Согласно данным ОАО “ЗабайкалТИСИЗ”, плотность ρ скарнированных кварцитов в куске находится в диапазоне $2.74 - 2.58 \text{ г/см}^3$. Результаты определения этого параметра в грунтовой лаборатории Иркутского государственного технического университета соответствуют расчетному значению плотности породы $\rho = 2.62 - 2.63 \text{ г/см}^3$. Максимальное значение плотности достигает 3.11 г/см^3 . Естественная влажность для скарнированных кварцитов находится в пределах от 0.2 до 0.3 %. Оценка плотности породы в условиях стенда проводилась по ГОСТ 28514-90 методом замещения объема [24]. Методика определения параметров деформируемости скальных вскрышных пород соответствовала нормативным материалам [25].

В состав установки для испытания пород на сжимаемость входили: жесткий круглый штамп с плоской подошвой площадью 2500 см^2 , устройства для создания и измерения нагрузки на штамп и его осадок (рис. 1). Принятые размеры штампа исключали влияние стенок стенда на получаемые результаты. Нагружение штампа осуществлялось гидравлическим домкратом. Обеспечивались возможность передачи на него давления ступенями по $0.01 - 0.10 \text{ МПа}$, центрированная передача нагрузки и постоянство давления на каждой ступени нагружения. Для измерения давления, передаваемого гидравлическим домкратом на штамп, и регистрации его осадок использовался образцовый динамометр ДОС 100 и прогибомеры марки 6ПАО, соединенные со штампом нитью из стальной проволоки.

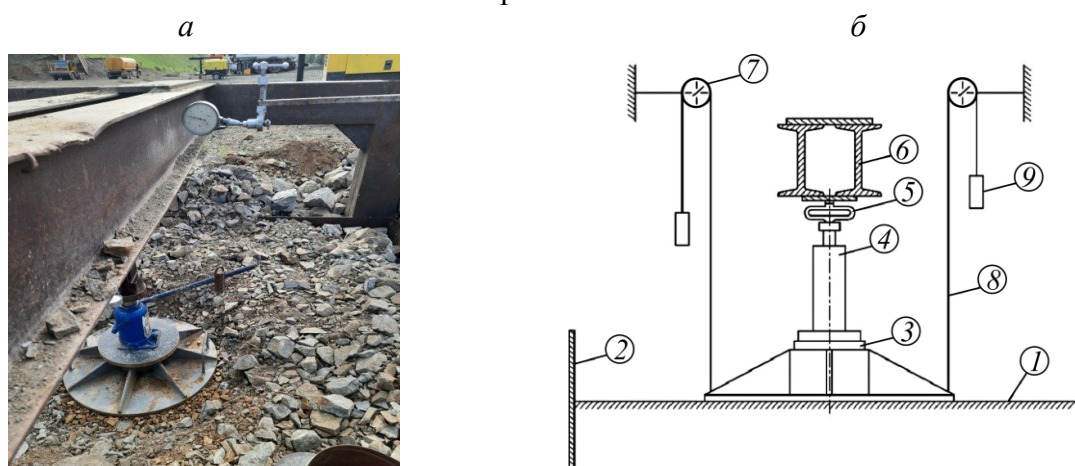


Рис. 1. Испытания породы штамповым методом: *а* — общий вид; *б* — схема; 1 — порода; 2 — стенки лотка; 3 — штамп; 4 — нагрузочное устройство; 5 — устройство для регистрации нагрузки; 6 — упорные балки; 7 — устройство для регистрации деформаций; 8 — соединительные струны; 9 — противовесы

Перед заполнением стенда скальная вскрышная порода фотографировалась для определения гранулометрического состава, затем данные обрабатывались на компьютере программой “Грансостав – 2008” [26] (рис. 2).

