

*В. П. МАЛЫШЕВ, А. М. МАКАШЕВА\**

*Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, Караганда, astra\_mun@mail.ru*

## ОБ АКТИВАЦИОННОМ ФАКТОРЕ В ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Ранее разработанная авторами вероятностная модель измельчения материалов в барабанных мельницах, работающих в водопадном режиме, позволила объяснить практически все особенности измельчения материалов. Согласно новой модели подобное распределение является следствием противодействия стерического и активационного факторов и формируется без допущения о независимости скорости процесса от размера частиц, а также от исходного фракционного состава и воздействия других учитываемых параметров. Этим подчеркивается особое значение активационного фактора измельчения. Энергия активации измельчения оценена не по теплоте плавления какого-либо компонента, а по температуре плавления всей руды. Дополнительно к выражению энергии удара через потенциальную энергию учтена и кинетическая энергия разгона смеси шаров и зерен в точке начала падения ее в водопадном режиме работы мельницы. Из полученных данных следует, что дополнительный учет кинетической энергии шара довольно заметно усиливает разрушаемость зерен. С другой стороны, использование выражения энергии активации разрушения через температуру плавления руды дает сопоставимые результаты с ранее принятым энергетическим барьером, равным теплоте плавления. Этим обосновывается возможность более доступной оценки энергии активации через температуру плавления материала. В целом же предпринятая попытка уточнения активационного фактора свидетельствует об адаптивности вероятностной модели измельчения и открытости ее для более глубокой разработки всех действующих факторов.

**Ключевые слова:** барабанная мельница, водопадный режим, энергия активации разрушения, кинетическая энергия шара, температура плавления

**Введение.** Вероятностная модель измельчения материалов в барабанных мельницах, работающих в водопадном режиме, была разработана на основе подобия с кинетикой молекулярных соударений, используемой для выражения скорости химических реакций, и затем обобщена в сугубо вероятностной форме последовательных элементарных событий через соответствующие им вероятности [1]:

$$V = Z P_{\text{конц}} P_{\text{ст}} P_a, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость взаимодействия,  $\text{с}^{-1}$ ;  $Z$  – частотный,  $\text{с}^{-1}$ ;  $P_{\text{конц}}$  – концентрационный;  $P_{\text{ст}}$  – стерический (пространственно-ориентационный);  $P_a$  – активационный факторы, доли единицы (д.е.).

С помощью этой теории удалось объяснить практически все особенности измельчения материалов, включая крутой спад фракционного состава в сторону тонких фракций по мере про-

хождения процесса, сопровождаемого строгим формированием их логарифмически нормального распределения, на которое впервые обратил внимание Н.К. Разумовский [2] и которому затем дал математическое обоснование академик А.Н. Колмогоров [3] с допущением независимости скорости процесса от размера частиц.

Согласно новой модели подобное распределение является следствием противодействия стерического и активационного факторов и формируется без допущения о независимости скорости процесса от размера частиц, а также от исходного фракционного состава и воздействия других учитываемых параметров, то есть имеет более общую основу, которая помимо вероятностного выражения скорости процесса (1) опирается еще и на закономерности последовательного разрушения и накопления зерен каждой фракции по подобию с кинетикой образования промежуточных продуктов в необратимых

последовательных реакциях [4, 5]. При этом константа скорости убывает каждой фракции после раскрытия каждого вероятностного фактора в (1) принимает вид

$$k_j = \frac{8[(d_j/d_m)^3 - (d_j/d_m)^2] \omega G_m G_j}{[1 + 2\omega \sqrt{2D/g} (G_m/\gamma_m + G_j/\gamma_j + G_s/\gamma_s)^2 \gamma_m \gamma_j] \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_m}{RT + 0,5MgD(\gamma_m/\gamma_j)(d_m/d_j)^3}\right)} \quad (2)$$

