



Научная статья

УДК 622.01

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-73-79>



Исследование на трехмерной модели проявления бокового давления во вскрышных породах сооружаемого в ущелье отвала

Ануш Ашотовна Казарян^а

^аЛернаметалургияи институт, ГК «Валлекс», г. Ереван, Республика Армения

Резюме. На современном этапе отработки нагорных карьеров формирование многоярусных отвалов вскрышных пород в сложных условиях гористой местности и ограниченности земельных ресурсов остается проблемной задачей. Анализ показал, что на практике проектирования многоярусных отвалов в ущельях соответствующим образом не рассмотрены вопросы, связанные с установлением распределения напряжений в теле отвала в зависимости от величины двугранного угла, образованного откосами боковых граней ущелья. Дело в том, что в процессе отсыпки вскрышных пород на центральную осевую плоскость формируемого в ущелье отвала со стороны наклонных поверхностей ущелья передаются силы напряжений, при этом наклонное составляющее напряжений обусловлено массой отсыпаемых на наклонные боковые поверхности ущелья вскрышных пород. Эти боковые напряжения направлены под углом к сдвигающим усилиям, действующим в отвале, и в процессе формирования отвала играют положительную роль в ускорении процесса консолидации горной массы в зажатой среде. Снижение сдвигающих усилий в отвале приводит к увеличению его устойчивости, а также к определению в связи с этим рациональных объемов укладываемых в нем вскрышных пород и главных параметров многоярусного отвала. Необходимо отметить, что имеются значительные трудности в выявлении и объективной оценке характера возникновения и распределения сил напряжений в сооружаемом в ущелье отвале графоаналитическими методами. В ходе представленного исследования автором была предпринята попытка выявления и регистрации в теле формируемого в ущелье многоярусного отвала вскрышных пород сил напряжений при помощи методов физического моделирования. Для этого разработан трехмерный модельный стенд многоярусного отвала. Данный стенд позволяет методом физического моделирования решать объемную задачу и в зависимости от углов откоса боковых поверхностей ущелья выявлять закономерности изменения напряжений в центральной осевой плоскости модели отвала.

Ключевые слова: трехмерный модельный стенд, ущелье, эквивалентный материал, двугранный угол, центральная осевая плоскость, датчики напряжения

Для цитирования: Казарян А. А. Исследование на трехмерной модели проявления бокового давления во вскрышных породах сооружаемого в ущелье отвала // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-73-79>.

Original article

A three-dimensional model study of lateral pressure manifestation in gorge dump overburden

Anush A. Khazaryan^а

^аLernametallurgii Institute CJSC, Vallex Group, Yerevan, Republic of Armenia

Abstract. Today the development of upland quarries with the formation of multi-tiered dumps of overburden rock mass in complex conditions of mountainous terrain and limited land resources still remains a problem. The conducted analysis has shown that the practice of designing of multi-tiered dumps in gorges lacks detailed consideration of the issues determining the stress distribution in the dump body depending on the dihedral angle formed by the slopes of the side faces of the gorge. The point is that the process of overburden dumping is accompanied with the transmission of stress forces to the central axial plane of the dump body formed in the gorge from the side of the gorge inclined surfaces. At the same time, the inclined component of stresses is due to the mass of overburden rocks dumped onto the inclined side surfaces of the gorge. Being directed at an angle to the shear forces acting in the dump, these lateral stresses play a positive role in the acceleration of rock mass consolidation in the clamped environment during the overburden dump formation. The decrease in dump shear forces leads to the increase in dump stability. It also allows to determine the rational volumes of overburden to be laid as well as the main parameters of a multi-tiered dump. It should be noted that there are significant difficulties in identifying and objective assessing the nature of occurrence and distribution of stress forces in the dump being

© Казарян А. А., 2022



constructed in the gorge using graphic-analytical methods. In the course of the presented study, the author made an attempt to identify and register stress forces in the body of a multi-tiered overburden dump formed in the gorge using physical modeling methods. For this purpose, a three-dimensional model test bench of a multi-tiered dump has been developed. This test bench allows to solve a three-dimensional problem using the method of physical modeling and, identify the stress variation patterns in the central axial plane of the dump model depending on the inclination angles of the side surfaces of the gorge.

