

УДК 550.3

## ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ УПОРНЫХ РУД

<sup>1</sup>Портнов В.С., <sup>2</sup>Юров В.М., <sup>1</sup>Турсунбаева А.К., <sup>1</sup>Камаров Р.К.,  
<sup>1</sup>Мехтиев А.Д., <sup>1</sup>Орынгожина С.Е., <sup>1</sup>Мехтиев А.Д.

<sup>1</sup>Карагандинский государственный технический университет, Караганда;  
<sup>2</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда

В работе рассматриваются вопросы влияния размера частиц руды на эффективность ее дробления. Показано, что критический радиус частиц руды, при котором эффективность извлечения полезного компонента обращается в ноль, определяется поверхностным натяжением или поверхностной энергией минерала. Получена формула для определения оптимального размера частиц при дроблении упорных руд. Определена зависимость оптимального размера частиц минерала от температуры – чем меньше температура, тем больше размер зерна минерала и тем меньше трудозатрат на его измельчение. Проведено сравнение с экспериментом, которое показало неплохое совпадение теоретических и экспериментальных данных. Показано, что для облегчения процесса дробления руды необходимо уменьшать ее поверхностное натяжение. Это достигается путем воздействия на руду внешних полей – электромагнитных, тепловых и т.д. или путем использования поверхностно-активных веществ

**Ключевые слова:** дробление, руда, поверхностное натяжение

## QUESTIONS OF OPTIMISATION OF PROCESS OF CRUSHING OF PERSISTENT ORES

<sup>1</sup>Portnov V.S., <sup>2</sup>Yurov V.M., <sup>1</sup>Tursunbaeva A.K., <sup>1</sup>Kamarov R.K.,  
<sup>1</sup>Mekhtiev A.D., <sup>1</sup>Oryngozhina S.E., <sup>1</sup>Mekhtiev A.D.

<sup>1</sup>Karaganda state technical university, Karaganda;  
<sup>2</sup>Karaganda state university of E.A. Buketov, Karaganda

In work questions of influence of the size of particles of ore on efficiency of its crushing are considered. It is shown, that critical radius of particles of ore at which efficiency of extraction of a useful component addresses in a zero, it is defined by a superficial tension or superficial energy of a mineral. The formula for definition of the optimum size of particles is received at crushing of persistent ores. Dependence of the optimum size of particles of a mineral on temperature – the less temperature is defined, the it is more size of grain of a mineral and the less expenditures of labour on its crushing. Comparison with experiment which has shown quite good coincidence theoretical and experimental data is spent. It is shown, that for simplification of process of crushing of ore it is necessary to reduce its superficial tension. It is reached by influence on ore of external fields – electromagnetic, thermal etc. or by use of surface-active substances.

**Keywords:** crushing, ore, superficial tension

Дробление руды представляет собой процесс разрушения материала. Несмотря на давнюю историю исследования процесса разрушения, мы еще далеки от понимания физической картины этого явления в целом. Это обусловлено, прежде всего, чрезвычайной сложностью проблемы прочности материалов. Не говоря уже о номенклатуре проявления этой сложности – интерпретация явления разрушения требует привлечения специалистов по физике, химии, механике, инженеров – конструкторов. В реальных условиях процесс разрушения представляется весьма многоликим. Во многом это связано с многообразием элементарных актов разрушения, при интерпретации которых до последнего времени преобладали модельные представления, основанные на простых геометрических образах, представленных Гриффитсом, Стромом и др. Сейчас, однако, становится ясным, что физика разрушения нуждается в дальнейшем развитии основополагающих идей.

В настоящее время предприняты попытки использования нелинейных методов для развития концепции разорванных связей,

разрабатываются модели элементарных носителей разрушения, на макроскопическом уровне описания внедряются методы подобия и синергетический подход [1].

Самым энергоемким и дорогостоящим процессом при добыче и обогащении минерального сырья является их разрушение. Так, например, на железорудных ГОКах России на долю этого процесса приходится 70% всех энергозатрат (30 кВт-ч/т руды) [2]. Из всех технологических процессов разрушения, а это бурение, взрывание, дробление и измельчение, наиболее энергозатратным является измельчение (26 кВт-ч/т руды) [2]. В горной промышленности США на долю дробления и измельчения приходится 29,3 млрд. кВт-ч в год [3], что составляет 45% от всей потребляемой горной промышленностью США электроэнергией.