где  $d_m$ ,  $G_m$ ,  $\gamma_m$  – диаметр (м), общая масса (кг) и плотность (кг/м<sup>3</sup>) шаровой нагрузки;  $d_j$ ,  $G_j$ ,  $\gamma_j$  – средний диаметр  $j$ -ой фракции (м), общая масса (кг) и плотность (кг/м<sup>3</sup>) зерновой (рудной) нагрузки;  $G_s$ ,  $\gamma_s$  – общая масса (кг) и плотность (кг/м<sup>3</sup>) жидкости (воды);  $\omega$  – частота вращения мельницы, с<sup>-1</sup>;  $D$  – внутренний (свободный) диаметр мельницы, м;  $\Delta H_m$  – теплота плавления рудного материала, Дж/моль;  $M$  – молекулярная масса этого материала, кг/моль;  $T$  – температура материала, К;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Здесь воздействие активационного фактора выражается через экспоненту, которая до раскрытия ее составляющих имела вид

$$P_a = \exp\left[-\frac{E_a}{RT + E_{mec}}\right], \quad (3)$$

где  $E_a$  – энергия активации измельчения,  $RT$  – тепловая энергия материала,  $E_{mec}$  – механическая энергия удара шара в зерно. Для демонстрационных (модельных) расчетов были приняты некоторые приближения, а именно:

- энергия активации измельчения была оценена по теплоте плавления материала и в первом приближении отождествлена с теплотой плавления кварца – основного породобразующего и наиболее твердого компонента руды;
- механическая энергия удара принималась равной превращенной в нее потенциальной энергии шара  $mgh$  с оценкой средней высоты падения  $h \sim 0,5D$ ;
- при приведении механической энергии удара к размерности Дж/моль учитывалась молекулярная масса зернового материала как равная молекулярной массе кварца.

Эти приближения не помешали вскрыть все качественные особенности сложнейшего про-

цесса измельчения, но в некоторых случаях потребовалась коррекция вероятностной модели с помощью коэффициента адаптации константы скорости измельчения по практическим показателям через изменение содержания самой крупной фракции [6, 7]. Необходимость подобной коррекции может быть вызвана неточностью практической оценки какого-либо из 15 параметров вероятностной модели, но и сама модель открыта для своего уточнения при расшифровке каждого вероятностного фактора и в первую очередь – активационного.

**Экспериментальная часть.** Так, энергия активации измельчения может быть оценена не по теплоте плавления какого-либо компонента (например, кварца), а по теплоте плавления всей руды. Однако для этого потребуются проведение специального эксперимента. Задача упрощается, если энергию активации оценивать по дополнительной тепловой энергии, которой будет обладать материал, перейдя из состояния при данной температуре  $RT$  к состоянию в точке плавления  $RT_m$ :

$$E_a \approx RT_m - RT = R(T_m - T). \quad (4)$$

Эта формула была использована для оценки энергетических затрат на пластическую деформацию [8], с которой и начинается процесс разрушения кристаллов [9]. В этом случае достаточно знать температуру плавления материала, хорошо известную для различных руд и определяющую температуру рудотермических процессов [10].

Что касается оценки молекулярной массы измельчаемого материала, то она может быть определена как средневзвешенная величина по всем известным компонентам этого материала:

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i M_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i} \quad (5)$$

где  $\beta_i$  – содержание  $i$ -го компонента,  $M_i$  – его молекулярная масса.

Требует коррекции и связь высоты падения шара с внутренним диаметром мельницы. Более строгое обоснование можно дать с учетом известной степени заполнения (рабочего объема) мельницы. Согласно [11] она равна 30-50 % общего объема. Для расчета можно принять

среднюю величину, равную 40 %. Тогда для водопадного режима следует рассмотреть картину, когда этот объем в виде пустотелого цилиндра примыкает к внутренней поверхности барабана, и поскольку эта картина сохраняется в каждом поперечном сечении барабана, то ее можно свести к площади кольца, занимающего 40 % площади круга (рисунок 1). Внутренний диаметр кольца  $d$  может быть найден из следующих соотношений:

$$\frac{\pi D^2}{4} - 0,4 \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (6)$$

откуда

$$d = D\sqrt{0,6} \approx 0,775D \quad (7)$$

Геометрия водопадной части кольца подчиняется параболической траектории, но для расчета потенциальной энергии шара необходим только перепад высот между точками отрыва и удара, который по геометрическим соображениям может быть принят в среднем приближенно (рисунок 1) равным величине

$$h \approx \frac{D+d}{4} + d/2 = \frac{D+3d}{4} = \frac{D+3D\sqrt{0,6}}{4} = \frac{D\{1+3\sqrt{0,6}\}}{4} = 0,83D \quad (8)$$

Эта величина существенно (в 1,66 раза) превышает ранее принятое приближение  $h = 0,5D$ .