Keywords: three-dimensional model test bench, gorge, equivalent material, dihedral angle, central axial plane, stress sensors

For citation: Khazaryan A. A. A three-dimensional model study of lateral pressure manifestation in gorge dump overburden. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(1):73-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-1-73-79>.

Введение

Анализ исследований предшественников показал, что в настоящее время недостаточным образом исследован ряд вопросов, связанных с обоснованием главных параметров многоярусных отвалов, сооружаемых в сложных рельефных условиях. В действующих методических указаниях для расчета параметров многоярусных отвалов, сооружаемых в ущельях, рекомендуется использовать те же методы, что и для расчета параметров отвалов, размещенных на ровных площадках или на наклонном основании¹ [1, 2]. Тем не менее в известных исследованиях приводится информация о том, что характер распределения сил в отвале, сооружаемом в ущелье, отличается от аналогичного показателя для отвалов, сформированных на ровных или слабонаклонных площадках. В них также показано, что отвальная масса вскрышных пород в ущельях находится в «зажатой среде», где значительная роль отводится влиянию на массу отвальных пород двугранного угла, образованного боковыми плоскостями ущелья [3–5]. В связи с этим при обосновании и расчете коэффициента устойчивости сооружаемого в ущелье многоярусного отвала помимо определения действующих в теле отвала удерживающих и сдвигающих сил необходимо учитывать и реакции сил, передаваемых боковыми плоскостями ущелья на центральную осевую плоскость отвала.

Материалы и методы исследования

В ходе данной работы для выявления и определения характера распределения сил

в отвале вскрышных пород в ущелье был использован метод физического моделирования. Автором разработана трехмерная модель конструкции поворотного модельного стенда, на которую в 2019 г. получен патент Республики Армения № 3350А [6]. Разработка модельного стенда и все сопутствующие исследования были выполнены в ЗАО «Лернаметалургияи институт» ГК «Валлекс».

Результаты исследования и их обсуждение

Из технической литературы известно, что моделирование геотехнического сооружения из эквивалентных материалов выполняется на плоских стендах двумя способами: на вращающихся и стационарных стендах [7–10]. Однако при помощи этих конструкций стендов физического моделирования отвалов ввиду нейтрализации в них воздействия боковых сил невозможно выявить силы напряжений, передаваемых на массу отвальных пород со стороны боковых поверхностей ущелья [11, 12]. Общий вид модельного стенда такого рода показан на рис. 1 [6].

Разработанный автором данной статьи трехмерный стенд физического моделирования в отличие от вышеупомянутых стендов имеет боковые грани, шарнирно связанные с каркасом основания и обладающие возможностью наклона в направлении основания. Установленные датчики регистрации напряжений расположены в центральной осевой плоскости массы эквивалентного материала. Боковые стенки (грани) соединены с основанием корпуса стенда горизонтальными шарнирами, а двоярные датчики напряжений

¹ Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л.: Изд-во ВНИМИ, 1972. 165 с.



размещены в эквивалентном материале по всей высоте центральной осевой плоскости. При этом угол, образованный между парными датчиками, вдвое больше угла внутреннего трения, образованного между центральной вертикальной плоскостью модели и эквивалентного материала.

На рис. 2 показана центральная вертикальная плоскость разработанной модели с указанием датчиков напряжения в осевой плоскости модели. Угол установки датчиков

регистрации напряжений в эквивалентном материале центральной вертикальной плоскости β и равнодействующее давление E в модельном стенде также представлены на рис. 2 [13].

