



УДК 622.646

## УСТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ПРИ ВЫПУСКЕ РУДЫ В СИСТЕМАХ РАЗРАБОТКИ С ОБРУШЕНИЕМ

**Ермакова И.А.**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

### **Информация о статье**

Принята 21 февраля 2018 г.

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

### **Аннотация.**

Представлены результаты исследования выпуска руды в системах разработки с обрушением руды и вмещающих пород. При гравитационном выпуске руда истекает в доставочную выработку через воронку с дучкой, при этом поток изменяет направление движения. Установлено, что при выпуске руды с изменением направления движения ширина потока не зависит от размера выпускного отверстия. Получены закономерности, позволяющие рассчитать ширину потока при прямоточном истечении и при изменении им направления движения.

## SETTING OF FLOW PARAMETERS DURING RELEASE OF ORE IN CAVING SYSTEMS

**Inna A. Ermakova**

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

### **Article info**

Received February 21, 2018

**Keywords:** caving systems, physical modeling, release of ore, stream of ore width.

### **Abstract.**

The results of a study on the release of ore in caving systems. With a gravity release, the ore expires in the haulage working through a funnel with a box hole, while the stream changes the direction of motion. It is established that when the ore is released with a change in the direction of motion, the width of the stream does not depend on the size of the outlet. Regularities have been obtained that allow calculating the stream width for direct flow and when the direction of its motion changes.

### **Введение**

Эффективность системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород во многом определяет выпуск руды. Процесс выпуска руды вместе с подготовкой днищ блоков характеризуется высокой трудоемкостью, которая составляет более половины от общих затрат по системе разработки. От способа и организации выпуска руды зависят величины ее потерь и засорения, которые в лучшем случае составляют 10÷15% и 25÷35% соответственно, что значительно превышает аналогичные показатели в других системах разработки [1, 2]. Решение проблемы повышения эффективности выпуска руды, и системы разработки в целом, заключается в установлении закономерностей ее истечения из очистного пространства.

### **Постановка вопроса. Материалы и методы исследований**

Современное состояние теории выпуска руды ограничено изучением прямоточного истечения руды через плоское выпускное отверстие (рис. 1, а). При этом известно, что поток над выпускным отверстием имеет форму параболоида. Зона потока ([1], рис.1) – это пространственная фигура, образующаяся при выпуске в сыпучем теле над выпускным отверстием, внутри которой частицы одновременно участвуют в движении [3]. В.В.Куликов [4] 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. Однако, существующая теория выпуска не располагает методикой расчета параметров зоны потока ни при донном, ни при торцевом выпуске руды. Известно лишь, что при прямом истечении руды с увеличением диаметра выпускного отверстия ширина потока также увеличивается.

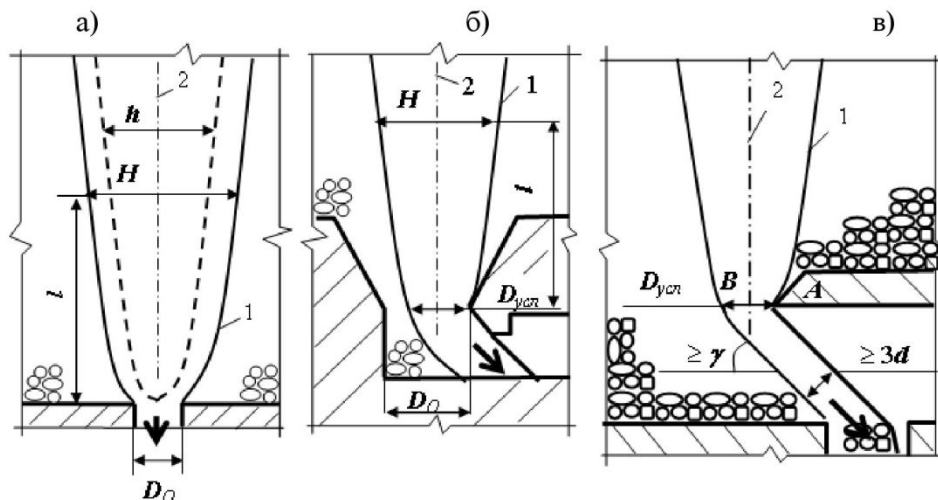


Рис. 1. Выпуск руды: прямоточный (а), через воронку с дучкой (б), через плоское отверстие с препятствием над ним (в): 1– граница потока

