

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-3-44-49

УДК 622.646

**ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА РУДЫ ПРИ ТОРЦЕВОМ ВЫПУСКЕ В СИСТЕМАХ  
РАЗРАБОТКИ С ОБРУШЕНИЕМ****WIDTH OF ORE FLOW IN PROCESS OF ORE DRAWING FROM WORKING  
FACE FOR SYSTEMS WITH CAVING ORES AND CONTAINING BREEDS****Ермакова Инна Алексеевна**доктор техн. наук, профессор, e-mail: [eia.pm@kuzstu.ru](mailto:eia.pm@kuzstu.ru)**Inna A. Ermakova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [eia.pm@kuzstu.ru](mailto:eia.pm@kuzstu.ru)

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya str., Kemerovo, 650000, Russian  
Federation

**Аннотация:**

Системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород характеризуются повышенными показателями потерь и разубоживания. Повышение эффективности системы разработки с подэтажным обрушением обеспечивается совершенствованием торцевого выпуска руды. Знание параметров потока, истекающего в выработку, является необходимым. Существующая теория выпуска руды основана на том, что объем выпускаемой руды пропорционален ширине рудоспуска или диаметру выпускного отверстия. Эта закономерность не действует при истечении потока руды, который изменяет направление движения. В данной работе показаны новые закономерности процесса выпуска руды. Отличительная особенность послойного выпуска заключается в том, что рудный поток формируется у стенки рудного массива, которая и является одной из границ потока. В случае торцевого выпуска руды выпускное отверстие как таковое отсутствует. В работе установлено, что истечение руды при торцевом выпуске происходит через условное выпускное отверстие. Оно формируется на уровне кровли доставочной выработки и имеет определенный размер. Граница потока описывается единым параболическим уравнением для частиц различной крупности. Полученная зависимость позволяет рассчитать ширину зоны потока на различной высоте в зависимости от крупности руды и коэффициента разрыхления.

**Ключевые слова:** системы с подэтажным обрушением руды и вмещающих пород, торцевой выпуск руды, ширина потока руды.

**Abstract:**

The mining systems including caving of ores and enclosing rock are characterized by increased losses and ore dilution. Increasing the efficiency of the systems with sublevel caving of ores and enclosing rock is ensured by improving of ore drawing from working face. It is necessary to know the parameters of the flow that runs out into the mine roadways. The current theory of ore drawing is based on the fact that the volume of ore produced is proportional to the width of the draw raise or the diameter of the hole. This regularity does not apply to the ore flow, which changes the direction of its motion. In this paper, new regularities of the process of ore drawing are presented. A distinctive feature of the layered ore drawing is that the ore flow is formed at the wall of the ore massif, which is one of the flow boundaries. In the case of ore drawing from the working face, the outlet hole as such is absent. In the study it is established that the outflow of ore from the working face occurs through a conditional hole. It is formed at the level of the roof of the delivery workings and has a certain size. The flow boundary is described by a single parabolic equation for particles of different sizes. The obtained dependence makes it possible to calculate the width of the flow zone at different heights, depending on the ore size and the disintegration coefficient.

**Key words:** sublevel caving systems, ore drawing, width of ore flow.

Вариант системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород и торцевым выпуском руды характеризуется относительно низкими затратами при добыче и является наиболее распространенным. Известными недостатками этого варианта системы разработки являются низкие показатели извлечения. Снижение потерь и разубоживания возможно за счет увеличения соответствия между объемной фигурой, в которой находится отбитая руда и той объемной фигурой, из которой она истекает. Однако ранее проведенными исследованиями не получены зависимости, позволяющие рассчитать параметры потока при торцевом выпуске руды [1 – 13].

При выпуске руды формируется зона потока – пространственная фигура, образующаяся над выпускным отверстием, внутри которой частицы одновременно участвуют в движении [1]. В. В. Куликов [2] зону потока называет областью влияния выпускного отверстия и говорит, что это – предельная граница, за которой частицы остаются неподвижными при выпуске любого количества материала из отверстия.

При выпуске руды возможны два варианта формирования потока.

**В первом случае** очистное пространство над выпускной выработкой заполнено отбитой рудой, поток формируется в виде параболоида (рис. 1а), с границей потока 1. Такая картина наблюдается при площадном выпуске, когда большой объем руды выпускается одновременно через выработки

днища блока.