Угол β можно определить согласно рис. 2 (узел А), на котором из прямоугольного треугольника abc следует, что:

$$\begin{aligned} \delta + 90^\circ + \alpha &= 180^\circ; \\ \alpha &= 90^\circ - \delta; \\ \alpha + \beta + 90^\circ &= 180^\circ; \end{aligned}$$

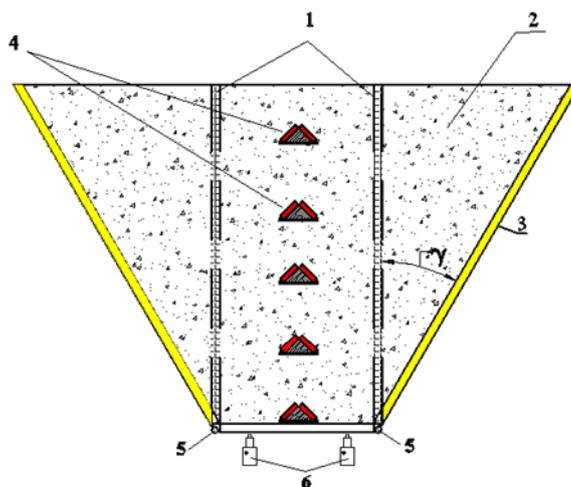


Рис. 1. Установка датчиков напряжения в центральной вертикальной плоскости эквивалентного материала в модельном стенде:

1 – каркас модельного стенда; 2 – эквивалентный материал; 3 – боковые стенки; 4 – датчики; 5 – горизонтальные шарниры крепления боковых граней к основанию модели; 6 – домкраты

Fig. 1. Installation of stress sensors in the central vertical plane of the equivalent material in the model test bench:

1 – model test bench frame; 2 – equivalent material; 3 – side walls; 4 – sensors; 5 – horizontal hinges for side face fastening to the model base; 6 – jacks

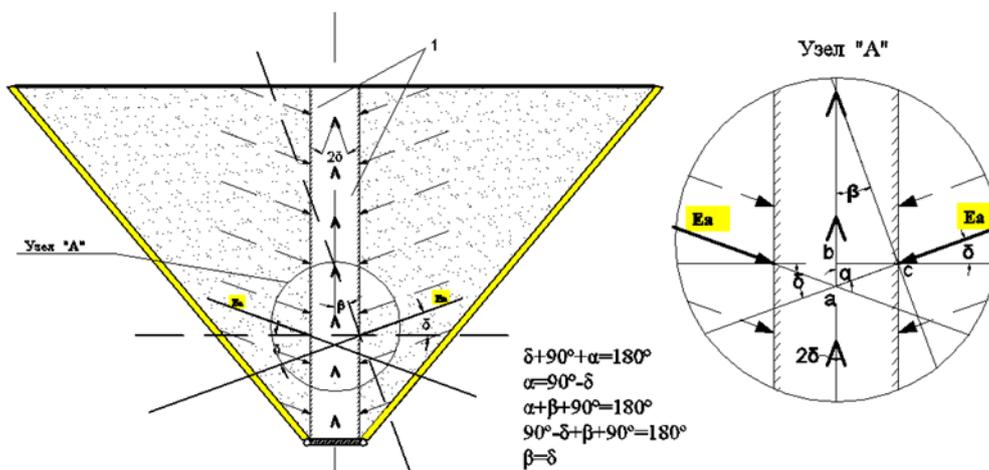


Рис. 2. Углы размещения датчиков для регистрации напряжений в центральной осевой плоскости модели относительно равнодействующего бокового давления:

1 – центральная осевая плоскость

Fig. 2. Location angles of sensors for stress recording in the central axial plane of the model relative to the resultant lateral pressure:

1 – central axial plane



$$90^\circ - \delta + \beta + 90^\circ = 180^\circ;$$

$$\beta = \delta.$$

На основе приведенных выше выражений можно сделать вывод, что значение образованного двумя датчиками угла вдвое больше угла трения эквивалентного материала с центральной вертикальной плоскостью модели δ . Последний одновременно равен также углу наклона равнодействующего бокового давления эквивалентного материала E , приложенного к 1/3 (считая снизу модели) от высоты центральной вертикальной плоскости модели² [14–20].