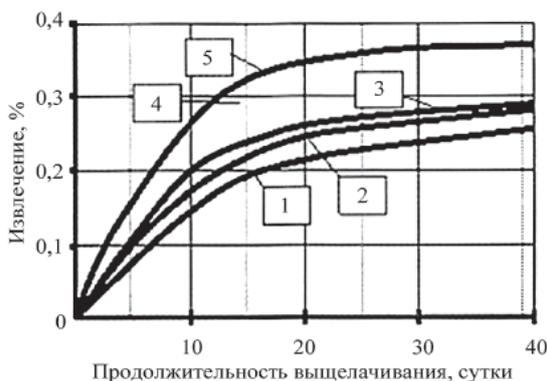
### Влияние гранулометрического состава руды на выход золота в процессе кучного выщелачивания

В литературе приведено значительное количество данных, показывающих влия-

ние гранулометрического состава руды на выход золота в процессе кучного выщелачивания [4]. На рис. 1 показана типичная зависимость извлечения золота от продолжительности процесса при различной крупности рудной массы. Полученные результаты извлечения золота из горной массы различного грансостава обусловили необходимость в проведении оценки рациональной степени дробления руды в зависимости от содержания золота в ней. Такой подход объясняется тем, что наступает момент, когда увеличение выхода золота не компенсирует затрат на дополнительное измельчение руды.

Анализ взаимосвязи рациональной степени дробления от содержания золота в руде (рисунок) показывает, что для интервала содержания (0,53–0,80 г/т) область целесообразной степени дробления сужается до класса от –10 до –5 мм. Оптимальная степень дробления должна быть определена в процессе проведения опытных работ и технико-экономических исследований.

Здесь мы воспользуемся термодинамическим подходом, развитым нами в работах [5–6], к анализу влияния гранулометрического состава руды на извлечение золота.



Зависимости извлечений золота от продолжительности выщелачивания при крупности рудной массы [4]:  
1 – 200 мм; 2 – 100 мм; 3 – 50 мм;  
4 – 20 мм; 5 – 10 мм

Если в качестве функции отклика  $\Phi$  системы мы возьмем эффективность извлечения золота из руды  $\eta$  (в граммах, в процентах и т.д.), то на основе модифицированных нами формул [5–6], мы получим следующее выражение:

$$\eta = \frac{C}{G^0}, \quad (1)$$

где  $C = \text{const}$ ;  $G^0$  – свободная энергия Гиббса руды.

Изменение радиуса зерна минерала руды приводит к изменению давления  $P$  на

межфазной границе, описываемое уравнением Кельвина:

$$\frac{P}{P_0} = \exp\left(\frac{2\alpha\vartheta}{rRT}\right), \quad (2)$$

где  $r$  – радиус зерна;  $\alpha$  – межфазное поверхностное натяжение;  $\vartheta$  – молярный объем зерна;  $P_0$  – давление над плоской поверхностью;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Поскольку

$$G^0 = U - TS + \vartheta P, \quad (3)$$

то (1), с учетом (2) и (3), примет вид:

$$\eta = \frac{C}{\vartheta P_0} \cdot \exp\left(-\frac{2\alpha\vartheta}{rRT}\right). \quad (4)$$

Обозначая  $D = C/\vartheta P_0$  и разлагая (4) в ряд ограничиваясь первыми двумя членами, получим:

$$\eta = D \left(1 - \frac{R_0}{r}\right), \quad (5)$$

где «критический радиус»  $R_0$  равен:

$$R_0 = \frac{2\alpha\vartheta}{RT}. \quad (6)$$

Уравнение (5) можно переписать следующим образом:

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{R_0}{r}\right) \quad (7)$$

Здесь  $\eta_0$  – предельное значение «извлекаемости» золота.

Таким образом, мы получили уравнение (7), описывающее зависимость эффективности извлечения золота от размера зерна минерала  $r$ .

Из формулы (7) следует, что эффективность извлечения золота будет резко падать в случае, когда выполняется равенство:

$$r = R_0 = \frac{2\alpha\vartheta}{RT}. \quad (8)$$

Таким образом, «критический» радиус  $R_0$ , при котором эффективность извлечения золота обращается в ноль, определяется поверхностным натяжением  $\alpha$  или поверхностной энергией  $\omega$  минерала. В случае жидкостей эти две величины совпадают. В случае твердых тел – нет, и связь между ними дается уравнением Шаттльворта и Херинга:

$$\alpha = \omega + \Omega \left(\frac{\partial \omega}{\partial \Omega}\right)_T, \quad (9)$$

где  $\Omega$  – площадь поверхности зерна минерала;  $\omega$  – его поверхностная энергия.

Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел (в том числе и минералов) затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности

свободно перемещаться. Исключение составляет пластическое течение металлов при температурах, близких к точке плавления [7].

Однако недавно нами предложены методы определения поверхностного натяжения твердых тел [8–10], идеологией которых мы воспользуемся в настоящей работе.

Если воспользоваться аналогией скалярных полей, то мы получаем для температуры плавления малых частиц уравнение, аналогичное (7):

$$T_{пл} = T_0 \left( 1 - \frac{R_0}{r} \right), \quad (10)$$

где  $T_0$  – температура плавления массивного образца, а  $R_0$  определяется выражением (8).

Используя экспериментальные результаты из работы [11], можно по формуле (10) определить поверхностное натяжение малых частиц золота, и оно оказалось равным  $\alpha = 366$  эрг/см<sup>2</sup>. Зная молярный объем золота  $v = 10,2$  см<sup>3</sup>/моль, нетрудно вычислить оптимальное значение  $R_0 = 5,1$  мм при заданной температуре  $T$  (например,  $T = 300$  К) процесса выщелачивания в том случае, если речь идет о чистом золоте. Полученное значение  $R_0$  очень близко к экспериментальному (см. рисунок).

#### Дезинтеграция упорных руд

В случае окисленных или сульфидных руд качественный анализ эффективности извлечения золота, можно проводить на основе соотношения (1). Действительно, из соотношения (1) следует, что чем больше по абсолютной величине энергия Гиббса, тем меньше эффективность извлечения золота.

Отметим также, что из формулы (8) вытекает зависимость оптимального размера частиц минерала от температуры – чем меньше температура, тем больше размер зерна минерала и тем меньше трудозатрат на его измельчение.

Эмпирически этот эффект был обнаружен во многих работах и послужил основой криогенного (при низких температурах) выщелачивания золота из крепких золотосодержащих руд [12].

В основе этого метода лежит увеличение трещинной пустотности руды за счет использования криодезинтеграции (циклического промерзания-оттаивания руды). Его применение обеспечивает создание дефектов и микротрещин на поверхности и в объеме руды за счет расклинивающего действия льда, что повышает кинетику растворения золота при кучном выщелачивании руд. Интенсивность воздействия естественными энергетическими импульсами (крио-

дезинтеграцией) на изменение коэффициента крепости и открытую пористость руды зависит от петрографического состава, площади свободной поверхности, условий криодезинтеграции и т. д.

Уменьшить поверхностное натяжение минерала и, тем самым, увеличить эффективность дробления руды, ( $G^0 = \alpha S$ ,  $\eta \sim 1/\alpha$ ) можно за счет увеличения дефектности его поверхности, например, воздействуя мощными электромагнитными импульсами, потоками электронов и др.

В число наиболее перспективных технических решений по использованию искусственных энергетических воздействий на руды входят методы: СВЧ-нагрева, действия энергией ускоренных электронов и электрохимические методы [13]. Однако по своей природе эти высокотехнологичные методы энергоемки и малопроизводительны. Поэтому их использование до сих пор ограничивается применением при рудоподготовительных операциях на обогатительных фабриках.

#### Заключение

Из приведенных выше результатов следует, что работа по измельчению минерала пропорциональна его поверхностному натяжению  $\alpha$ . Максимальная работа разрушения (и, следовательно, наибольшее изменение удельной поверхностной энергии) отмечается при диспергировании в вакууме, в среде инертного газа или несмачивающей жидкости. Минимальная работа разрушения (и, соответственно, минимальная удельная поверхностная энергия) отмечалась при диспергировании в жидких средах, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Таким образом, чтобы оптимизировать процесс дробления или измельчения упорных руд, необходимо знать их поверхностное натяжение.

Методика определения поверхностного натяжения твердых тел описана нами в работах [8–10].