Исследователи единодушны в том, что при выпуске руды наибольшее влияние на ширину зоны потока и, соответственно, параметры эллипсоида выпуска оказывает крупность руды [4, 5, 6]. Увеличение коэффициента разрыхления улучшает истечение руды и приводит к увеличению ширины потока [7, 8]. Увеличение сил сцепления и влажности ухудшает условия истечения, и приводит к уменьшению ширины зоны потока. Таким образом, можно считать, что факторы, влияющие на ширину зоны потока и параметры эллипсоидов выпуска, являются известными. Однако исследователи не пришли к единому мнению о количественном влиянии каждого фактора на указанные параметры. Поэтому, зная характеристики отбитой руды, практически невозможно рассчитать ширину зоны потока в производственных условиях.

На практике отбитая руда поступает на почву доставочной выработки, откуда удаляется скреперной лебедкой или погрузчиком. При донном выпуске руда истекает через выпускную выработку (воронку с дучкой) (рис. 1, б), при выпуске поток огибает целик над доставочной выработкой, и руда поступает в нее под углом естественного откоса. Такое истечение отличается от прямоточного, и образование огибающего потока в таких условиях изучено недостаточно.

Установление параметров потока при выпуске руды было проведено с помощью физического моделирования с соблюдением геометрического подобия и равенства натурального и модельного коэффициентов разрыхления руды и коэффициентов трения.

### Результаты и обсуждение

На первом этапе экспериментов проводился прямоточный выпуск руды однородной крупности  $d$  через плоское отверстие в днище модели диаметром  $D_0$  (см. рис. 1, а). Свободное, без завихрений истечение руды однородной крупности происходит в том случае, когда диаметр отверстия  $D_0$  превышает утроенный размер куска  $d$ , то есть,  $D_0 > 3d$ . В ходе экспериментов проводились измерения общей ширины зоны потока  $H$  на высоте  $l$ . При увеличении диаметра отверстия ширина потока соответственно увеличивалась. Поэтому, при обработке результатов экспериментов из общей ширины потока  $H$  была вычтена величина выпускного отверстия  $D_0$ . Для руды крупностью  $d = 1, 2$  и  $3$  мм были получены зависимости изменения ширины параболы по ее высоте (рис. 2, а). С увеличением крупности руды ширина параболы увеличивается.

Для получения единого уравнения, позволяющего рассчитать ширину параболы  $h$  и ширину потока  $H$  для руды любой крупности, был осуществлен переход к безразмерным координатам. Ширина параболы  $h$  и высота  $l$ , на которой она измерялась, были выражены через число



частиц, для чего их величины делились на диаметр куска  $d$ , и были получены количества частиц по вертикали  $N_v$  и горизонтали  $N_h$ :

$$N_v = \frac{l}{d} \text{ и } N_h = \frac{h}{d} \quad (1)$$

Полученные результаты представлены в виде кривых 1, 2, 3 на рисунке 2, б.

Для всех трех линий была построена общая линия регрессии – 4, и найдено общее значимое уравнение регрессии в виде:

$$N_v = 0,1 \cdot N_h^2 \quad (2)$$

Подставляя в (2) значения  $N_v$  и  $N_h$  из (1) было получено уравнение для расчета ширины параболы  $h$  на высоте  $l$ :