На разработанном модельном стенде возможно регистрировать в эквивалентном материале закономерности изменения напряжений, передаваемых в осевую плоскость модели многоярусного отвала со стороны боковых граней ущелья.

Положение двух боковых граней, независимо друг от друга вращающихся вокруг продольной оси модельного стенда, может изменяться от вертикального до горизонтального. Разработанный трехмерный стенд для моделирования имеет возможность с помощью гидравлического домкрата изменять свое положение в вертикальной плоскости.

На основании теории Кулона направление действия полного эквивалента давления E определяется углом отклонения E от нормали, перпендикулярной боковой стенке подпорной стенки, что принимается равным углу трения грунта δ с вертикальной осью плоскости модели [6]. Полное равнодействующее давление на грунт E и угол трения грунта δ с вертикальной осью плоскости модели взаимосвязаны:

$$\delta = \gamma t g^2 \left(45^\circ \mp \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} t g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

где γ – плотность отсыпанной грунтовой массы, г/см³; φ – угол внутреннего трения частиц, град.; H – высота засыпки, см.

На основе экспериментов Моллера для практических исследований установлено, что угол δ изменяется в пределах $0,33 \rho < \delta < 0,67 \rho$, а на основе экспериментов Мюллера-

Бреслау $\delta = 0,75 \rho$, где ρ – угол внутреннего трения частиц грунта.

В соответствии с этой теорией определение равнодействующего давления E является приоритетным, особенно при выборе схемы установки датчиков для регистрации напряжений, передаваемых со стороны боковых плоскостей разработанного модельного стенда на центральную вертикальную (осевую) плоскость модели многоярусного отвала.

Исследование бокового воздействия на центральной части модели при варианте отработки модели с одновременным раскрытием двух граней конструкции показало, что характер распределения напряжений, обусловленный весом модельной смеси, в основном остается неизменным, как и при отработке модели с одной подвижной гранью.

Опыты показали, что при равномерном изменении углов наклона двух боковых граней стенда давление на регистрирующие динамометры увеличивается почти вдвое по сравнению с предыдущими опытами, выполненными при одной неподвижной и одной подвижной гранях модели. В этом случае происходит дальнейшее увеличение напряжений на центральном участке модельной смеси, что приводит к интенсивному изменению некоторых физико-механических характеристик эквивалентного материала.

Рост напряжений, зарегистрированных горизонтально и вертикально установленными тензометрическими датчиками прибора АИД-4 в центральной части модели, в зависимости от углов раскрытия боковых граней модели 0, 10, 20, 30, 40, 45, 50 и 60° приведен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что с увеличением угла наклона грани модели до 45° наблюдается рост давления на датчики, установленные в осевой плоскости модельной смеси. При отработке модели с одной подвижной гранью напряжения на горизонтально и вертикально установленные датчики увеличиваются соответственно на 20 и 12 %, а когда одновременно и равномерно раскрываются обе грани модельной конструкции – на 36 и 28 %.

² Ямщиков В. Методы и средства исследований и контроля горных пород и процессов: учебник для вузов. М.: Недра, 1982. 296 с.

