

генетические и поисковые модели) / А.В. Волков, В.А. Сидоров // Золото северного обрамления Пацифика. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2008. – С. 14–15.

6. *Применение геофизических методов при детальном изучении скарновых железорудных месторождений Северного Урала* / В.Н. Глазнев, И.В. Притыка, В.И. Жаворонкин, Р.А. Терентьев, Д.П. Севастьянов, П.П. Горских // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2010. – № 2. – С. 238–248.

7. *Окунев А.Е.* Перспективы поисков месторождений золото-сульфидной формации в Аллах-Юньской минералогической зоне / А.Е. Окунев, А.П. Кропачев // Вестн. Госкомгеологии. – 2006. – № 1(8). – С. 19–24.

8. *Окунев А.Е.* О перспективах открытия крупных золоторудных месторождений орогенного типа в терригенных отложениях Южного Верхоянья / А.Е. Окунев, В.Ю. Фридовский // Руды и металлы. – 2012. – № 5. – С. 22–29.

9. *Фридовский В.Ю.* Условия локализации золотого оруденения Маринского рудного поля (Южное Верхоянье) / В.Ю. Фридовский, Л.И. Полуфунтикова // Отечественная геология. – 2011. – № 6. – С. 13–20.

10. *Goryachev N.A.* Gold deposit and gold metallogeny of Far East Russia. *Ore Geology Reviews* / N.A. Goryachev, F. Pirajno. – 2014. – Vol. 59. – P. 123–151.

11. *Соловьев Е.Э.* Геофизические поля и глубинное строение Южного Верхоянья / Е.Э. Со-

ловьев, В.Ю. Фридовский, Т.Д. Адаров // Отечественная геология. – 2011. – № 6. – С. 82–86.

12. *Горячев Н.А.* Золоторудообразующие системы орогенных поясов // Вестн. Сев.-Вост. науч. центра ДВО РАН. – 2006. – № 1. – С. 2–16.

13. *Петров А.В.* Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / А.В. Петров, Д.Б. Юдин, Сюели Хоу // Вестн. Камчат. регион. ассоциации. Сер. Науки о Земле. – 2010. – № 16. – С. 126–132.

14. *Адаров Т.Д.* Геофизические исследования рудоконтролирующих структур Южного Верхоянья / Т.Д. Адаров, Е.Э. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 12. – С. 33–35.

15. *Окунев А.Е.* Новые проявления золото-кварц-сульфидной формации Аллах-Юньской металлогической зоны / А.Е. Окунев, В.П. Данилов // Вестн. Сев.-Вост. федер. ун-та им. М.К. Аммосова. – 2010. – Т. 7, № 1. – С. 41–46.

16. *Кожевников Н.О.* Оценка возможностей метода переходных процессов при изучении верхней части геологического разреза / Н.О. Кожевников, А.Е. Плотноков // Геофизика. – 2004. – № 6. – С. 33–38.

17. *Геоэлектрический разрез в районе подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Западная Якутия) по данным метода переходных процессов* / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов, С.Ю. Артамонова, А.Е. Плотноков // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 2. – С. 237–249.

Поступила в редакцию 15.04.2016

УДК 51:550.34.013.4

Исследование распределения тяжелых фракций в колеблющейся сыпучей среде

А.И. Матвеев*, Л.В. Никифорова**, Е.С. Слепцова*, Б. В. Яковлев**

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск

**Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Одним из эффективных методов сепарирования тяжелых зерен в сыпучей среде, например золотых зерен, является гравитационная отсадка. В известных работах по моделированию процесса отсадки используется теория броуновской частицы, где решается уравнение типа Фоккера-Планка. В

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич – академик АН РС(Я), д.т.н., зав. лаб., e-mail: andrei.mati@yandex.ru; НИКИФОРОВА Людмила Владимировна – ст. преподаватель, e-mail: nliudmilav@mail.ru; СЛЕПЦОВА Екатерина Семеновна – н.с., e-mail: slept@mail.ru; ЯКОВЛЕВ Борис Васильевич – д.т.н., e-mail: b-yakovlev@mail.ru.