$$h = \sqrt{10dl} \quad (3)$$

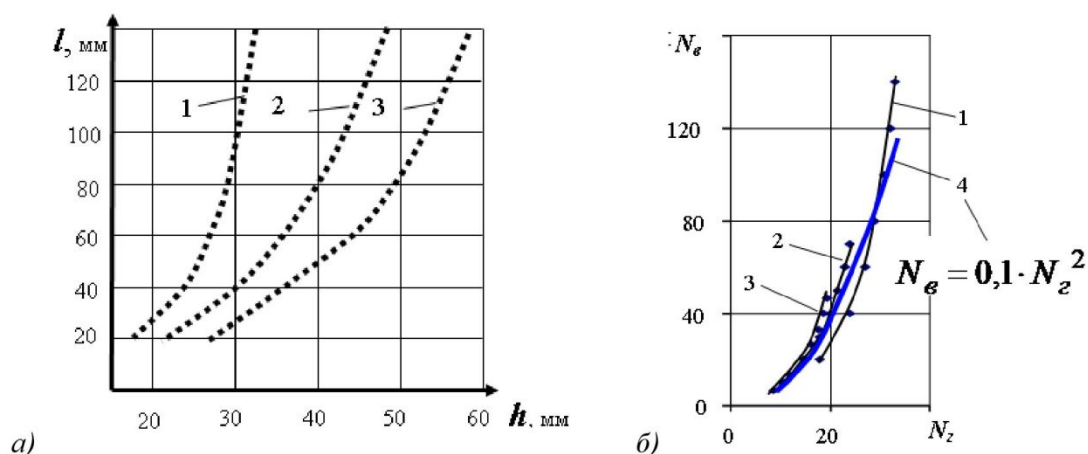


Рис. 2. Ширина параболы  $h$  после вычета диаметра выпускного отверстия (а) и зависимость между числом частиц по горизонтали  $N_h$  и вертикали  $N_v$  внутри зоны потока (б): 1 –  $d = 1$  мм; 2 –  $d = 2$  мм; 3 –  $d = 3$  мм; 4 – общая зависимость

Таким образом, при проточном истечении общая ширина потока  $H$  является суммой диаметра выпускного отверстия  $D_o$  и ширины параболы  $h$ , которая зависит от крупности руды. Таким образом, ширину потока, истекающего проточно, на заданной высоте для руды однородной крупности  $d$  можно оценить по формуле:

$$H = D_o + \sqrt{10dl} \quad (4)$$

На втором этапе экспериментов проводился выпуск руды однородной крупности через воронку с дучкой (см. рис.1, б) и через плоское отверстие с целиком над ним (см. рис.1, в). В обоих случаях поток изменяет направление движения при огибании целика и имеет форму параболы выше него (точка А) одинаковой ширины. Образование огибающего потока происходит при выполнении условий проходимости кусков руды к месту их удаления:

- 1) угол наклона зоны прохода частиц к выпускному отверстию ниже препятствия должен быть не меньше угла естественного откоса сыпучего материала  $\gamma$ ;
- 2) ширина указанной зоны должна быть не меньше  $3d$ .

Несоблюдение этих условий приводит к зависанию кусков руды и невозможности выпуска руды.

Результаты экспериментов показали принципиальное различие между процессом истечения: проточного и с изменением направления движения. Диаметр выпускного отверстия не оказывает влияния на ширину потока. Вне зависимости от размера выпускного отверстия  $D_o$ , поток руды истекает через некоторое сечение на уровне изменения потоком направления движения. Это сечение названо условным выпускным отверстием, а его размер –  $D_{усл}$ .

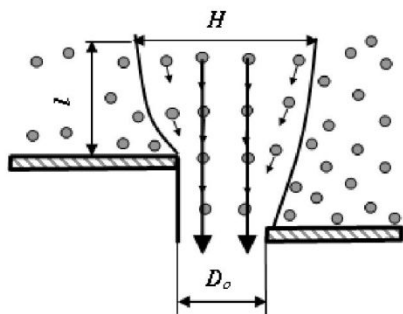


Виды истечения руды показаны на рис. 3. Здесь движение частиц происходит через отверстие, кромки которого находятся на разной высоте, на расстоянии  $W$  друг от друга. Прямоточное свободное истечение происходит при размере отверстия больше четырехкратного размера куска руды  $D_o > 4d$  (рис. 2, а). При таком виде истечения увеличение  $D_o$  приводит к расширению потока. При уменьшении  $D_o$  до  $(3-4)d$  осуществляется переход от прямоточного истечения к огибанию, ширина потока становится фиксированной, зависящей только от характеристик руды. Истечение с огибанием может также осуществляться при  $D_o = 0$  (рис. 3, в) или его отрицательном значении (рис. 3, г). Величина отверстия, при котором происходит истечение с огибанием, зависит от угла естественного откоса руды  $\varphi$  и высоты между кромками отверстия  $W$ :

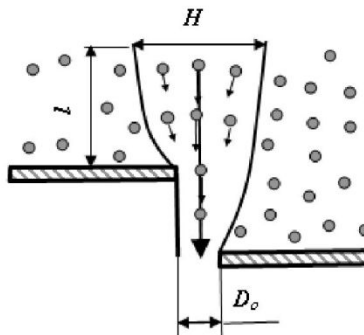
$$3d/\sin\varphi - W/\text{tg}\varphi \leq D_o < 3d. \tag{5}$$

В этом случае ширина потока остается постоянной. При дальнейшем уменьшении  $D_o$  истечение прекращается (рис. 3, д) – руда под углом естественного откоса лежит на нижней кромке отверстия.