Эта же схема может быть использована для учета кинетической энергии шара в точке отрыва от внутренней поверхности барабана и сохраняющейся в виде горизонтальной составляющей векторов сил, скорости и энергии.

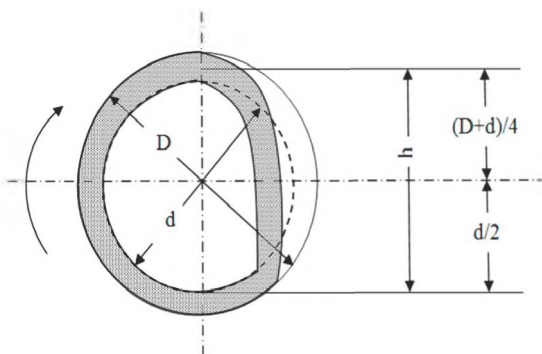


Рисунок 1 – Схема движения смеси шаров, руды и воды в водопадном режиме при степени заполнения (рабочем объеме) мельницы, равной 40 %

Эту составляющую можно оценить исходя из средней окружной скорости вращения смеси

по ее среднему диаметру, равному

$$D_{cp} = \frac{D+d}{2} = \frac{D+D\sqrt{0,6}}{2} = D\left(\frac{1+\sqrt{0,6}}{2}\right) = 0,887D \quad (9)$$

Подставив это значение в формулу окружной скорости вращения, получим величину

$$V = \pi D_{cp} \omega = 2,79D \omega \quad (10)$$

с помощью которой можно найти кинетическую энергию шара

$$E_{кин} = m_{ш} V^2 / 2 = 3,885 m_{ш} D^2 \omega^2 \quad (11)$$

Поскольку угловая скорость в водопадном режиме вращения связана с диаметром мельницы формулой [11]

$$\omega = 0,5762 / \sqrt{D}, \text{ с}^{-1}, \quad (12)$$

то окончательное выражение примет вид

$$E_{кин} = 1,29 m_{ш} D \quad (13)$$

Из сравнения с потенциальной энергией шара (после подстановки  $h = 0,83D$ )

$$E_{пот} = mgh = 0,83 m_{ш} gD \quad (14)$$

следует, что соотношение

$$\frac{E_{пот}}{E_{кин}} = \frac{0,83 m_{ш} gD}{1,29 m_{ш} D} = 5,67 \quad (15)$$

для водопадного режима вращения остается неизменным в полном соответствии с учетом критической угловой скорости начала центрифугирования [12]

$$\omega_{кр} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2D}} = 0,705 / \sqrt{D}, \quad (16)$$

от которой берется в определенной уменьшающей пропорции угловая скорость водопадного режима (12).

Соотношением (15) устанавливается, что потенциальная энергия шара в точке отрыва значительно превосходит кинетическую энергию вращения, составляя 85 % от их суммы. Их общее воздействие можно выразить через поправочный коэффициент к потенциальной энергии

$$E_{мес} = E_{пот} + E_{кин} = E_{пот} + 0,176 E_{пот} = 1,176 E_{пот} \quad (17)$$

В итоге с учетом формулы для  $E_{пот}$  (14) суммарная механическая энергия будет равна

$$E_{мес} = 0,976 m_{ш} gD \approx m_{ш} gD \quad (18)$$

Другими словами, потеря потенциальной энергии при вращении за счет уменьшения высоты падения с  $h = D$  до  $h = 0,83D$  компенси-

руется приобретенной кинетической энергией в точке отрыва от поверхности барабана.

Таким образом, общее выражение для активационного фактора (3) может быть представлено следующими модификациями с переводом масс шаров и зерен в их размеры (диаметры  $d_j$ ) через соответствующие плотности.