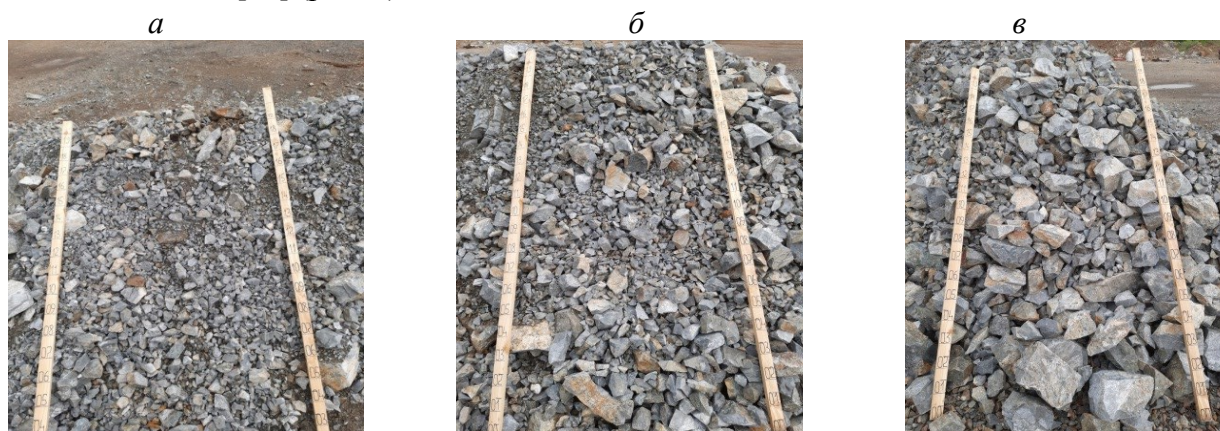


Рис. 2. Гранулометрические составы скальных вскрышных пород: а — № 1; б — № 2; в — № 3

Скальные вскрышные породы исследовались в рыхлом и уплотненном состояниях. Уплотнение породы осуществлялось глубинным вибратором Sturm CV7120 мощностью 2000 Вт. Время его работы определялось экспериментально в зависимости от параметров плотности пород, которые находили методом замещения объема [24].

В таблице представлены гранулометрические составы исследованных скальных вскрышных пород.

ТАБЛИЦА. Гранулометрические составы скальных вскрышных пород, %

Состав	Фракция, мм						
	< 40	40 – 60	60 – 80	80 – 100	100 – 200	200 – 500	> 500
№ 1	52.6	25.9	6.8	3.4	9.3	2.0	0
№ 2	44.3	22.2	9.5	5.5	17.0	1.5	0
№ 3	47.3	6.4	0.9	1.7	28.0	15.7	0

Влажность скальных вскрышных пород в стенде по данным химико-аналитической лаборатории АО “Висмут” составляла 0.33 %.

Для штамповых испытаний модуль деформации породы вычислялся по формуле [25]:

$$E = (1 - \mu^2) K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta s'},$$

где E — модуль деформации, МПа; μ — коэффициент поперечного расширения (Пуассона), принимаемый равным 0.27 для крупнообломочных пород; 0.30 — для песков и супесей; 0.35 — для суглинков; 0.42 — для глин; K_1 — коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0.79; D — диаметр штампа, см; Δp — приращение давления на штамп, МПа, равное $p_n - p_0$; Δs — приращение вертикальной деформации штампа в зависимости от Δp , см.

По полученным опытным данным строился график зависимости осадки штампа S от давления p , передаваемого им на породу. За начальные значения p_0 и S_0 принималось давление, равное вертикальному напряжению от собственного веса породы на отметке испытания, и соответствующая осадка. Осредненные результаты исследований по определению деформационных свойств скальных вскрышных пород на месторождении “Железный Кряж” представлены на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость осадки штампа от давления $S=f(p)$: 1 — линейная часть графика; 2 — осредняющая прямая

В рыхлом состоянии ($\rho=2.10 \text{ г/см}^3$) для диапазона давлений $0.1–0.2 \text{ МПа}$ модуль деформации скальных вскрышных пород равен

$$E = (1 - \mu^2) K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta s} = (1 - 0.27^2) 0.79 \cdot 56.4 \frac{1}{0.5} = 8.26 \text{ МПа}.$$

Аналогичные значения модуля деформации получены для диапазонов давлений на штамп $0.2–0.3$ и $0.3–0.4 \text{ МПа}$.