них фактически не учитывается взаимодействие частиц полезной фракции между собой. Данная работа посвящена определению параметров, учитывающих взаимодействие этих частиц. Параметры, полученные математическим моделированием процесса, определены экспериментальным путем. В качестве исследуемого материала берется магнетик, содержащийся в природном песке. Этот материал (тяжелая фракция) имеет большую плотность, чем песок (приблизительно в 1,2 раза). Тяжелая фракция разделяется из песка с помощью постоянного магнита. В результате исследований получены теоретические распределения концентрации магнетика по высоте объема устройства адаптированные с экспериментальными данными. Исследования проведены при различных условиях: сухая смесь, жидкая смесь, различные режимы работы вибратора.

Полученные распределения позволяют при определенных заданных начальных условиях (например, при определенном процентном соотношении тяжелой фракции от общего объема песка) вычислить вероятное время, за которое образуется некоторый заданный слой материала на дне емкости отсадочной постели с определенной концентрацией полезной фракции. Результаты исследования показали, что градиентная сила со временем увеличивается, а сила сопротивления среды, наоборот, убывает, если в начальный момент времени вся полезная (тяжелая) фракция находилась на верхней части массы песка.

Ключевые слова: полезная фракция, распределение, уравнение Фоккера-Планка, обогащение, отсадка, стохастический процесс.

Study of Heavy Fractions Distribution in Fluctuating Loose Environment

A.I. Matveev*, L.V. Nikiforova**, E.S. Sleptsova*, B.V. Yakovlev**

*Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk

**M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

One of the effective methods of separation of heavy grains in the loose environment, for example, of gold grains, is jiggling. In the known works on modeling of process of jiggling the theory of a Brownian particle is used where the equation like Fokker-Planck's one is solved. Most of the works do not consider interaction of particles of a useful fraction among themselves. This work is devoted to determination of parameters accounting the interaction of these particles. These parameters received by mathematical modeling of the process are determined experimentally. We considered a magnetic in natural sand. This material (heavy fraction) has bigger density than sand (about 1.2 times). The heavy fraction was separated from sand by a permanent magnet. As a result of the study theoretical distributions of the magnetic concentration along the device height adapted with the experimental data are received. The study was conducted under various conditions: dry mix, liquid mix, various operating modes of a vibrator.

The received distributions allow under certain initial conditions (for example, at a certain percentage of heavy fraction from the total amount of sand) to calculate probable time for which some preset material layer at the bottom of a jiggling machine with a certain concentration of useful fraction is formed. The results of the study have shown that gradient force increases over the time, and environment resistance force on the contrary decreases if at initial time all useful (heavy) fraction was in the top part of sand mass.

Key words: useful fraction, distribution, Fokker-Planck equation, enrichment, jiggling, stochastic process.

Введение

Одним из эффективных методов сепарирования тяжелых зерен в сыпучей среде, например золотых зерен, является гравитационная отсадка [1]. Метод обогащения полезных ископаемых, основанный на расслоении зернистых фракций породы по плотности, крупности и т. п., под воздействием вибрирующей среды, в гравитационном поле земли используется достаточно широко [2, 3]. В Институте горного дела Севера СО РАН разрабатываются отсадочные машины с использованием внешнего переменного магнитного поля [4]. Для конструирования и усо-

вершенствования таких устройств необходимы математические модели, определяющие концентрации тяжелых фракций в объеме отсадочной машины при различных условиях. Известно несколько подходов описания процесса отсадки, но в последние годы стал популярным статистический подход, основанный на теории стохастических процессов [5, 6]. В работе [7] предложена математическая модель процесса отсадки, в которой получено уравнение Фоккера-Планка и используется теория броуновской частицы. Согласно модели распределение частиц полезной фракции зависит от параметров среды,

а именно от частоты и амплитуды вибрирующей среды. В математической модели не учитывается взаимодействие частиц полезной фракции между собой. Параметры, учитывающие взаимодействие, должны входить в математическую модель как зависящий от времени коэффициент пропорциональности сопротивления среды. Целью настоящей работы является определение этих параметров методами натурального эксперимента. Для достижения данной цели был разработан экспериментальный стенд, содержащий вибрирующую с определенной частотой и амплитудой емкость с сухим песком (среда) и зернышками магнетика (с размерами песчинок).