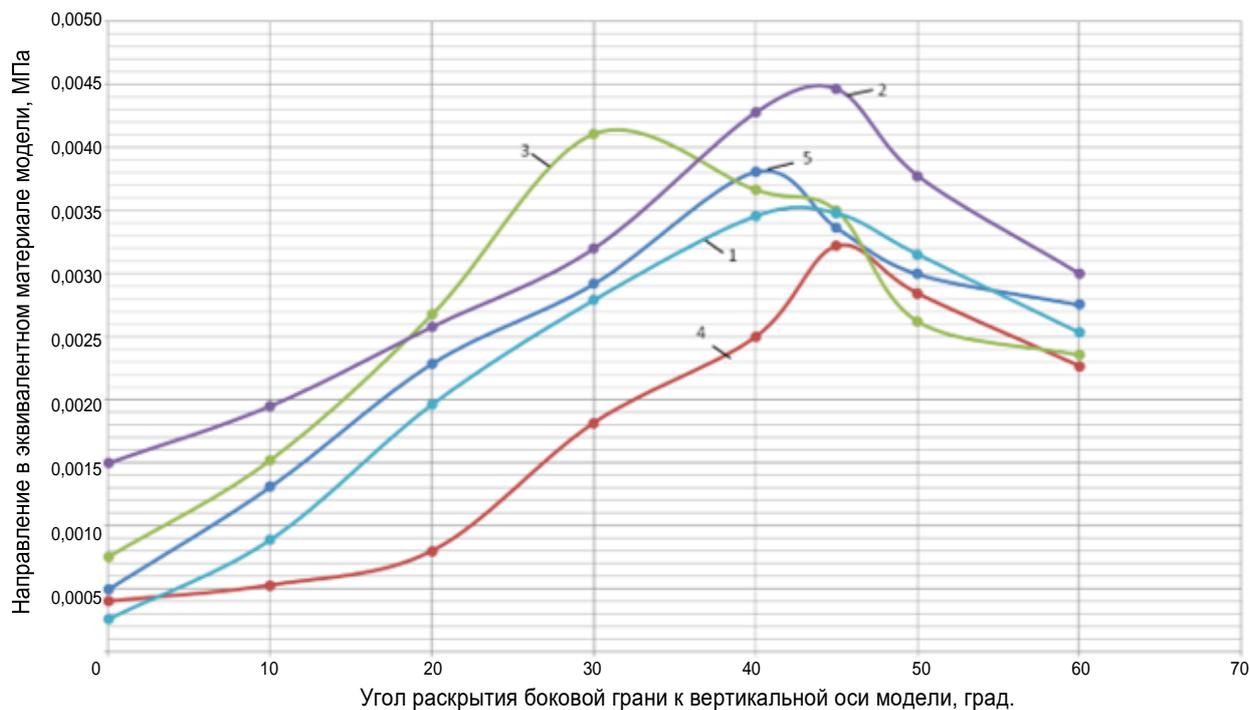


Рис. 3. Зависимость изменения давления на датчики при раскрытии одной грани модели и высоте установки датчиков (считая от основания модели) в эквивалентном материале, равной:

1 – 80; 2 – 60; 3 – 40; 4 – 20; 5 – 0 см

Fig. 3. Dependence of pressure change on the sensors when opening one face of the model and the sensor installation height (counting from the base of the model) in an equivalent material that equals to:

1 – 80; 2 – 60; 3 – 40; 4 – 20; 5 – 0 cm

Заклучение

Отработка созданной трехмерной модели позволила решить следующие задачи:

– в зависимости от толщины слоя эквивалентного материала в модели стала возможна оценка напряжений в ее центральной осевой плоскости;

– был установлен характер изменения напряжений в центральной осевой плоскости при неподвижной и вертикально установленной одной грани модели и неизменной высоте модельной смеси в стенде, а также при изменении угла наклона боковой грани модели в интервале от 90 до 0°;

– определен характер изменения напряженного состояния на разных уровнях центральной осевой плоскости модельной смеси при одновременном изменении углов наклона двух боковых граней стенда;

– выявлено, что максимальное значение напряжения эквивалентного материала в центральной части модели достигается на высоте 55–60 см при угле наклона граней в модели, равном 45°.

При помощи физических модельных исследований на разработанном трехмерном стенде становится возможным определение характера изменения напряжений на разных уровнях центральной осевой плоскости при одновременном изменении углов наклона двух боковых граней модельного стенда. Объемное физическое моделирование многоярусного отвала позволяет определять рациональные объемы вскрышных пород, решая тем самым экологически важную задачу формирования многоярусного отвала в ущелье с обоснованием его устойчивости.

Список источников

1. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения: Л.: Энергия, 1967. 460 с.
2. Абемян Ц. Х., Микаелян А. А. Устойчивость высокогорных отвалов Каджаранского карьера // Научные

труды Научно-исследовательского горно-металлургического института. Ереван: Изд-во НИГМИ, 1966. С. 31–34.
3. Абемян Ц. Х. Условия применения технологии



отвалообразования с управляемым оползневым процессом на нагорных карьерах // Научные труды Научно-исследовательского горно-металлургического института. Ереван: Изд-во НИГМИ, 1972. С. 25–35.