Установлено [14], что вне зависимости от размера выпускного отверстия  $D_{отв}$ , поток руды истекает через некоторое сечение на уровне изменения потока направления движения. Это сечение названо условным выпускным отверстием, а его размер  $D_{усл}$ . Диаметр условного выпускного отверстия равен четырехкратному размеру куска руды, однородной по крупности:  $D_{усл} = 4d$ .

Зависимость ширины потока  $H$  выше уровня огибания целика от его высоты  $l$  имеет вид:

$$H = D_{усл} + h = 4d + \sqrt{10dl} \quad (1)$$

где  $d$  – размер куска руды однородной крупности.

Руду, представляющую собой смесь кусков различной крупности, можно представить как руду однородного состава с эквивалентным размером куска  $d_{экв}$ . При этом характеристики потока руды из кусков различной крупности совпадают с характеристиками потока руды однородной

крупности  $d_{экв}$ . Диаметр куска руды для расчета ширины потока определяется из установленных соотношений:

$$d = \begin{cases} d_{экв} = 1,5d_{срвз}, & \text{при } \gamma_{кр} < 50\%; \\ d, & \text{при } \gamma_{кр} \geq 50\%, \end{cases} \quad (2)$$

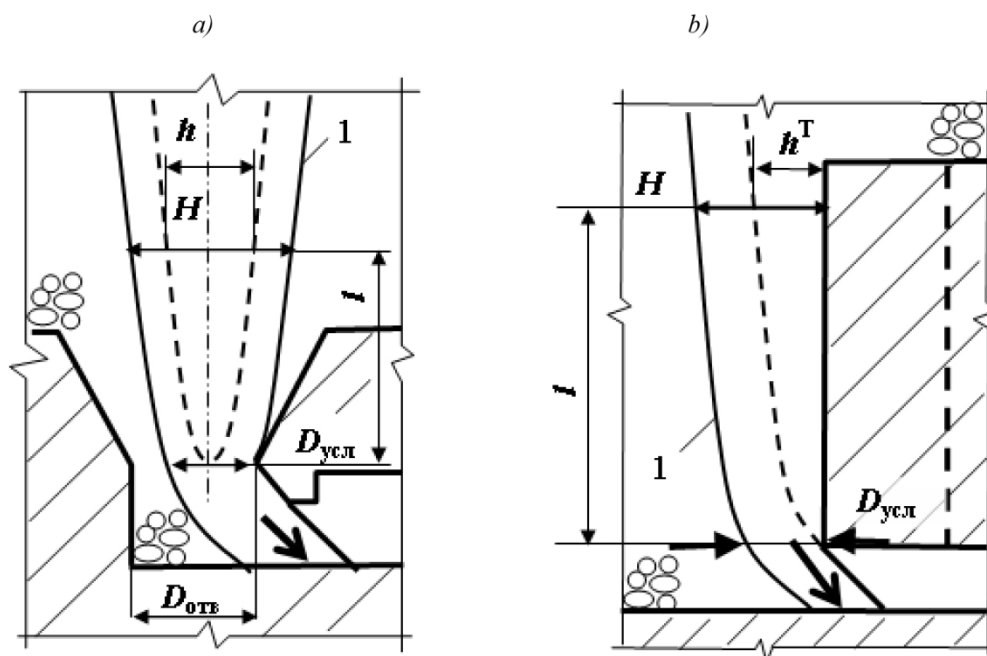
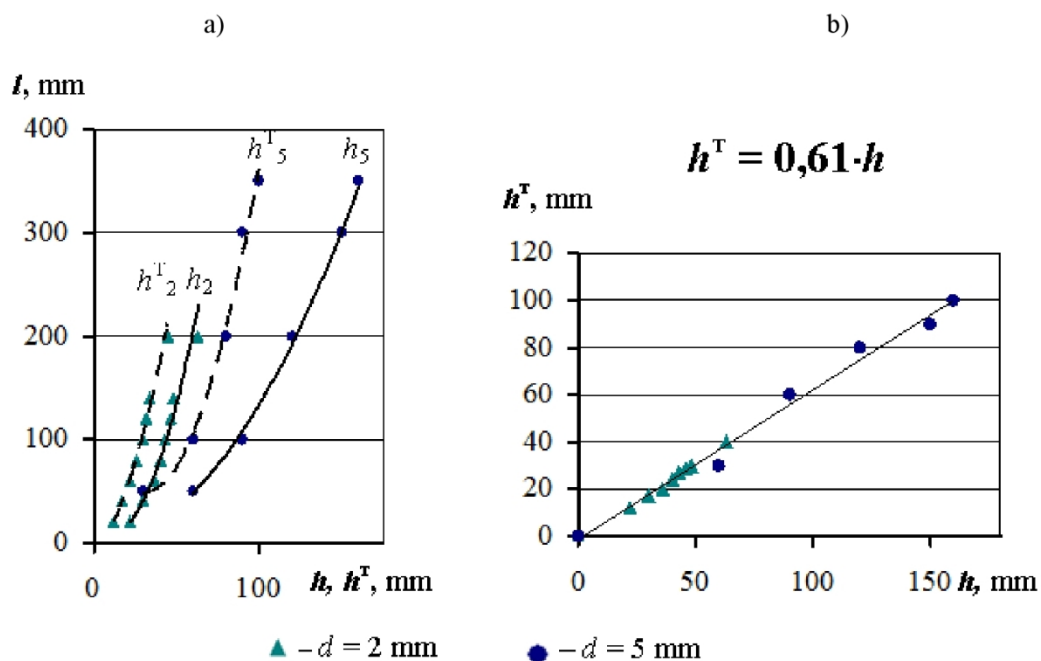