Материалы и методы исследования

Исследования проводились методами математического моделирования и натурального эксперимента.

В математической модели [7] было получено аналитическое выражение для распределения вероятностей в зависимости от высоты:

$$n(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \left(\exp\left(-\frac{(x-h)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(x+h)^2}{4Dt}\right) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(mg)^2 t}{4k\alpha} - \frac{mg(x-h)}{2k}\right) + \frac{mg}{k} \exp\left(-\frac{mgx}{k}\right) \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \int_{-\infty}^{\frac{mgt}{\alpha} - x - h} \exp\left(-\frac{\eta^2}{4Dt}\right) d\eta \quad (1)$$

Для данной задачи в начальный момент времени более тяжелые частицы в объеме отсадочной постели находятся сверху, т.е. образуют некоторый слой. При моделировании этого распределения можно воспользоваться решением задачи для одной частицы (или одного слоя). Распределение невзаимодействующих частиц приблизительно будет иметь вид, изображенный на рис. 1.

Таким образом, эволюцию функции распределения можно найти рассматривая суперпозицию функций (1).

$$n(t, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t, x) \quad (2)$$

Полученные распределения позволяют при заданных значениях добываемых фракций (например, в процентах от общего объема) с неравномерным начальным распределением вычислить вероятное время, за которое образуется некоторый заданный слой материала на дне

емкости отсадочной постели с определенной концентрацией полезной фракции.

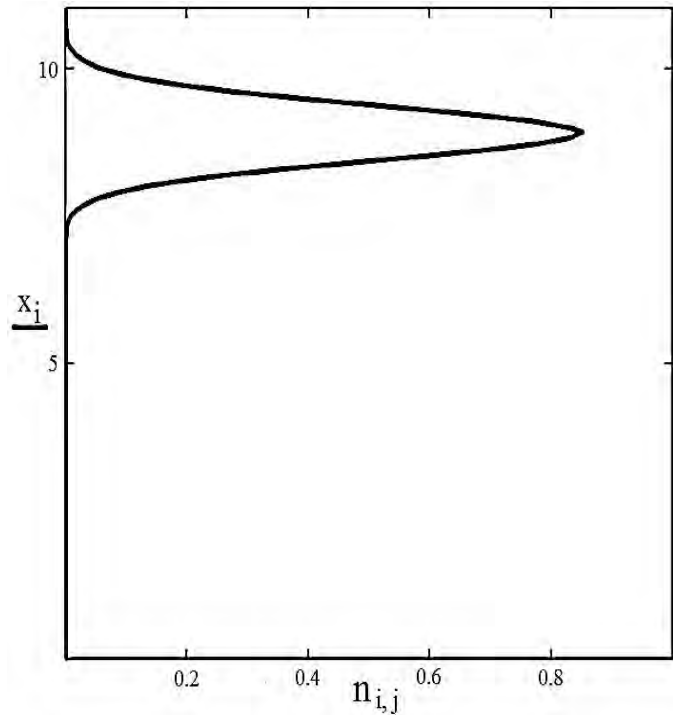


Рис. 1 Распределение концентрации $n(x)$ фракции тяжелых частиц в начальный момент времени в зависимости от высоты x

В данной задаче зерна тяжелой фракции должны взаимодействовать между собой в начальные моменты времени, пока частицы в этом слое находятся в более стесненных условиях. С течением времени происходит расхождение частиц тяжелой фракции, и процесс стремится к модели невзаимодействующих между собой частиц полезной фракции [7]. При этом взаимодействие частиц между собой должно зависеть от окружения, то есть от градиентной силы:

$$F_{gr} = -\frac{k(t)}{n(t, \vec{r})} \nabla n(t, \vec{r}) \quad (3)$$

Сопротивление среды также должно иметь временную зависимость при диффузировании.

