

Теоретические исследования изменения радиуса зон трещинообразования в рудном штабеле кучного выщелачивания взрывом камуфлетного скважинного заряда ВВ

Боровков Ю. А.¹, Якшибаев Т. М.^{1*}

¹ Российский государственный геологоразведочный университет, г. Москва, Россия

*e-mail: temur19.01.1988.tm@list.ru

Реферат

Введение. Совершенствование процесса кучного выщелачивания многоярусного рудного штабеля возможно посредством применения новых рациональных методов, одним из которых является интенсификация путем встряхивания многоярусного рудного штабеля пород взрывом камуфлетного цилиндрического скважинного заряда ВВ. Данный способ приемлем в случае снижения концентрации золота в продуктивном растворе с течением времени, а также в случае образования зоны кольматации. Необходимо произвести встряхивания многоярусного рудного штабеля горных пород взрывами камуфлетных скважинных зарядов ВВ, при этом происходят перемещение, измельчение, размежевание и изменение ориентации кусков породы в глубине многоярусного рудного штабеля с образованием дополнительных микро- и макротрещин.

Цель работы. Определение радиусов зон образования трещинообразования в рудном штабеле кучного выщелачивания при взрыве камуфлетного скважинного заряда ВВ.

Методология. Определение влияния камуфлетного взрыва скважинного заряда ВВ на интенсификацию процесса кучного выщелачивания золота с использованием математического моделирования.

Выводы. Разработана математическая модель действия камуфлетного взрыва цилиндрического скважинного заряда, описывающая зоны трещинообразования в глубине массива горных пород рудного штабеля кучного выщелачивания. Установлено, что при взрыве камуфлетного скважинного цилиндрического заряда под воздействием ударной и отраженной волн напряжения от свободной поверхности уступа в глубине массива горных пород рудного штабеля кучного выщелачивания образуется зона трещинообразования массива. Определен радиус зоны трещинообразования, зависящий от радиуса камуфлетного заряда, коэффициента, определяющего условия взрывания, акустической жесткости массива, коэффициента Пуассона и прочностных свойств горных пород рудного штабеля кучного выщелачивания на растяжение.

Ключевые слова: радиус трещинообразования; рудный штабель; взрыв; камуфлетный цилиндрический скважинный заряд ВВ; радиальное напряжение; массив горных пород; радиус скважинного заряда ВВ.

Введение. Совершенствование процесса кучного выщелачивания многоярусного рудного штабеля возможно посредством применения новых рациональных методов, одним из которых является интенсификация путем встряхивания многоярусного рудного штабеля пород взрывом камуфлетного цилиндрического скважинного заряда ВВ. Данный способ приемлем в случае снижения концентрации золота в продуктивном растворе с течением времени, а также в случае образования зоны кольматации. Необходимо произвести встряхивания многоярусного рудного штабеля горных пород взрывами камуфлетных скважинных зарядов ВВ, при этом происходят перемещение, измельчение, размежевание и изменение ориентации кусков породы в глубине многоярусного рудного штабеля с образованием дополнительных микро- и макротрещин.

Цель работы. Определение радиусов зон образования трещинообразования в рудном штабеле кучного выщелачивания при взрыве камуфлетного скважинного заряда ВВ.

Методология. Определение влияния камуфлетного взрыва скважинного заряда ВВ на интенсификацию процесса кучного выщелачивания золота с использованием математического моделирования.

Для определения радиуса зон трещинообразования в рудном штабеле кучного выщелачивания (КВ) использовалась методика, разработанная авторами работ [1–14]. При этом будем считать, что радиус трещинообразования массива определяется действием взрыва камуфлетного цилиндрического скважинного заряда ВВ диаметром d_0 .

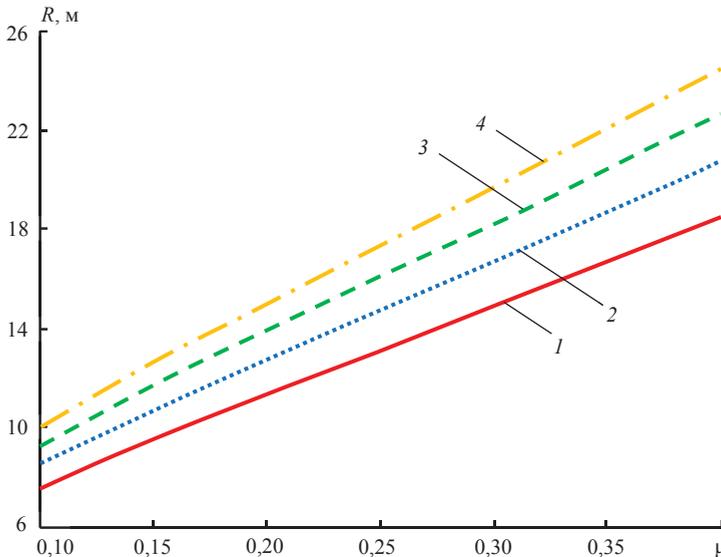


Рис. 1. Зависимость максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от коэффициента Пуассона при разной акустической жесткости пород:

1 – при $\rho C_p = 8,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$; 2 – при $\rho C_p = 10,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$;
3 – при $\rho C_p = 12,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$; 4 – при $\rho C_p = 14,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$

Fig. 1. Dependence between the maximum radius of rock fracture zones in a HL ore pile and Poisson ratio under various acoustic stiffness of rocks:

1 – under $\rho C_p = 8,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$; 2 – under $\rho C_p = 10,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$;
3 – under $\rho C_p = 12,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$; 4 – under $\rho C_p = 14,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$

Согласно законам теории упругости, радиус трещинообразования горного массива зависит от величины тангенциальных напряжений на растяжение, возникающих в горном массиве, которые определяются по эмпирической формуле

$$\sigma_{\text{рас}} = \frac{\mu \sigma_{\text{сж}}}{(1 - \mu)},$$

где μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_{\text{сж}}$ – радиальные напряжения на сжатие, МПа.

Радиальные напряжения на сжатие на фронте детонационной волны и скорость массового смещения массива горных пород связаны между собой следующей зависимостью

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{U \rho C_p}{g},$$

где U – скорость массового смещения, м/с; ρC_p – акустическая жесткость массива горных пород, $\rho C_p = (1,5–15) \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$; g – ускорение свободного падения, м/с².

Скорость массового смещения продуктивного пласта определяется по известной формуле М. А. Садовского:

$$U = A \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R_{\text{тр}}} \right)^m, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от условия взрывания, принимается 200–250; Q – масса заряда ВВ, кг; $R_{\text{тр}}$ – расстояние от центра заряда до рассматриваемой точки, м; m – коэффициент поглощения энергии для камуфлетного цилиндрического заряда ВВ, $m = 2$ [15].

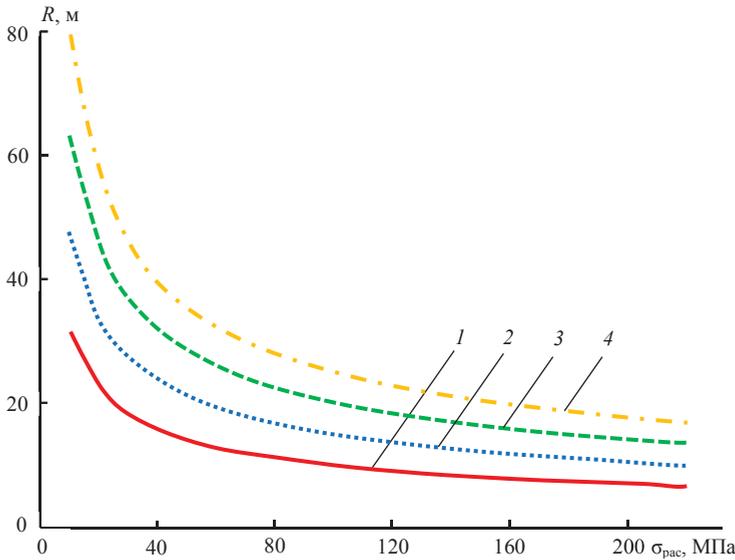


Рис. 2. Зависимость максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от прочностных свойств на растяжение при разных радиусах скважинного заряда ВВ:

1 – при $R_0 = 0,05$ м; 2 – при $R_0 = 0,075$ м; 3 – при $R_0 = 0,1$ м; 4 – при $R_0 = 0,125$ м
 Fig. 2. Dependence between the maximum radius of rock fracture zones in a HL ore pile and the tensile strength under various radii of a blasthole charge:
 1 – under $R_0 = 0,05$ m; 2 – under $R_0 = 0,075$ m; 3 – under $R_0 = 0,1$ m; 4 – under $R_0 = 0,125$ m

Подставляя в уравнение (1) значения $Q = 2\pi R_0^3$, имеем:

$$U = 3,54 \left(\frac{R_0}{R_{\text{тр}}} \right)^n, \quad (2)$$

где R_0 – радиус камуфлетного скважинного заряда, м.