Рис. 1. Формирование огибающего потока: при площадном (а) и торцевом (б) выпуске руды; 1 – граница потока руды

Fig. 1. Formation of the envelope flow of ore: at areal drawing from stope sill (a) and at sublevel dtawing from working face (b); 1 – boundary of the ore flow

Таблица 1 - Результаты измерений ширины потока

$d = 2 \text{ мм}$			$d = 5 \text{ мм}$		
$l, \text{ мм}$	$h^T, \text{ мм}$ (при торцевом выпуске)	$h, \text{ мм}$ (при площадном вы- пуске через воронку с дучкой)	$l, \text{ мм}$	$h^T, \text{ мм}$ (при торце- вом выпуске)	$h, \text{ мм}$ (при площадном вы- пуске через воронку с дучкой)
0	0	0	0	0	0
20	12	22	50	30	60
40	17	30	100	60	90
60	20	36	200	80	120
80	24	40	300	90	150
100	27	43	350	100	160
120	29	46			
140	30	48			
200	40	63			

Рис. 2. Ширина потоков при торцевом выпуске руды  $h^m$  и площадном выпуске  $h$  (а); взаимосвязь между  $h$  и  $h^m$  (б)Fig. 2. Width of ore flow in the process of ore drawing from working face  $h^m$  and ore drawing from stope sill  $h$  (а); the relationship between  $h$  and  $h^m$  (b)

где  $d_{срвз}$  – средневзвешенный размер куска руды различной крупности.

Выражение (2) используется следующим образом. Если содержание в руде крупной фракции  $\gamma_{кр}$  более 50%, то размер именно этой фракции определяет ширину потока. Если содержание в руде крупной фракции  $\gamma_{кр}$  менее 50%, то для расчета ширины потока следует использовать эквивалентный размер куска.

Таким образом, ширина огибающего потока  $H$

руды различной крупности при содержании в ней крупной фракции менее 50% находится по формуле

$$H = 6d_{срвз} + \sqrt{15d_{срвз} \cdot l} \quad (3)$$

**Во втором случае** руда отбивается и выпускается послойно либо через торец доставочной выработки, либо через воронки с дучками. Отличительной особенностью послойного выпуска является то, что поток формируется у стенки рудного массива (рис.1б), которая и является одной из границ потока. В случае торцевого выпуска руды

выпускное отверстие как таковое отсутствует. Поток руды под углом естественного откоса истекает в доставочную выработку. При этом поток огибает кровлю целика над доставочной выработкой, где формируется условное выпускное отверстие, аналогично первому случаю при выпуске руды через воронку с дучкой.