В выше указанной модели параметром, учитывающим окружение, является коэффициент k в формуле градиентной силы, а параметром, учитывающим сопротивление среды – α . В процессе отсадки эти параметры должны зависеть от времени.

$$\alpha(t) = \frac{m\omega_0}{2\pi} + 6\pi\eta r_0$$

Поэтому формулу (1) переписываем в виде

$$n(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t)t}} \left(\exp\left(-\frac{(x-h)^2}{4D(t)t}\right) + \exp\left(-\frac{(x+h)^2}{4D(t)t}\right) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(mg)^2 t}{4k(t)\alpha(t)} - \frac{mg(x-h)}{2k(t)}\right) + \frac{mg}{k(t)} \exp\left(-\frac{mgx}{k(t)}\right) \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t)t}} \int_{-\infty}^{\frac{mgt}{\alpha(t)} - x - h} \exp\left(-\frac{\eta^2}{4D(t)t}\right) d\eta, \quad (4)$$

где $D(t) = \frac{k(t)}{\alpha(t)}$.

Зависимости $k(t)$ и $\alpha(t)$ определяются из эксперимента.

В эксперименте в качестве исследуемого материала берется магнетик, содержащийся в природном песке. Обычно процентное составляющее данного материала равно примерно 2,5%. Этот материал называем – тяжелой фракцией, так как она приблизительно в 1,2 раза имеет большую плотность, чем песок. Тяжелая фракция разделяется из песка с помощью постоянного магнита. Чистый песок без магнетика помещается в емкости устройства, на верхней свободной поверхности песка размещается тонким слоем состав из магнетика. При вибрации емкости тяжелая фракция под действием гравитационного поля земли диффундирует в нижнюю часть рабочей емкости устройства. За достаточно большой промежуток времени состав тяжелой фракции почти полностью окажется на дне емкости, согласно теории в этом случае концентрация тяжелой фракции будет стремиться к распределению Больцмана. Промежуточные распределения определяются из математической модели [7]. На рисунке 2 представлена схема эксперимента.

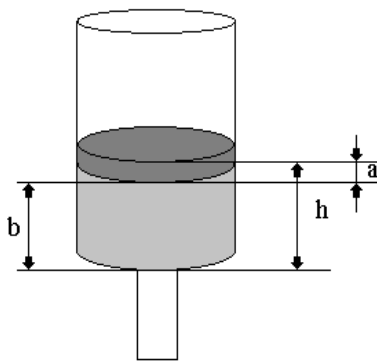


Рис. 2. Схема эксперимента: а – толщина слоя тяжелой фракции, b – толщина чистого песка

Емкость приводится в колебательное движение с помощью реноватора (при горизонтальных колебаниях) или перфоратора (при вертикальных колебаниях) с определенной частотой. Рассматривались две фракции с различной плотностью $\rho_0 = 1,5$ г/мл, $\rho_0 = 1,8$ г/мл. В начальный момент времени более тяжелая фракция в количестве 20 мл находится в верхней части емкости цилиндрической формы с песком (120 мл). Емкость приводится в вертикальное колебательное движение с помощью перфоратора с частотой $\omega_0 = 2\pi \cdot 150$, амплитудой 2 мм. Через определенный промежуток времени частицы более тяжелой фракции диффундируют вниз. За равные промежутки времени проводится измерение распределения тяжелых частиц (рис. 3). При этом разделение частиц каждый раз проводится с помощью постоянного магнита (рис. 4). Таким образом, получены концентрации магнетика по высоте объема устройства. Измерения проведены при различных условиях: сухая смесь, жидкая смесь, различные режимы работы вибратора.



Рис. 3. Экспериментальная установка



Рис. 4. Разделение фракций

Результаты исследования

Полученные распределения позволяют при заданных значениях тяжелых фракций (например, в процентах от общего объема) с неравномерным начальным распределением вычислить вероятное время, за которое образуется некоторый заданный слой материала на дне емкости отсадочной постели с определенной концентрацией полезной фракции.

В табл. 1 показаны результаты эксперимента для сухой среды при частоте колебаний среды 150 Гц. В первом столбце высота слоев, 2–8 столбцах количества тяжелой фракции за 2–8 сек., соответственно.