4. Wang H., Li S., Zheng X. Research progress of geomechanical model test with new technology and its engineering application // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2009. Iss. 28. P. 2765–2771.

5. Hawley P. M., Cunniff J. *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. New York: CSIRO, 2017. 368 p.

6. Пат. № 3350А, Республика Армения, МПК E21C39/00 G01N 33/00 G01N 3/00. Стенд моделирования сооружаемых в ущельях отвалов / С. С. Арзуманян, Л. А. Манукян, А. А. Казарян, Г. Г. Казарян. Заявл.: 08.07.2019.; опубл.: 02.12.2019.

7. Панюков П. Н., Ржевский В. В., Истомин В. В., Гальперин А. М. *Геомеханика отвальных работ на карьерах*. М.: Недра, 1972. 183 с.

8. Кузнецов Г. Н., Ардашев К. А., Филатов Н. А., Амусин Б. З. *Методы и средства решения задач горной геомеханики*. М.: Недра, 1987. 248 с.

9. Глушхин Ф. П., Кузнецов Г. Н., Шклярский М. Ф., Павлов В. Н., Злотников М. С. *Моделирование в геомеханике*. М.: Недра, 1991. 240 с.

10. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surface // *Geotechnique*. 1965. Vol. 15. Iss. 1. P. 79–93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.

11. Фисенко Г. Л. *Устойчивость бортов карьеров и отвалов*. М.: Недра, 1965. 378 с.

12. Галустьян Э. Л. *Методы оценки устойчивости откосов нагорных карьеров* // *Горный журнал*. 2002.

№ 11-12. С. 9–12.

13. Манукян Л. А., Казарян А. А., Казарян Г. Г. Разработка схемы установки датчиков для регистрации напряжений в центральной осевой плоскости отвалов горной массы в ущельях // *Известия Национальной академии наук Республики Армения и Национального политехнического университета Армении (серия технических наук)*. 2020. Т. 73. № 1. С. 5–11.

14. Снитко Н. К. *Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок*. Л.: Стройиздат, 1963. 295 с.

15. Шемякин Е. М. О паспорте прочности горных пород // *Измерение напряжений в массиве горных пород*. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1974. С. 9–20.

16. Яковлев В. Л., Бурькин С. И., Ворошилов Г. А. Проблемы освоения нагорных месторождений Полярного Урала // *Горный журнал*. 2001. № 10. С. 47–49.

17. Brady B. T. A mechanical equation of state for brittle rock. Part I. The pre-failure behavior of brittle rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1970. Vol. 7. Iss. 4. P. 385–421. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90035-5).

18. Sun G. *Rock mass structural mechanism*. Beijing: Science Press, 1988. 36 p.

19. Вылегжанин В. Н., Егоров П. В., Мурашев В. И. *Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов*. Новосибирск: Наука, 1990. 295 с.

20. Пендин В. В., Фоменко И. К., Горобцов Д. Н., Никулина М. Е. *Комплексное моделирование устойчивости откосов грунтовых отвалов* // *Горный журнал*. 2018. № 11. С. 92–96.

References

1. Chugaev R. R. *Earth hydraulic structures*. Leningrad: Energiya; 1967. 460 p. (In Russ.).

2. Abegyan Ts. Kh., Mikaelyan A. A. Stability of high-mountain dumps of the Kajaran open-pit mine. In: *Nauchnye trudy Nauchno-issledovatel'skogo gorno-metallurgicheskogo instituta = Scientific works of the Research Mining and Metallurgical Institute*. Yerevan: Research Mining and Metallurgical Institute; 1966, p. 31–34. (In Russ.).

3. Abegyan Ts. Kh. Application conditions of the technology of controlled landslide dumping in upland mining. In: *Nauchnye trudy Nauchno-issledovatel'skogo gorno-metallurgicheskogo instituta = Scientific works of the Research Mining and Metallurgical Institute*. Yerevan: Research Mining and Metallurgical Institute; 1972, p. 25–35. (In Russ.).