Среднее значение модуля деформации E скальных вскрышных пород в рыхлом состоянии равно 8.00 МПа .

В уплотненном (с помощью вибратора) состоянии ($\rho=2.48 \text{ г/см}^3$) определен модуль деформации скальных вскрышных пород:

— для диапазона давлений на штамп $0.1–0.2 \text{ МПа}$

$$E = (1 - \mu^2) K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta s} = (1 - 0.27^2) 0.79 \cdot 56.4 \frac{1}{0.09} = 45.8 \text{ МПа};$$

— для диапазона давлений на штамп $0.2–0.3 \text{ МПа}$

$$E = (1 - \mu^2) K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta s} = (1 - 0.27^2) 0.79 \cdot 56.4 \frac{1}{0.1} = 41.3 \text{ МПа};$$

— для диапазона давлений на штамп $0.3–0.4 \text{ МПа}$

$$E = (1 - \mu^2) K_1 D \frac{\Delta p}{\Delta s} = (1 - 0.27^2) 0.79 \cdot 56.4 \frac{1}{0.095} = 43.3 \text{ МПа}.$$

Среднее значение модуля деформации E скальных вскрышных пород в уплотненном состоянии для исследованных диапазонов давлений равно 43.5 МПа .

В результате проведенных исследований установлены характер и причины изменения деформационных свойств скальных вскрышных пород, например при уплотнении. В связи с этим при использовании в геомеханических расчетах характеристик деформационных свойств скальных вскрышных пород требуются достаточно обоснованные доводы, касающиеся их значений для разных диапазонов давлений в переменных по высоте точках отвалов или дамб.

При использовании формулы модуля деформации [25] особое затруднение вызвало определение коэффициента относительной поперечной деформации, что связано с различием подходов и методических особенностей [19–22]. Следует отметить, что в Забайкальском государственном университете разработан, запатентован и реализован способ получения данного параметра, при помощи которого определялись значения для конкретного вида пород [27, 28].

С целью оперативного контроля уплотнения скальной вскрышной породы при строительстве дамбы дополнительно оценивалась деформируемость пород геодезической рейкой. На поверхности скальной вскрышной породы размещалась круглая металлическая пластина диаметром 198 мм и задавались определенные вертикальные нагрузки. По геодезической рейке с оптическим нивелиром марки NL-32 замерялась осадка пластины (рис. 4а).

Исследования скальной вскрышной породы проводились в рыхлом ($\rho = 2.07 \text{ г/см}^3$) и уплотненном ($\rho = 2.34 \text{ г/см}^3$) состояниях. График оценки деформируемости скальной вскрышной породы с помощью геодезической рейки представлен на рис. 4б. Полученные результаты рекомендуется использовать при оценке плотности тела дамбы во время ее строительства.