Таблица 1

мл\сек	2	3	4	5	6	7	8
140–120	16,8	10,3	8,1	4,5	0	0	0
120–100	6,5	7,1	5,1	5,55	10	9	5,565
100–80	4,5	5,7	6,2	8	5,55	4,8	3,62
80–60	2,3	3,5	4,1	4,27	4,2	5	10,8
60–40	1,3	2,3	2,8	2	7,7	6,7	5,5
40–20	0,7	1,5	1,4	1,7	1,3	2,6	4,1
20–0	0,5	1,2	1,8	2,2	1,20	1,9	3,75

На рис. 5 представлены экспериментальные и теоретические графики этих зависимостей.

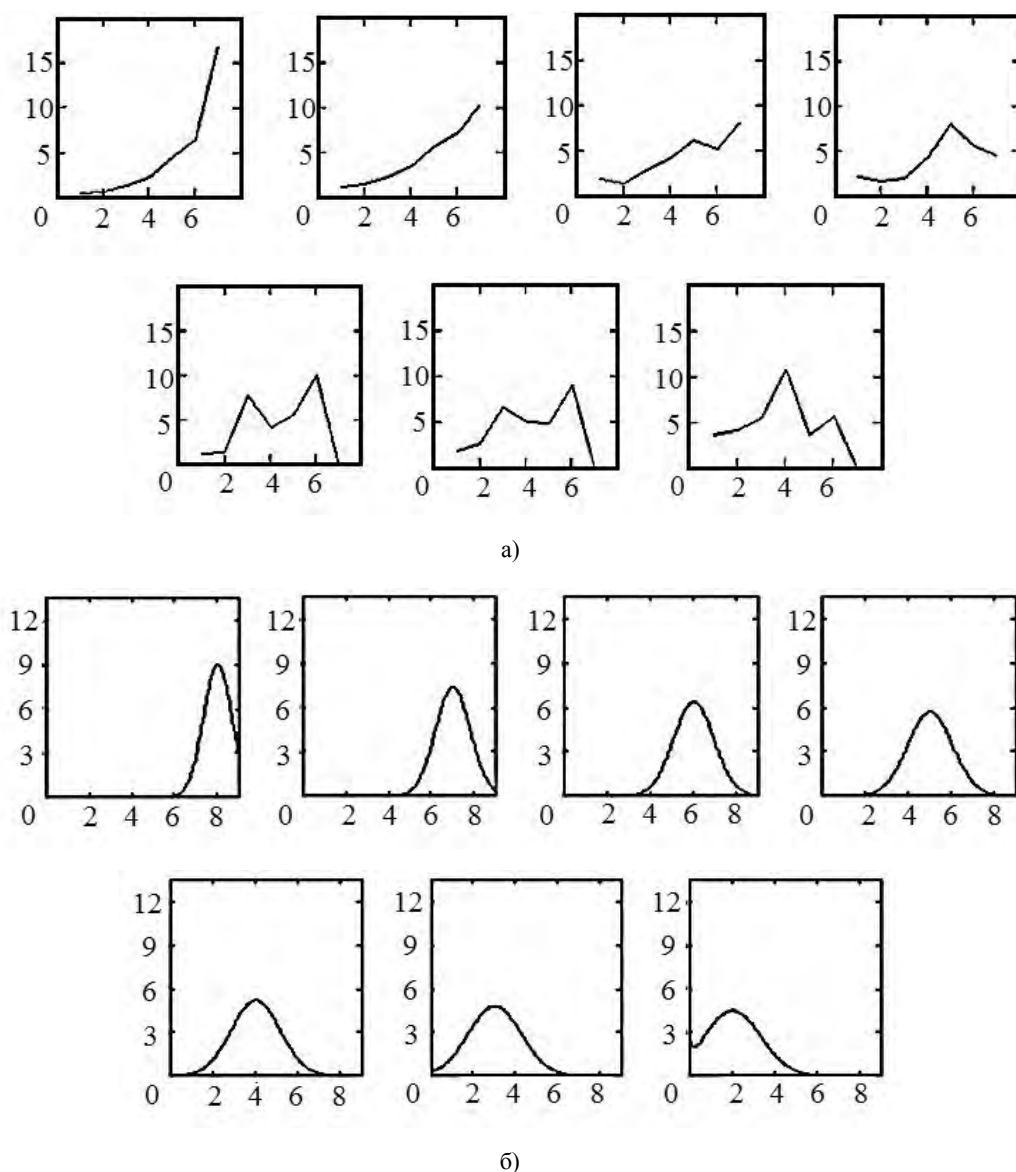


Рис. 5: а – данные эксперимента по распределению тяжелых частиц – по высоте (по горизонтали высота в см., по вертикали – количество частиц); б – теоретические результаты для распределения частиц по высоте емкости

Из результатов эксперимента определены зависимости $k(t)$ и $\alpha(t)$. (рис. 6.)

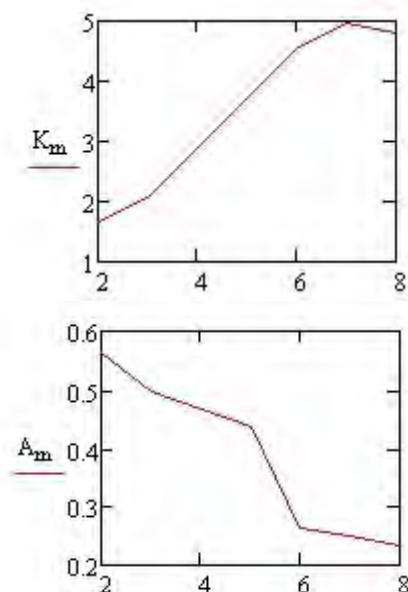


Рис 6. Графики зависимости $k(t)$ и $\alpha(t)$

Заключение

Из графиков видно, что градиентная сила со временем увеличивается, а сила сопротивления среды наоборот убывает. Это можно объяснить следующим образом: в начальный момент времени, когда частицы полезной фракции (более тяжелые) находятся в более стесненных условиях, градиентная сила имеет меньшее значение, чем в окружении легких частиц. С течением времени происходит рассеяние частиц тяжелой фракции в среде легких частиц. В этом случае должна увеличиваться подвижность частиц полезной фракции, и соответственно, увеличи-

ваться градиентная сила. Уменьшение силы сопротивления также связано с окружением, с уменьшением массы частиц окружающей среды должна уменьшаться и сила сопротивления среды.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей модернизации разработанной математической модели процесса отсадки.