Решив уравнение (2) относительно R и подставив значения U , $\sigma_{\text{сж}}$, получим следующую эмпирическую формулу:

$$R_{\text{тр}} = R_0 \sqrt{\frac{3,54 \rho C_p \mu}{\sigma_{\text{рас}} (1 - \mu)}}.$$

Максимальный радиус зон трещинообразования в глубине рудного штабеля окончательно определяется из условий $\sigma_{\text{рас}} = |\sigma_p|$:

$$R_{\text{тр}} = R_0 \sqrt{\frac{3,5A\rho C_p \mu}{[\sigma_{\text{рас}}](1-\mu)}}$$

Результаты исследования. На рис. 1 показаны зависимости максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ в зависимости от коэффициента Пуассона при разной акустической жесткости пород.

На рис. 2 показаны зависимости максимального радиуса трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от их прочностных свойств на растяжение при различных радиусах скважинного заряда ВВ.

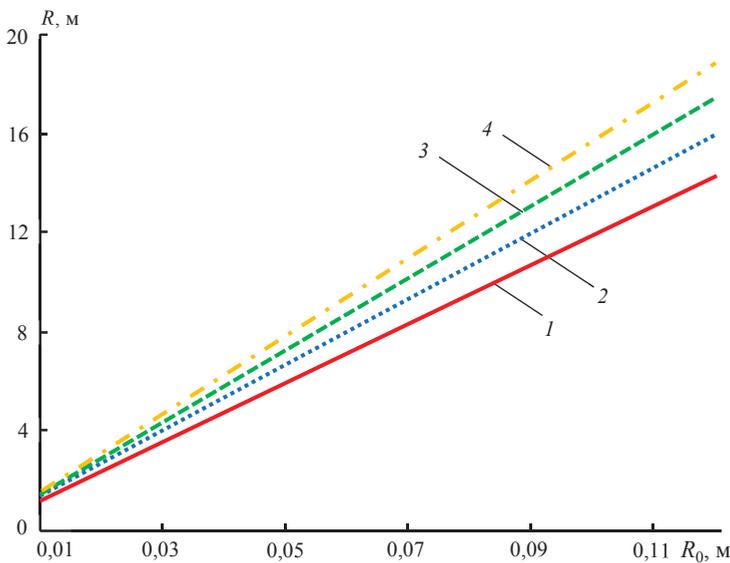


Рис. 3. Зависимость максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от радиуса скважинного заряда ВВ при разной акустической жесткости:

1 – при $\rho C_p = 8,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$; 2 – при $\rho C_p = 10,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$;
3 – при $\rho C_p = 12,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$; 4 – при $\rho C_p = 14,0 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{м/с}$

Fig. 3. Dependence between the maximum radius of rock fracture zones in a HL ore pile and the radius of a blasthole charge under various acoustic stiffness:

1 – under $\rho C_p = 8,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$; 2 – under $\rho C_p = 10,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$;
3 – under $\rho C_p = 12,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$; 4 – under $\rho C_p = 14,0 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$

На рис. 3 показаны зависимости максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от радиуса скважинного заряда ВВ при разной акустической жесткости.

На рис. 4 представлены зависимости максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от коэффициента, учитывающего условия взрывания, при различных радиусах заряда ВВ.

Выводы. Разработана математическая модель действия камуфлетного взрыва цилиндрического скважинного заряда, описывающая зоны трещинообразования в глубине массива горных пород рудного штабеля КВ.

Установлено, что при взрыве камуфлетного скважинного цилиндрического заряда под воздействием ударной и отраженной волн напряжения от свободной поверхности уступа в глубине массива горных пород рудного штабеля КВ образуется зона трещинообразования массива. Определен радиус зоны трещинообразования,

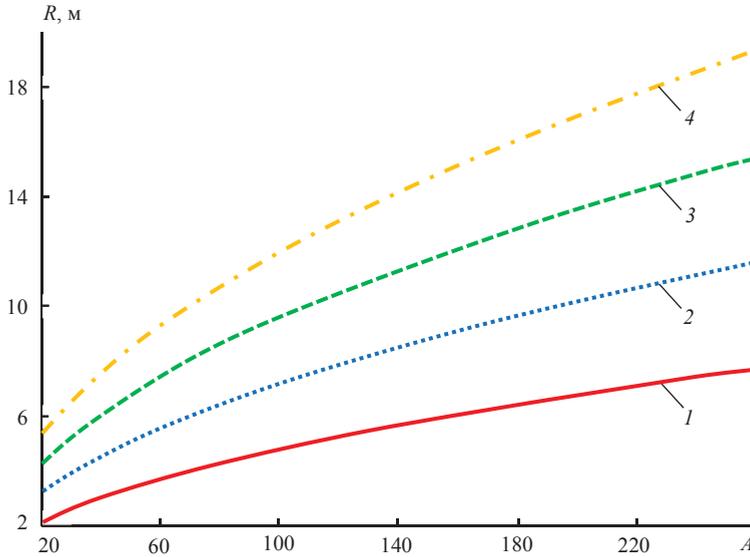


Рис. 4. Зависимость максимального радиуса зон трещинообразования горных пород в рудном штабеле КВ от коэффициента, учитывающего условия взрывания, при разных радиусах скважинного заряда ВВ:

1 — при $R_0 = 0,05$ м; 2 — при $R_0 = 0,075$ м; 3 — при $R_0 = 0,1$ м; 4 — при $R_0 = 0,125$ м

Fig. 4. Dependence between the maximum radius of rock fracture zones in a HL ore pile and the coefficient accounting for the blasting conditions under various radii of a blasthole charge:

1 — under $R_0 = 0,05$ m; 2 — under $R_0 = 0,075$ m; 3 — under $R_0 = 0,1$ m; 4 — under $R_0 = 0,125$ m

зависящий от радиуса камуфлетного заряда, коэффициента, определяющего условия взрывания, акустической жесткости массива, коэффициента Пуассона и прочностных свойств горных пород рудного штабеля КВ на растяжение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жигур Л. Ю., Мезин А. И. Исследование механизма взрывного нагружения горных пород в зоне недозаряда в скважине // Взрывное дело. 1984. № 86/43. С. 221–225.
2. Cook M. A. The science of industrial explosives. USA, IRECO Chemicals, 1974. 449 p.
3. Ракишев Б. Р. Энергоемкость механического разрушения горных пород. Алматы: Баспагер, 1998. 210 с.
4. Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов [и др.]. М.: Недра, 1971. 200 с.
5. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К. Физика взрывного разрушения горных пород применительно к взрывным работам // Взрывное дело. 1963. № 53/10. С. 31–36.
6. Беленко Ф. А. Исследование полей напряжения и процесса образования трещин при взрыве колонковых зарядов в скальных породах // Вопросы теории разрушения горных пород под воздействием взрыва. М.: АН СССР, 1958. С. 126–139.
7. Kingery C. N., Shumacher R. N. and Ewing W. O. International Pressures from explosions in suppressive structures. BRL. In from Memorandum report № 403. Aberdeen Proving ground, Mariland, 2005.
8. Esparza E. D., Baher W. E. and Oldham G. A. Blast pressures inside and outside suppressive structures. Edgewood Arsenal Contraction Report EM-CR-76042. Report no. 8. 2005.
9. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара взрыва в деформируемых средах. М.: Стройиздат, 1957. 276 с.
10. Ильяхин С. В., Норов А. Ю., Якшибаев Т. М. Определение радиуса зон трещинообразования горного массива при камуфлетном взрыве // Взрывное дело. 2016. № 116/73. С. 29–36.
11. Nikitin L. V., Odintsev V. N. A dilatancy model of tensile macrocracks in compressed rock // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1999. Vol. 22. No. 11. P. 1003–1009.

12. Родионов В. Н. Исследование развития полости при камуфлетном взрыве // Взрывное дело. 1974. № 64/21. С. 5–25.

13. Wefbull H. R. W. Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charge. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2008. 152. Article 1. P. 356–361.

14. Ракишев Б. Р., Ракишева З. Б., Ауэзова А. М. Скорости и время расширения цилиндрической взрывной полости в массиве пород // Взрывное дело. 2014. № 111/68. С. 3–17.

15. Мосинев В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976. 271 с.

Поступила в редакцию 6 августа 2018 года

Сведения об авторах:

Боровков Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства Российского государственного геологоразведочного университета. E-mail: bua_51@mail.ru

Якшибаев Тему́р Минграхматович – аспирант кафедры геотехнологических способов и физических процессов горного производства Российского государственного геологоразведочного университета. E-mail: temur19.01.1988.tm@list.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-30-36

Theoretical studies of changes in fracture zones radius in the ore pile of heap leaching with camouflet blasthole charge explosion

Iurii A. Borovkov¹, Temur M. Iakshibaev¹

¹ Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia.

Abstract

Introduction. Multi-tiered ore pile heap leaching process improvement is possible by using new rational methods, including a method of intensification by means of shaking a multi-tiered ore pile by an explosion of a camouflet cylindrical borehole charge. This method is acceptable if the concentration of gold in the productive solution gradually reduces, and also if clogging zone is formed. It is necessary to shake a multi-tiered ore pile with explosions of camouflet borehole charges, thus moving, grinding, delimiting and changing the orientation of rock pieces in the depth of a multi-tiered ore pile with the formation of additional micro and macro cracks.