4. Wang H., Li S., Zheng X. Research progress of geomechanical model test with new technology and its engineering application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2009;28:2765-2771.

5. Hawley P. M., Cunniff J. *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. New York: CSIRO; 2017. 368 p.

6. Arzumanyan S. S., Manukyan L. A., Kazaryan A. A., Kazaryan G. G. *Simulation test bench for dumps constructed in gorges*. Patent RA, no. 3350A; 2019. (In Arm.).

7. Panyukov P. N., Rzhetskii V. V., Istomin V. V.,

Gal'perin A. M. *Geomechanics of dumping operations in open pits*. Moscow: Nedra; 1972. 183 p. (In Russ.).

8. Kuznetsov G. N., Ardashev K. A., Filatov N. A., Amusin B. Z. *Methods and means of solving the problems of mining geomechanics*. Moscow: Nedra; 1987. 248 p. (In Russ.).

9. Glushkhin F. P., Kuznetsov G. N., Shklyarskii M. F., Pavlov V. N., Zlotnikov M. S. *Geomechanical modeling*. Moscow: Nedra; 1991. 240 p. (In Russ.).

10. Morgenstern N. R., Price V. E. The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*. 1965;15(1):79-93. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.

11. Fisenko G. L. *Wall stability of open pits and dumps*. Moscow: Nedra; 1965. 378 p. (In Russ.).

12. Galust'yan E. L. Methods for assessing upland pit slope stability. *Gornyi zhurnal*. 2002;11-12:9-12. (In Russ.).

13. Manukyan L. A., Ghazaryan A. A., Ghazaryan G. H. Developing the scheme of sensor installation for determining the stresses in the central axial plane of mine dumps in gorges. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Armeniya i Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii (seriya tekhnicheskikh nauk) = Proceedings of the NAS RA and NPUA: Technical Sciences*. 2020;73(1):5-11. (In Arm.).



14. Snitko N. K. *Static and dynamic soil pressure and calculation of breast walls*. Leningrad: Stroizdat; 1963. 295 p. (In Russ.).

15. Shemyakin E. M. On the rock strength certificate. In: *Izmerenie napryazhenii v massive gornyx porod = Measurement of stresses in a rock massif*. Part 1. Novosibirsk: Chikanal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the Soviet Union; 1974, p. 9–20. (In Russ.).

16. Yakovlev V. L., Burykin S. I., Voroshilov G. A. Development issues of upland deposits of the Polar Urals. *Gornyi zhurnal*. 2001;10:47-49. (In Russ.).

17. Brady B. T. A mechanical equation of state for brittle rock. Part I. The pre-failure behavior of brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1970;7(4):385-421. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90035-5).

18. Sun G. *Rock mass structural mechanism*. Beijing: Science Press; 1988. 36 p.

19. Vylegzhaniin V. N., Egorov P. V., Murashev V. I. *Structural models of the rock range in the mechanism of geomechanical processes*. Novosibirsk: Nauka; 1990. 295 p. (In Russ.).

20. Pendin V. V., Fomenko I. K., Gorobtsov D. N., Nikulina M. E. Integrated modeling of waste dump slope stability. *Gornyi zhurnal*. 2018;11:92-96. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Казарян Ануш Ашотовна,

научный сотрудник, заведующая Лабораторией геомеханики и горных работ, Лернаметалургии институт, ГК «Валлекс», г. Ереван, Республика Армения, anush3108@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9643-0122>.

Anush A. Khazaryan,

Researcher, Head of the Laboratory of Geomechanics and Mining Operations, Lernametalurgiai Institute CJSC, Vallex Group, Yerevan, Republic of Armenia, anush3108@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9643-0122>.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена после рецензирования 21.01.2022; принята к публикации 25.02.2022.

The article was submitted 15.12.2021; approved after reviewing 21.01.2022; accepted for publication 25.02.2022.