Исходная модель с энергией активации, равной теплоте плавления, и принятой ранее средней высотой падения шара  $h = 0,5D$  выражается как

$$P_a = \exp\left(-\frac{\Delta H_m}{RT + 0,5MgD(\gamma_w/\gamma_z)(d_w/d_j)^3}\right) \quad (19)$$

Та же модель, но с учетом  $E_{mec} \equiv m_w gD$ :

$$P_a = \exp\left(-\frac{\Delta H_m}{RT + MgD(\gamma_w/\gamma_z)(d_w/d_j)^3}\right) \quad (20)$$

Модель с энергией активации теплового движения частиц и  $E_{mec} \equiv m_w gD$ :

$$P_a = \exp\left(-\frac{R(T_m - T)}{RT + MgD(\gamma_w/\gamma_z)(d_w/d_j)^3}\right) \quad (21)$$

Для иллюстрации приведем пример использования этих трех моделей вероятности разрушения для кварцевой руды в мельнице с внутренним диаметром 3 м (с учетом футеровки) при температуре 298 К со стальными шарами диаметром  $d_w = 0,06$  м, их плотностью  $\gamma_w = 7860$  кг/м<sup>3</sup> и справочными данными [13, 14] для кварца:  $M = 0,0601$  кг/моль,  $\gamma_z = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta H_m = 9170$  Дж/моль,  $T_m = 1883$  К. После подстановки этих данных, а также значения  $R=8,31441$  Дж/(моль·К) в формулы (19)-(21) получим их расчетные варианты соответственно

$$P_a(19) = \exp\left(-\frac{9170}{2478 + 5,560 \cdot 10^{-4} d_j^{-3}}\right),$$

$$P_a(20) = \exp\left(-\frac{9170}{2478 + 1,112 \cdot 10^{-3} d_j^{-3}}\right),$$

$$P_a(21) = \exp\left(-\frac{13178}{2478 + 1,112 \cdot 10^{-3} d_j^{-3}}\right).$$

**Результаты и их обсуждение.** Результаты расчета, начиная с диаметра зерен  $d_i = 0,01$  м

и при последовательном уменьшении их размера вдвое, приведены в таблице и на рисунке 2.

Таблица – Зависимость активационного фактора (вероятности разрушения) в моделях  $P_a(19)$ ,  $P_a(20)$ ,  $P_a(21)$  от размера измельчаемых зерен применительно к промышленным условиям для  $d_w = 0,06$  м и  $D = 3$  м

$j$	$d_j$ , м	$P_a(19)$	$P_a(20)$	$P_a(21)$
1	0,010	0,049	0,078	0,026
2	0,005	0,266	0,447	0,314
3	2,5	0,786	0,883	0,836
4	1,05	0,969	0,984	0,977
5	6,25	0,996	0,998	0,997
6	3,125	1,000	1,000	1,000

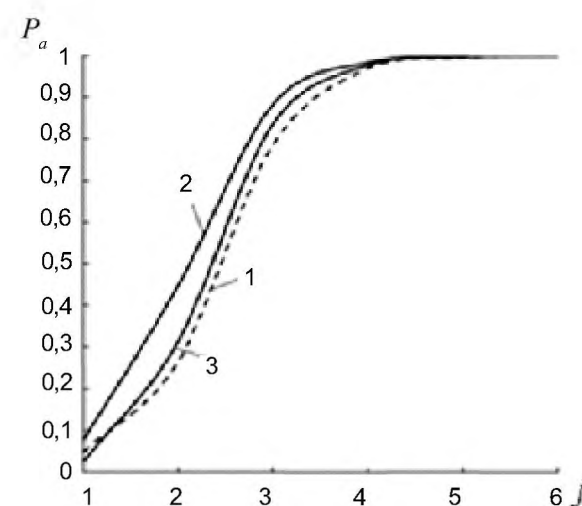


Рисунок 2 – Зависимость вероятности разрушения зерен от их размера по моделям

$P_a(19)$  (при  $E_a = \Delta H_m$ ,  $E_{mec} = E_{пот} = 0,5m_w gD$ ) – 1,  $P_a(20)$  (при  $E_a = \Delta H_m$ ,  $E_{mec} = E_{пот} + E_{кин} = m_w gD$ ) – 2,  $P_a(21)$  (при  $E_a = R(T_m - T)$ ,  $E_{mec} = E_{пот} + E_{кин} = m_w gD$ ) – 3