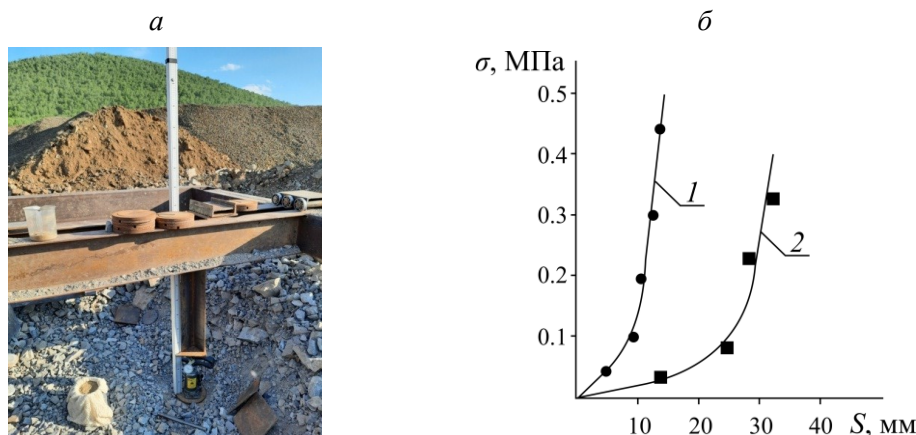


Рис. 4. Оценка деформируемости скальной вскрышной породы с помощью геодезической рейки: а — общий вид исследования; б — зависимость осадки S пластины от давления σ на нее: 1 — уплотненное; 2 — рыхлое состояния

ВЫВОДЫ

Для повышения достоверности прогноза проходимости горнотранспортного оборудования на отвалах и дамбах необходим учет изменения параметров деформационных свойств пород в зависимости от вертикальных напряжений и их соотношений с горизонтальными. Дамбы и отвалы вскрышных пород могут обладать запасами устойчивости и приемлемыми значениями деформируемости, если применяемые породы имеют известный фракционный состав с определенными экспериментально в стендовых условиях деформационными характеристиками.

Установлено, что среднее значение модуля деформации исследованных пород в рыхлом состоянии равно 8.00 МПа, в уплотненном — 43.5 МПа. Доказана возможность получения достоверных показателей деформационных свойств скальных вскрышных пород разного гранулометрического состава на стадии проектирования дамб и отвалов с помощью штамповых испытаний в стендовых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. — Л.: ВНИМИ, 1987. — 123 с.
2. Ломизе Г. М., Кравцов Г. И. Опыт натурного исследования напряженно-деформированного состояния в условиях осесимметричной задачи // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1969. — № 3. — С. 3–6.

3. **Работников А. И., Кованев Б. М.** Экспериментальное исследование распределения напряжений и деформаций по глубине основания под жестким штампом. // Основания, фундаменты. Республиканский межведомственный научный сборник. — Киев, 1970. — Вып. 3. — С. 59–64.
4. **Ломизе Г. М., Крыжановский А. Л., Петрянин В. Ф.** Исследование закономерностей развития напряженно-деформируемого состояния песчаного основания при плоской задаче // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1972. — № 1. — С. 4–7.
5. **Криворотов А. П.** Экспериментальные исследования изменения напряженного состояния песчаного основания при возрастании нагрузки на незаглубленный штамп // Изв. вузов: Строительство и архитектура. — 1973. — № 10. — С. 106–110.
6. **Полищук А. И.** Экспериментальные исследования в натурных условиях напряженно-деформированного состояния оснований под жесткими штампами (на примере маловлажных и влажных лесовых грунтов): автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1979. — 241 с.
7. **Цытович Н. А.** Механика грунтов. — М.: Высшая школа, 1979. — 272 с.
8. **Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю.** Комплексное влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие // ГИАБ. — 2022. — № 8. — С. 5–13.
9. **Султаналиева Р. М., Конушбаева А. Т., Турдубаева Ч. Б.** Определение прочностных показателей горных пород при одноосном сжатии и растяжении // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. — 2021. — № 5 — С. 61–66.
10. **Ермолович Е. А., Овчинников А. В., Аникеев А. А., Хаустов В. В.** Влияние размеров образца на прочность мела // Изв. ТулГУ. Науки о земле. — 2020. — № 2. — С. 263–271.
11. **Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н.** Влияние размера образцов на деформационно-прочностные свойства горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 2. — С. 53–59.
12. **Kun Du, Xuefeng Li, Rui Su, Ming Tao, Shizhan Lv, Jia Luo, and Jian Zhou.** Shape ratio effects on the mechanical characteristics of rectangular prism rocks and isolated pillars under uniaxial compression, *Int. J. Min. Sci. Technol.* — 2022. — No. 32. — P. 347–362.
13. **Durmeková T., Bednarik M., Dikejová P., and Adamcova R.** Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks, *Environ. Earth. Sci.*, 2020, Vol. 81, No. 247.
14. **André C Zingano.** Estimating coal strength based on historical laboratory tests and geomechanics classification, *Aspects Min. Miner. Sci.*, 2020, Vol. 5, Issue 4. — 000618.
15. **Sefer Beran Çelik.** The effect of cubic specimen size on uniaxial compressive strength of carbonate rocks from Western Turkey, *Arab. J. Geosci.*, 2017, Vol. 10.
16. **Рассказов Л. Н., Якиманская Т. А.** Исследование прочностных и деформационных характеристик сафедобской супеси в приборе трехосного сжатия // Тр. ВНИИ ВОДГЕО. Гидротехника. — 1972. — Вып. 34. — С. 68–72.
17. **Лобанов И. З.** Влияние напряженного состояния на деформируемость сыпучего грунта // Вопросы инженерной геологии, оснований и фундаментов. — 1962. — Вып. XXVIII. — С. 107–120.
18. **Криворотов А. П., Райс П. П.** Результаты экспериментального исследования изменяемости деформационных и прочностных характеристик песка при сложном напряженном состоянии // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1982. — № 3. — С. 28–32.
19. **Панюков П. Н., Верещагин Н. П., Добров Э. М., Кравчук С. В.** Методические указания по определению деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в стабилометрах. — Белгород: ВИОГЕМ, 1973. — 67 с.