Литература

1. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
2. Блехман И.И. О теории разделения сыпучих смесей под действием колебаний / И.И. Блехман, В.Я. Хайнман // Механика твердого тела. – 1968. – № 6. – С. 5–13.
3. Рафалес-Ламарка Э.Э. Применение методов теории вероятностных процессов при исследовании расслоения постели отсадочных машин // Тр. Укр. НИИ углеобогащения. – М., 1964. – Т. 3. – С. 50–68.
4. Слепцова Е.С. Извлечение золота из магнитных шлихов отсадкой в поле действия полюсопеременного магнитного поля / Е.С. Слепцова, С.М. Федосеев // Горн. информ. – аналит. бюл. – 2015. – № 7. – С. 260–264.
5. Mayer F.W. Fundamentals of a potential theory of the jigging process. VII Int. Min. Proc. Congr. – New-York, 1964. – P. 78–86.
6. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 295 с.
7. Математическое моделирование процесса отсадки / Л.В. Никифорова, А.И. Матвеев, Е.С. Слепцова, Б.В. Яковлев // Мат. заметки СВФУ. – 2014. – Т. 21, № 1. – С. 106–112.

Поступила в редакцию 20.05.2016

УДК 622.271

Модернизация горного оборудования непрерывного действия для открытой разработки месторождений

А.Ю. Чебан, Н.П. Хрунина

Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск

Рассматривается проблема повышения эффективности открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых, предложена усовершенствованная конструкция рабочего органа ка-

ЧЕБАН Антон Юрьевич – к.т.н., с.н.с., доцент, chebanay@mail.ru; ХРУНИНА Наталья Петровна, к.т.н., с.н.с., nretx@mail.ru.