**Выводы.** Из этих данных следует, что дополнительный учет кинетической энергии шара довольно заметно усиливает разрушаемость зерен. С другой стороны, использование в качестве энергии активации разрушения величины  $R(T_m - T)$  дает сопоставимые результаты с ранее принятым энергетическим барьером, равным теплоте плавления. Этим обосновывается возможность более доступной оценки энергии активации через температуру плавления материала. В целом же предпринятая попытка уточнения активационного фактора свидетельствует об адаптивности вероятностной модели измельчения и открытости ее для более глубокой разработки всех действующих факторов.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Малышев В.П., Турдукожаева (Макашева) А.М., Кайкенов Д.А. Развитие теории измельчения руд на основе молекулярной теории соударений и формальной кинетики последовательных реакций // Обогащение руд. – 2012. – № 4. – С. 29-35.
- 2 Разумовский Н.К. Характер распределения содержаний металлов в рудных месторождениях // Докл. АН СССР. – 1940. – Т. 28. – № 9. – С. 815-817.
- 3 Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 31. – № 2. – С. 99-101.
- 4 Родигин Н.М., Родигина Э.Н. Последовательные химические реакции. Математический анализ и расчет. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 140 с.
- 5 Малышев В.П., Турдукожаева А.М., Кайкенов Д.А. Разработка математической модели последовательной деструкции вещества методом прямого интегрирования // Доклады НАН РК. – 2012. – № 4. – С. 5-13.
- 6 Каримова Л.М., Кайраларов Е.Т., Каримов Р.М. Адаптация вероятностной модели измельчения применительно к переработке речного песка в шаровой мельнице // Современное состояние естественных и технических наук: Матер. X Межд. научн.-практ. конф. – Москва, 2013. – С. 43-47.
- 7 Каримова Л.М., Кайраларов Е.Т., Захарьян С.В. О возможности адаптации вероятностной модели измельчения к реальным условиям // Наука и современность: вызовы XXI века: Матер. Межд. научн.-практ. конф. – Киев, 2014. – С. 57-60.
- 8 Малышев В.П., Абдрахманов Б.Т., Нурмагамбетова (Макашева) А.М. Плавкость и пластичность металлов. М.: Научный мир, 2004. – 148 с.
- 9 Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюменауэра. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 448 с.
- 10 Гудима Н.В., Шейн Я.П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.
- 11 Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов. В 3 т. – М.: Изд. МГУ, 2004. – Т. 2. Технология обогащения полезных ископаемых. – 510 с.
- 12 Справочник по обогащению руд. В 3 т. Гл. ред. О.С. Богданов. Т. 1. Подготовительные процессы. Отв. ред. В.А. Олевский. – М.: Недра, 1972. – 448 с.

13 Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. – Мн.: Современная школа, 2005. – 608 с.

14 Верятин У.Д., Маширев В.П., Рябцев Н.Г. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник. – М.: Атомиздат, 1965. – 460 с.