Моделировался торцевой выпуск руды под обрушенными породами, проводились наблюдения за неподвижной частью руды над выпускным отверстием и подвижной – зоной потока. Выпуск рудной массы прекращался после того, как зона потока переставала расширяться. Далее проводились измерения ширины потока  $H$  на нескольких уровнях по высоте  $l$ . Так как ширина потока складывается из двух составляющих, была рассчитана ширина параболы  $h^T = H - D_{\text{отв}}$ , причем

Составляющие дисперсии	Суммы квадратов	Число степеней свободы	Среднее квадратов
Регрессия	1071	1	1071
Остаток	8	7	1,14
Всего	1079	8	

$D_{\text{отв}} = D_{\text{усл}} = 4d$ , так как поток изменяет направление движения. Результаты экспериментов по выпуску руды крупностью 2 мм и 5 мм занесены в табл.1. В эту же таблицу занесены значения  $h$ , полученные при выпуске руды этой же крупности через воронку с дучкой, когда поток имеет форму параболоида.

Результаты измерений представлены в виде графиков на рис. 2а. Ширина параболы при торцевом выпуске руды крупностью 2 мм и 5 мм показана линиями  $h^T_2$  и  $h^T_5$  соответственно. Линии  $h_2$  и  $h_5$  показывают ширину параболы при площадном выпуске руды крупностью 2 мм и 5 мм соответственно.

Из графиков наглядно видно, что ширина потока при торцевом выпуске  $h^T$  меньше, чем ширина потока при площадном выпуске  $h$ . При этом величины  $h$  и  $h^T$  находятся в определенном соотношении, рассчитанные коэффициенты корреляции между ними значимы. Методом наименьших квадратов были найдены уравнения регрессии:

$$h^T_2 = 0,646 \cdot h_2 - 1,433 \text{ для руды крупностью } d = 2 \text{ мм;} \quad (4)$$

$$h^T_5 = 0,634 \cdot h_5 - 1,305 \text{ для руды крупностью } d = 5 \text{ мм.} \quad (5)$$

Однако из смысла задачи следует, что  $h^T = 0$ , когда  $h = 0$ , то есть линии регрессии проходят через начало координат. Нахождение таких линий регрессии было выполнено согласно работе [15], сначала для руды крупностью 2 мм, а затем – 5 мм.

1) Для руды крупностью 2 мм.

Обозначив независимую переменную  $h_2$  как  $x$ , а зависимую переменную  $h^T_2$  как  $y$ , были найдены величины

$$\begin{aligned} \sum x_i &= 328, \sum y_i = 199, \sum x_i^2 = 14518, \sum y_i^2 = 5479, \sum x_i \cdot y_i = 8909, \\ \sum (x_i - \bar{x})^2 &= 2564, \sum (y_i - \bar{y})^2 = 1079, \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 1657, \\ \sum (\hat{y} - \bar{y})^2 &= \frac{1657^2}{2564} = 1071. \end{aligned}$$

Построим таблицу дисперсионного анализа.

Уравнение регрессии, проходящее через нача-

ло координат, имеет уравнение  $y = bx$ , названо однопараметрическим, в отличие от ранее полученных уравнений (4, 5), содержащих два параметра.

Найдена оценка коэффициента регрессии однопараметрического уравнения:

$$b = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\sum x_i^2} = 0,61$$

Вычислены: сумма квадратов, обусловленная

$$\text{регрессией: } \frac{(\sum x_i \cdot y_i)^2}{\sum x_i^2} = 5467 \quad \text{и остаточная сумма}$$

$$\text{квадратов: } \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum y_i^2 - \frac{(\sum x_i \cdot y_i)^2}{\sum x_i^2} = 12$$

Для проверки гипотезы о соответствии однопараметрической прямой  $y = b \cdot x = 0,61x$  исходным данным была составлена таблица.

Проверка нулевой гипотезы об отсутствии улучшения при рассмотрении двухпараметрической прямой вместо однопараметрической производится с помощью дисперсионного отношения,

Составляющие дисперсии	Суммы квадратов	Число степеней свободы	Среднее квадратов
Отклонения от прямой $y = b \cdot x$	12	8	
Отклонения от прямой $y = a + b \cdot (x - \bar{x})$	8	7	1,14
Разность, которую можно объяснить улучшением соответствия при использовании двухпараметрической прямой	4	1	4

которое в данном случае равно  $\frac{4}{1,14} = 3,51$ . При уровне значимости  $\alpha=0,05$  значение  $F$ -критерия с числом степеней свободы 1 и 7 составляет  $F(1; 7) = 5,59$ . Так как  $3,51 < 5,59$ , то нулевая гипотеза принимается, улучшение отсутствует.