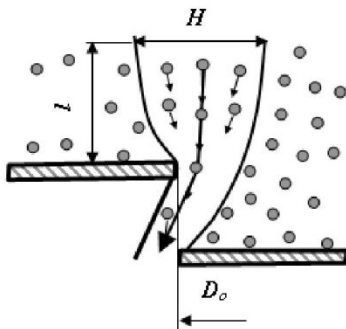
а) ПРЯМОТОЧНОЕ ИСТЕЧЕНИЕ  
 $D_o > 4d$



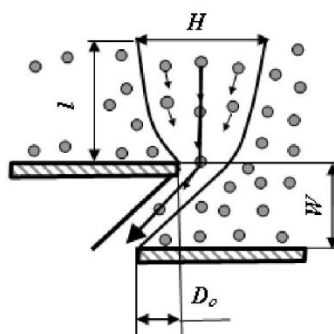
б) ПЕРЕХОД ОТ ПРЯМОТОЧНОГО ИСТЕЧЕНИЯ К ОГИБАНИЮ  
 $D_o = (3-4) \cdot d$



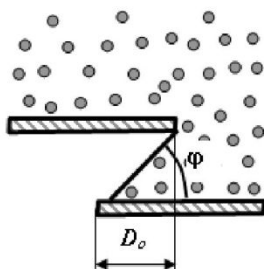
в) ИСТЕЧЕНИЕ С ОГИБАНИЕМ  
 $0 \leq D_o < 3d$



г) ИСТЕЧЕНИЕ С ОГИБАНИЕМ  
 $3d/\sin\varphi - W/\text{tg}\varphi \leq D_o \leq 0$



д) ОТСУТСТВИЕ ИСТЕЧЕНИЯ  
 $D_o < 3d/\sin\varphi - W/\text{tg}\varphi$



е) ЗАВИСИМОСТЬ ШИРИНЫ ПОТОКА ОТ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ

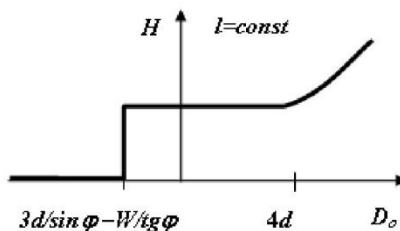


Рис. 3. Виды и условия истечения руды



Зависимость ширины потока  $H$  на произвольной высоте  $l$  от диаметра выпускного отверстия показана на рис. 3, е.

**Третий этап** экспериментов был посвящен установлению диаметра условного выпускного отверстия при выпуске руды однородной крупности. Руда крупностью 1, 2 и 3 мм выпускалась через воронку с дучкой. Измерялась ширина зоны потока на различной высоте от точки огибания, уровень которой был принят за нулевой, так как поток имеет форму параболоида выше нее. Ширина зоны огибающего потока сравнивалась с шириной потоков при прямооточном истечении через выпускные отверстия различного диаметра. В результате было установлено, что ширина огибающего потока совпадает с шириной потока при прямооточном истечении через отверстие, диаметр которого равен четырехкратному размеру куска руды. Поэтому диаметр условного выпускного отверстия:

$$D_{\text{усл}} = 4d. \quad (6)$$

Зависимость ширины потока выше уровня огибания от его высоты имеет вид, аналогичный (4):

$$H = D_{\text{усл}} + \sqrt{10dl} = 4d + \sqrt{10dl}. \quad (7)$$

**На четвертом этапе** экспериментов было установлено влияние соотношения фракций на ширину огибающего потока. Для расчета параметров потока необходимо иметь показатель, характеризующий распределение руды по крупности. Естественно предположить, что для руды любого непрерывного гранулометрического состава можно подобрать руду определенной однородной крупности таким образом, чтобы параметры потоков при выпуске совпадали. На основании этого, руду с непрерывным гранулометрическим составом для расчетов целесообразно представить в виде руды однородной крупности, размер куска которой был назван эквивалентным.