#### Список литературы

1. Олемской А.И., Кацнельсон А.А. Синергетика конденсированной среды. – М.: УРСС, 2003. – 336 с.
2. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горный журнал. – 2005. – №12. – С. 13–19.
3. Hague K.E, Microwave energy of mineral treatment processes – a brief review // Int. J. Miner. Process, 1999, №57. – P. 146–154.
4. Кучное выщелачивание золота: зарубежный опыт и перспективы развития: Справочник / под. ред. В.В. Караганова Б.С. Ужкенова; Межправительств. совет стран СНГ по разведке, использованию и охране недр. – М. – Алматы, 2002. – 260 с.

5. Портнов В.С. Термодинамический подход к задачам геофизического опробования железорудных месторождений. – Караганда, 2003. – 178 с.
6. Яворский В.В., Юров В.М. Прикладные задачи термодинамического анализа неравновесных систем. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 336 с.
7. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. – М.: Наука, 1976. – 256 с.
8. Юров В.М. и др. Способ измерения поверхностного натяжения твердых тел: патент РК №57691, Оpubл. 15.12.2008, Бюл. №12.
9. Юров В.М. и др. Способ измерения поверхностного натяжения и плотности поверхностных состояний диэлектриков: патент РК №58155, Оpubл. 15.12.2008, Бюл. №12.
10. Юров В.М. и др. Способ измерения поверхностного натяжения магнитных материалов: патент РК №58158, Оpubл. 15.12.2008, Бюл. №12.
11. Buffat Ph., Borel J.-P. Size effect on the melting temperature of gold particles // *Phys. Rev. A.* – 1976. – Vol. 13. – P. 2287–2298.
12. Черный К.Н. Кучное выщелачивание золота в круглогодичном режиме // *Горный журнал.* – 2006. – №1. С. 19–20.
13. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д. Нетрадиционные методы дезинтеграции и вскрытия упорных золотосодержащих продуктов: теория и технологические результаты // *Горный журнал.* – 2005. – №4. – С. 68–74.
- V.V. Karaganov's edition; intergovernmental council of the SNG countries about investigation to use and protection of bowels. M. Almaty, 2002. 260 p.
5. Portnov V. S. The thermodynamic approach to problems of geophysical approbation of deposits of iron ores. – Karaganda: KGTU, 2003. 212 p.
6. Yavorsky V.V., Jurov V.M. Applied problems of the thermodynamic analysis of nonequilibrium systems. M: Energoatomizdat, 2008. 338 p.
7. Hohstein A.J. A superficial a tension of firm bodies and adsorption. M.: Nauka, 1976. 256 p.
8. Jurov V. M. etc. The way of measurement of a superficial tension of firm bodies. Patent №57691, Astana, 2009.
9. Jurov V. M. etc. The way of measurement of a superficial tension and density of superficial conditions of isolators. Patent №58155, Astana, 2009.
10. Jurov V. M. etc. The way of measurement of a superficial tension of magnetic materials. Patent №58158, Astana, 2009.
11. Buffat Ph., Borel J.-P. Size effect on the melting temperature of gold particles. – *Phys. Rev. A.* 1976, Vol. 13. pp. 2287–2298.
12. Black K.N. Compact of leaching gold in an all-the-year-round mode. *Mountain magazine*, 2006, no. 1. pp. 19–20
13. Chanturija V.A, Bunin I.Z., Lunin V. D. Nonconventional methods of decomposition and opening of the persistent products containing gold: the theory and technological results. – *Mountain magazine*, 2005, no. 4. pp. 68–74.

### References

1. Olemskoj A.I., Kaznelson A.A. Synergetics of the condensed environment. M: URSS, 2003. 336 p.
2. Chanturija V. A. Modern problems of enrichment of mineral raw materials in Russia. – *Mountain magazine*, 2005, no. 12. pp. 13–19.
3. Hague K.E. Microwave energy of mineral treatment processes – a brief review. – *Int. J. Miner. Process*, 1999, no. 57. pp. 146–154.
4. Compact of leaching gold: foreign experience and development prospects: the Directory / under B.S. Uzhkenov's,

### Рецензенты:

Ходжаев Р.Р., д.т.н., профессор, директор «Научно-инженерного центра «ГЕОМАРК», г. Караганда;

Емелин П.В., д.т.н., профессор, начальник отдела предупреждения ЧС и управления рисками КазНИИ по безопасности работ в горной промышленности, г. Караганда.

Работа поступила в редакцию 09.02.2012.