2) Аналогично была рассмотрена возможность использования однопараметрической прямой для данных, полученных при выпуске руды крупностью 5 мм.

$$\sum x_i = 580, \sum y_i = 360, \sum x_i^2 = 74200, \sum y_i^2 = 29000, \sum x_i \cdot y_i = 46300,$$

Принимаем, что ширина параболы при торцевом выпуске (рис. 2б) описывается уравнением  $h^T = 0,61 \cdot h$ . (6)

Общая ширина потока находится как сумма диаметра выпускного отверстия и ширины параболы:

$$H = D_{\text{усл}} + h^T = 4d + 0,61h$$

где  $h = \sqrt{10d \cdot l}$ .

Таким образом, при торцевом выпуске шири-

Составляющие дисперсии	Суммы квадратов	Число степеней свободы	Среднее квадратов
Отклонения от прямой $y = b \cdot x$	109	5	
Отклонения от прямой $y = a + b \cdot (x - \bar{x})$	107	4	26,75
Разность, которую можно объяснить улучшением соответствия при использовании двухпараметрической прямой	2	1	2

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 18133, \sum (y_i - \bar{y})^2 = 7400, \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 11500,$$

$$\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = \frac{11500^2}{18133} = 7293.$$

Оценка коэффициента регрессии однопараметрического уравнения регрессии

$$b = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\sum x_i^2} = 0,62$$

Найдены: сумма квадратов, обусловленная ре-

$$\frac{(\sum x_i \cdot y_i)^2}{\sum x_i^2} = 28891$$

грессией и остаточная сумма

$$\text{квадратов: } \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 = 109$$

Расчетное значение  $F$ -критерия составляет  $\frac{2}{26,75} = 0,07$

, критическое значение  $F(1; 4) = 7,7$ . Так как  $0,07 < 7,7$ , то нулевая гипотеза об отсутствии улучшения при использовании двухпараметрической прямой принимается.

на зоны потока рассчитывается по выражению:

$$H = 4d + 0,61\sqrt{10d \cdot l} \quad (7).$$

Выражение получено для руды с коэффициентом разрыхления  $k_p = 1,3 \div 1,4$ . Для расчета ширины зоны потока при  $k_p = 1,2$  следует учитывать результаты исследований В. В. Куликова [2]: при увеличении  $k_p$  с 1,2 до 1,3÷1,4 объем эллипсоида выпуска при той же его высоте увеличивается в 1,3÷1,4 раза. Линейные размеры: ширина эллипсоида и зоны потока при этом увеличиваются в 1,14÷1,18 раза. Поэтому в общем случае ширина потока при изменении им направления движения при торцевом выпуске рассчитывается как

$$H = (4d + 0,61\sqrt{10d \cdot l}) \cdot K, \quad (8)$$

где  $K=1$  при  $k_p = 1,3 \div 1,4$ ;  $K=0,85$  при  $k_p = 1,2$ .

При неоднородной крупности руды следует воспользоваться выражением (2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубынин Н. Г. Технология подземной разработки руд./ Н. Г. Дубынин, В. А. Коваленко, А. Е. Умнов, В. Н. Власов – М.: Недра, 1983. – 128 с.
2. Куликов В.В. Выпуск руды. – М.: Недра, 1980. – 303 с.
3. Шкарпетин В.В. Влияние коэффициента разрыхления руды на показатели извлечения ее при выпуске из блоков // Тр. института ВНИИцветмет. – 1977. – Вып. 28. – С. 62–73.
4. Яковлев О.А. Влияние коэффициента разрыхления сыпучего материала на его механические свойства и закономерности выпуска // Изв. вузов. Горный журнал. – 1964. – № 10. – С. 3-10.
5. Именитов В. Р. Системы подземной разработки рудных месторождений. – М.: МГГУ, 2000. – 297 с.
6. Шиляев Н. С. Физическое моделирование торцевого выпуска руды/ Н. С. Шиляев, Э. И. Богуславский // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 4. – С. 17–20.
7. Савич И. Н. Обоснование конструктивных параметров обрушения при поэтажном торцевом выпуске хромитовых руд/ И. Н. Савич, В. Л. Ищенко/ГИАБ. – 2013. – №4. – с. 34–36.