Были проведены эксперименты с рудой, представляющей собой смесь кусков двух размеров. Ранее были определены размеры зоны потока для огибающего потока для руды крупностью 1, 2 и 3 мм. Затем выпускалась руда с частицами крупностью 1 и 2 мм, причем руда с  $d=2$  мм составляла в смеси последовательно 10, 20, 30, 40, 50, 60%. Увеличение содержания крупной руды ( $d=2$  мм) до 40% постепенно увеличивает ширину потока. При содержании крупной руды 50% и более, размеры огибающего потока совпадают с размерами потока, который образуется при выпуске руды крупностью 2 мм. Аналогично, производились замеры ширины зоны потока для руды с крупностью кусков 2 и 3 мм. Результаты совпадают с ранее полученными: увеличение содержания руды с  $d=3$  мм от 10 до 50% постепенно увеличивает ширину потока до максимальной, которая соответствует потоку при выпуске руды с крупностью 3 мм.

Далее эксперименты проводились с рудой, представляющей собой смесь трех фракций: 1 мм, 2 мм и 3 мм в различном процентном соотношении. Установление эквивалентного размера куска  $d_{\text{экв}}$  для расчета диаметра условного выпускного отверстия проводилось по следующей схеме. Параметры огибающего потока сравнивались с параметрами потока руды той же крупности, истекающего прямооточно через отверстия различного диаметра. При их совпадении, диаметр условного выпускного отверстия  $D_{\text{усл}}$  принимался равным диаметру плоского отверстия. Используя выражение (6), для каждой смеси были рассчитаны значения  $d_{\text{экв}} = D_{\text{усл}}/4$ .

Например, руда состояла из 80% частиц крупностью 1 мм и 20% крупностью 2 мм. Эта руда выпускалась через плоские отверстия диаметром 4, 5, 6, 8, 10 мм, и замерялась ширина зоны потока. Для этого же материала были произведены замеры огибающего потока. В данном случае огибающий поток соответствовал по размерам потоку, прямооточно истекающему через отверстие диаметром 5 мм. Тогда для данной смеси эквивалентный размер куска равен:  $d_{\text{экв}} = 5:4 = 1,3$  мм. Аналогично проводилось установление эквивалентного размера куска для смесей с различным содержанием трех фракций.

Для руды с непрерывным гранулометрическим составом, то есть в случае, когда содержание самой крупной фракции в руде  $\gamma_{\text{кр}}$  менее 50%, определен эквивалентный размер куска  $d_{\text{экв}}$ , позволяющий представить такую руду в виде кусков однородной крупности. При этом характеристики потока руды из кусков различной крупности совпадают с характеристиками потока



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

$$d = \begin{cases} d_{экр} = 1,5d_{срвз}, & \text{при } \gamma_{кр} < 50\%; \\ d, & \text{при } \gamma_{кр} \geq 50\%, \end{cases} \quad (8)$$

где  $d_{срвз}$  – средневзвешенный размер куска руды непрерывного гранулометрического состава.

Таким образом, руду с непрерывным гранулометрическим составом, если содержание в ней крупной фракции менее 50%, можно представлять в виде руды с однородной крупностью частиц, причем  $d_{экр} = 1,5d_{срвз}$ . Расчет ширины потока  $H$  на произвольной высоте  $l$  в случае, когда поток изменяет направление движения, для руды непрерывного гранулометрического состава, производится по формуле:

$$H = 6d_{срвз} + \sqrt{15d_{срвз} \cdot l}. \quad (9)$$

Если содержание самой крупной фракции в руде более 50%, то именно ее размер куска следует использовать для расчета ширины огибающего потока (4).

### Выводы

Таким образом, установлено следующее.

– При прямооточном выпуске руды ширина потока складывается из ширины параболы и диаметра выпускного отверстия; для различной крупности кусков получено единое уравнение параболы в безразмерных координатах.

– Между прямооточным истечением руды и истечением с изменением направления движения имеется принципиальное различие: диаметр выпускного отверстия не оказывает влияния на ширину потока. Вне зависимости от размера выпускного отверстия  $D_o$ , поток руды истекает через некоторое сечение на уровне изменения потоком 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.

– Руду непрерывного гранулометрического состава можно представить в виде руды однородной крупности, размер куска которой был назван эквивалентным. Эквивалентный размер куска определяется как  $d_{экр} = 1,5d_{срвз}$  при наличии крупной фракции менее 50%, где  $d_{срвз}$  – средневзвешенный размер куска.

– Установление параметров огибающего потока позволяет, с одной стороны, определить рациональные размеры выпускных выработок, а с другой, показатели выпуска – объем выпущенной руды, потери и разубоживание.