Research aim is to determine the radiuses of fracture zones in heap leaching ore pile upon the explosion of a camouflet blasthole charge.

Methodology includes the determination of the effect of the explosion of a camouflet blasthole charge on the intensification of gold heap leaching process with the use of mathematical simulation.

Summary. A mathematical model of the action of a camouflet explosion of a cylindrical borehole charge has been developed, which describes fracture zones in the depth of the rock massif of heap leach ore pile. It has been stated that during the explosion of a camouflet borehole cylindrical charge, under the action of a shock or reflected shock waves of stress, from the free surface of a bench, fracture zone is formed in the depth of the rock massif of heap leach ore pile. The radius has been determined of a fracture zone depending on the radius of a camouflet charge, the coefficient determining the blasting conditions, massif acoustic stiffness, Poisson coefficient, and the coefficient of heap leach rock tensile strength.

Key words: fracturing radius; ore pile; explosion; camouflet cylindrical borehole charge; radial stress; rock mass; borehole charge radius.

REFERENCES

1. Zhigur L. Iu., Mezina A. I. Study of rock explosive loading mechanism in the zone of undercharge in a well. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 1984; 86/43: 221–225. (In Russ.)
2. Cook M. A. *The science of industrial explosives*. USA, IRECO Chemicals, 1974. 449 p.
3. Rakishev B. R. *Power intensity of rock disintegration*. Almaty: Baspager Publishing; 1998. (In Russ.)
4. Rodionov V. N. et al. *Mechanical effect caused by an underground explosion*. Moscow: Nedra Publishing; 1971. (In Russ.)
5. Kutuzov B. N., Rubtsov V. K. The physics of explosive loading as applied to blasting operations. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 1963; 53/10: 31–36. (In Russ.)
6. Belenko F. A. Investigation of stress fields and the process of fissures generation during column charges blasting in hard rock. In: *Problems of the theory of rock destruction under the action of a blast*. Moscow: AS USSR Publishing; 1958. p. 126–139. (In Russ.)
7. Kingery C. N., Shumacher R. N. and Ewing W. O. *International Pressures from explosions in suppressive structures*. BRL. In from Memorandum report № 403. Aberdeen Proving ground, Mariland, 2005.
8. Esparza E. D., Baher W. E. and Oldham G. A. *Blast pressures inside and outside suppressive structures*. Edgewood Arsenal Contraction Report EM-CR-76042. Report no. 8. 2005.

9. Pokrovskii G. I., Fedorov I. S. *Percussion blow action in deformed environments*. Moscow: Stroiizdat Publishing; 1957. (In Russ.)
10. Iliakhin S. V., Norov A. Iu., Iakshibaev T. M. Determining the radius of rock fracture zones under the camouflet explosion. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 2016; 116/73: 29–36. (In Russ.)
11. Nikitin L. V., Odintsev V. N. A dilatancy model of tensile macrocracks in compressed rock. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999. Vol. 22. No. 11. P. 1003–1009.
12. Rodionov V. N. Studying the propagation of a void under the camouflet explosion. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 1974; 64/21: 5–25. (In Russ.)
13. Weibull H. R. W. *Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charge*. Annals of the New York Academy of Sciences. 2008. 152. Article 1. P. 356–361.
14. Rakishev B. R., Rakisheva Z. B., Auezova A. M. Speed and time of cylindrical explosion chamber expansion in the rock mass. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 2014; 111/68: 3–17. (In Russ.)
15. Mosinets V. N. *Crushing and earthquake activity of a blast in rocks*. Moscow: Nedra Publishing; 1976. (In Russ.)

Received 6 August 2018

Information about authors:

Iurii A. Borovkov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Geotechnological and Physical Processes in Mining, Russian State Geological Prospecting University. E-mail: bua_51@mail.ru
Temur M. Iakshibaev – PhD student, Department of Geotechnological and Physical Processes in Mining, Russian State Geological Prospecting University. E-mail: temur19.01.1988.tm@list.ru

Для цитирования: Боровков Ю. А., Якшибаев Т. М. Теоретические исследования изменения радиуса зон трещинообразования в рудном штабеле кучного выщелачивания взрывом камуфлетного скважинного заряда ВВ // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 5. С. 30–36. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-30-36

For citation: Borovkov Iu. A., Iakshibaev T. M. Theoretical studies of changes in fracture zones radius in the ore pile of heap leaching with camouflet blasthole charge explosion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 5: 30–36 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-30-36