8. Павлов А. Л. Влияние гранулометрического состава рудной массы на параметры торцевого выпуска при изменяющейся высоте подэтажа / Павлов А. Л., Мустафин В.И., Романов В. А., Сухов Д. И. // ГИАБ. – 2013. – №213. – с. 12–15.
9. Orthogonal Simulation Experiment for Flow Characteristics of Ore in Ore Drawing and Influencing Factors in a Single Funnel Under a Flexible Isolation Layer / Qingfa Chen, Fuyu Zhao, Qinglin Chen, Yuding Wang, Yu Zhong, Wenjing Niu //The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, December 2017, Volume 69, Issue 12, pp. 2485–2491.
10. Aixiang Wu, Yezhi Sun (2008) Granular Dynamic Theory and Its Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 364 p.
11. Freidin A. M., Neverov S. A. Modeling of Area-End Ore Drawing under Caved Rocks // Journal of Mining Science, September 2005, Volume 41, Issue 5, pp. 436–446.
12. Stazhevskii S. B.. Features of flow of broken rock in extraction of ores with sublevel caving// Journal of Mining Science, September 1996, Volume 32, Issue 5, pp. 403–416.
13. Laboratory study of the influence of dip and ore width on gravity flow during longitudinal sublevel caving/ Zhang, Xiufeng Zhu, Zhonghua// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 103, March 2018, pp. 179-185.
14. Ермакова И. А. Установление параметров потока при выпуске руды в системах разработки с обрушением.– Техника и технология горного дела.–2018.–№1.–с. 4–10.
15. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 407 с.

## REFERENCES

1. Dubynin N. G. Tekhnologiya podzemnoj razrabotki rud./ N. G. Dubynin, V. A. Kovalenko, A. E. Umnov, V. N. Vlasov – М.: Nedra, 1983. – 128 p.
2. Kulikov V.V. Vypusk rudy. – М.: Nedra, 1980. – 303 p.
3. Shkarpetin V.V. Vliyanie koefitsienta razryhleniya rudy na pokazateli izvlecheniya ee pri vypuske iz blokov // Tr. instituta VNIIcvetmet. – 1977. – Vol. 28. – pp. 62–73.
4. Yakovlev O.A. Vliyanie koefitsienta razryhleniya sypuchego materiala na ego mekhanicheskie svoystva i zakonmernosti vypuska // Izv. vuzov. Gornyj zhurnal. – 1964. – № 10. – pp. 3-10.
5. Imenitov V. R. Sistemy podzemnoj razrabotki rudnyh mestorozhdenij. – М.: MGGU, 2000. – 297 p.
6. Shilyaev N. S. Fizicheskoe modelirovanie torceвого vypuska rudy/ N. S. Shilyaev, E.H. I. Boguslavskij // Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya. – 2007. – № 4. – pp. 17–20.
7. Savich I. N. Obosnovanie konstruktivnyh parametrov obrusheniya pri podehtazhnom torcevom vypuske hromitovyh rud/ I. N. Savich, V. L. Ishchenko//GIAБ. – 2013. – №4. – p. 34–36.
8. Pavlov A. L. Vliyanie granulometricheskogo sostava rudnoy massy na parametry torceвого vypuska pri izmenyayushcheysya vysote podehtazha / Pavlov A. L., Mustafin V.I., Romanov V. A., Suhov D. I. // GIAБ. – 2013. – №213. – pp. 12–15.
9. Orthogonal Simulation Experiment for Flow Characteristics of Ore in Ore Drawing and Influencing Factors in a Single Funnel Under a Flexible Isolation Layer / Qingfa Chen, Fuyu Zhao, Qinglin Chen, Yuding Wang, Yu Zhong, Wenjing Niu //The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, December 2017, Volume 69, Issue 12, pp. 2485–2491.
10. Aixiang Wu, Yezhi Sun (2008) Granular Dynamic Theory and Its Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 364 p.
11. Freidin A. M., Neverov S. A. Modeling of Area-End Ore Drawing under Caved Rocks // Journal of Mining Science, September 2005, Volume 41, Issue 5, pp. 436–446.
12. Stazhevskii S. B. Features of flow of broken rock in extraction of ores with sublevel caving// Journal of Mining Science, September 1996, Volume 32, Issue 5, pp. 403–416.
13. Laboratory study of the influence of dip and ore width on gravity flow during longitudinal sublevel caving/ Zhang, Xiufeng Zhu, Zhonghua// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 103, March 2018, pp. 179-185.
14. Ермакова И. А. Установление параметров потока при выпуске руды в системах разработки с обрушением.– Техника и технология горного дела.–2018.–№1.– pp. 4–10.
15. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 407 p.