### Список источников

1. Савич, И. Н. Обоснование конструктивных параметров обрушения при подэтажном торцевом выпуске хромитовых руд / И. Н. Савич, В. Л. Ищенко // ГИАБ. – 2013. – №4. – С. 34-36.
2. Именитов, В. Р. Системы подземной разработки рудных месторождений / М.: МГГУ, 2000. – 297 с.
3. Дубынин, Н. Г. Технология подземной разработки руд / Н. Г. Дубынин, В. А. Коваленко, А. Е. Умнов, В. Н. Власов // М.: Недра, 1983. – 128 с.
4. Куликов, В. В. Выпуск руды / М.: Недра, 1980. – 303 с.
5. Павлов, А. Л. Влияние гранулометрического состава рудной массы на параметры торцевого выпуска при изменяющейся высоте подэтажа / А. Л. Павлов, В. И. Мустафин, В. А. Романов, Д. И. Сухов // ГИАБ. – 2013. – №213. – С. 12-15.
6. Мислибаев, И. Т. Изучение влияния процесса выпуска руды на показатели извлечения при подземной разработке месторождений полезных ископаемых / И. Т. Мислибаев, Э. Т. Турсунов, О. М. Гиязов, С. М. Азамкулов // Горный вестник Узбекистана. – 2017. – №1 (68). – С. 54-58.
7. Шкарпетин, В. В. Влияние коэффициента разрыхления руды на показатели извлечения ее при выпуске из блоков // Тр. института ВНИИцветмет. – 1977. – Вып. 28. – С. 62-73.



8. Яковлев, О.А. Влияние коэффициента разрыхления сыпучего материала на его механические свойства и закономерности выпуска // Изв. вузов. Горный журнал. – 1964. – № 10. – С. 3-10.

## References

1. Savich, I. N. Obosnovanie konstruktivnykh parametrov obrusheniya pri podetazhnom tortsevom vypuske khromitovykh rud / I. N. Savich, V. L. Ishchenko // GIAB. – 2013. – №4. – С. 34-36.
2. Imenitov, V. R. Sistemy podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy / M.: MGGU, 2000. – 297 s.
3. Dubynin, N. G. Tekhnologiya podzemnoy razrabotki rud / N. G. Dubynin, V. A. Kovalenko, A. E. Umnov, V. N. Vlasov // M.: Nedra, 1983. – 128 s.
4. Kulikov, V.V. Vypusk rudy / M.: Nedra, 1980. – 303 s.
5. Pavlov, A.L. Vliyanie granulometricheskogo sostava rudnoy massy na parametry tortsevogo vy-puska pri izmenyayushcheysya vysote podetazha / A.L. Pavlov, V.I. Mustafin, V.A. Romanov, D.I. Sukhov // GIAB. – 2013. – №213. – С.12-15.
6. Mislibaev, I. T. Izuchenie vliyaniya protsessa vypuska rudy na pokazateli izvlecheniya pri pod-zemnoy razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh / I.T. Mislibaev, E.T. Tursunov, O.M. Giyazov, S.M. Azamkulov // Gornyy vestnik Uzbekistana. – 2017. – №1 (68). – С. 54-58.
7. Shkarpetin, V.V. Vliyanie koeffitsienta razrykhleniya rudy na pokazateli izvlecheniya ee pri vy-puske iz blokov // Tr. instituta VNIItsvetmet. – 1977. – Вып. 28. – С. 62-73.
8. Yakovlev, O.A. Vliyanie koeffitsienta razrykhleniya sypuchego materiala na ego mekhanicheskie svoystva i zakonmernosti vypuska // Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. – 1964. – № 10. – С. 3-10.

## Авторы

**Ермакова Инна Алексеевна** – доктор техн. наук, профессор каф. математики  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
e-mail: [eia.pm@kuzstu.ru](mailto:eia.pm@kuzstu.ru)

## Authors

**Inna E. Ermakova** – Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Mathematics Chair  
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation  
e-mail: [eia.pm@kuzstu.ru](mailto:eia.pm@kuzstu.ru)

## Библиографическое описание статьи

Ермакова, И.А. Установление параметров потока при выпуске руды в системах разработки с обрушением // Техника и технология горного дела. – 2018. – № 1 (1). – С. 4-11.

## Cite this article

Ermakova I.A. (2018) Setting of flow parameters during release of ore in caving systems, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 1(1):4.