20. **Meng F., Zhang J.-S., Chen X.-B., and Wang Q.-Y.** Deformation characteristics of coarse-grained soil with various gradations, *J. Central South University*, 2014, Vol. 21, No. 6. — P. 2469–2476.
21. **Pham Duc Phong, Su Q., Zhou C.-B., Vu A.-T., and Lam H.-H.** Deformation and strength characteristics of graded gravel by large-scale triaxial tests, *Electronic J. Geotechnical Eng.*, 2015, Vol. 20, No 1. — P. 5913–5925.
22. **Сорокина Г. В.** Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов. — М.: НИИОСП, 1978. — 31 с.
23. **Бабелло В. А., Лизункин В. М., Лизункин М. В., Соболев С. А.** Экспериментальное исследование прочностных свойств раздробленных скальных пород месторождения “Железный кряж” // *ФТПРПИ*. — 2023. — № 2. — С. 82–90.
24. **ГОСТ 28514-90.** Строительная геотехника. Определение плотности грунтов методом замещения объема. Введ. 01.05.1990. — М.: Стандартиформ, 2005. — 5 с.
25. **ГОСТ 20276.1-2020.** Грунты. Метод испытания штампом. Введ. 01.01.2021. — М.: Стандартиформ, 2020. — 15 с.
26. **Свидетельство** о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009610378 “Трансостав–2008” / Викторов С. Д., Казаков Н. Н., Шляпин А. В.; правообладатель УРАН ИПКОН РАН; заявл. 25.11.2008; зарегист. 16.01.2009.
27. **Лизункин В. М., Бабелло В. А., Лизункин М. В., Бейдин А. В.** Определение коэффициента Пуассона раздробленных скальных пород различного гранулометрического состава // *Горн. журн.* — 2017. — № 2. — С. 45–50.
28. **Пат. 2634312 РФ.** Устройство для определения коэффициентов Пуассона и поперечных деформаций фрагментов массива раздробленных скальных пород и оценки их сжимаемости в массиве / Бабелло В. А., Бейдин А. В., Лизункин В. М., Лизункин М. В. // *Опубл. в БИ*. — 2017. — № 30.

Поступила в редакцию 19/V 2023

После доработки 22/VI 2023

Принята к публикации 30/VI 2023