## REFERENCES

- 1 Malyshev V.P., Turdukozhaeva (Makasheva) A.M., Kajkenov D.A. *Obogashhenie rud*, 2012, 4, 29-35 (In Russ.).
- 2 Razumovskij N.K. *Dokl. AN USSR*, 1940, 28, 9, 815-817 (in Russ.).
- 3 Kolmogorov A.N. *Doklady AN USSR*, 1941, 31, 2, 99-101 (in Russ.).
- 4 Rodigin N.M., Rodigina E.N. *Posledovatel'nye khimicheskie reaktsii. Matematicheskij analiz i raschet*. M.: Izd. AN USSR, 1960, 140 (in Russ.).
- 5 Malyshev V.P., Turdukozhaeva A.M., Kaykenov D.A. *Doklady NAN RK*, 2012, 4, 5-13 (in Russ.).
- 6 Karimova L.M., Kajralapov E.T., Karimov R.M. *Sovremennoe sostoyanie estestvennykh i tekhnicheskikh nauk. Mater. X mezhd. n.-prakt. konf.*, Moscow, Russia. 2013, 43-47 (in Russ.).
- 7 Karimova L.M., Kajralapov E.T., Zahar'jan S.V. *Nauka i sovremennost': vyzovy XXI veka. Mater. mezhd. n.-prakt. konf.*, Kiev, Ukraine. 2014, 57-60 (in Russ.).
- 8 Malyshev V.P., Abdrahmanov B.T., Nurmagambetova A.M. *Plavkost' i plastichnost' metallov M.: Nauchnyj mir*, 2004, 148 (in Russ.).
- 9 *Ispytanie materialov. Spravochnik*. Pod red. H. Blyumenauehra. Per. s nem. M.: Metallurgiya, 1979, 448 (in Russ.).
- 10 Gudima N.V., Shejn Ja.P. *Kratkij spravochnik po metallurgii tsvetnykh metallov. M.: Metallurgiya*, 1975, 536 (in Russ.).
- 11 Abramov A.A. *Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh: Uchebnik dlya vuzov. T. 2. Tekhnologiya obogashheniya poleznykh iskopaemykh*. Moscow. MGU, 2004, 510 (in Russ.).
- 12 *Spravochnik po obogashheniju rud*. Otv. red. V.A. Olevskij. M.: Nedra, 1972, 1, 448 (in Russ.).
- 13 Volkov A.I., Zharskij I.M. *Bol'shoj khimicheskij spravochnik Mn.: Sovremennyya shkola*, 2005, 608 (in Russ.).
- 14 Veryatin U.D., Mashirev V.P., Ryabcev N.G. *Termodinamicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv. M.: Atomizdat*, 1965, 460 (in Russ.).

## Түйіндеме

Бұрын авторлармен жасалған барабан диірмендерде материалды ұсақтаудың ықтималды үлгісі - материалды ұсақтаудың барлық ерекшеліктерін түсіндіруге мүмкіндік берді. Жаңа үлгіге сәйкес осындай таралу стериялық және активациялық факторлардың бір біріне қарсы әсерінің нәтижесі болып табылады және бөлшектер өлшеміне үрдіс жылдамдығының тәуелсіздігі туралы жорамалдаусыз, сондай-ақ бастапқы фракциялық құрамнан және ескерілетін басқадай параметрлердің ықпалынан құралады. Ұсақтаудағы активациялық фактордың маңыздылығы осымен ерекшеленеді. Ұсақтаудың активациялық энергиясы балқу жылуы емес, бар кеннің балқу температурасы бойынша бағаланды. Соғылу энергиясын потенциалдық энергия арқылы өрнектеу үшін шарлар мен түйіршіктер қоспасының, диірменнің суқұлама режимінде оның құлауының басқы нүктесіндегі екпінделу кинетикалық энергиясы қосымша ескерілді. Шардың кинетикалық энергиясын қосымша ескеру түйіршіктердің қирауын өршітетіні алынған мәліметтерден байқалады. Басқа жағынан алғ-

анда, бұзылудың активация энергиясы өрнегін кеннің балқу температурасы арқылы қолдану, бұдан бұрын энергетикалық бөгет болып саналғандармен салыстыруға келетін, балқу жылуына тең нәтижелер береді. Материалдың балқу температурасы арқылы активациялану энергиясын мүмкіндігінше анық бағалау осымен негізделеді. Жалпы алғанда активациялық факторды анықтауға жасалған талпыныс ұсақтаудың ықтималды үлгісінің бейімділігін және барлық ықпал ететін факторларды аса терең әзірлеуге оның ашықтығын айғақтайды.

**Түйін сөздер:** барабан, диірмені, құлама, су режимі, қиратуды активтендірудің энергиясы, шардың кинетикалық энергиясы, балқу температурасы

### Summary

Previously, the authors developed a probabilistic model of grinding materials in drum mills operating in waterfall mode, based on the similarity of the kinetics of molecular collisions and subsequently summarized in a purely probabilistic form of successive elementary events through the corresponding probability possible to explain almost all the features of materials grinding, including a steep decline in fractional composition towards fines as you progress through the process, followed by the formation of their strict lognormal distribution. According to the new model this distribution is a result of steric and counter activation factors and formed without the assumption of independence of the speed of the process of particle size, as well as from the initial impact of the fractional composition and other parameters taken into account. This emphasizes the particular importance of the grinding activation factor. In order to clarify grinding activation energy is evaluated not by the heat of fusion, but by the melting temperature of whole ore. In addition to the expression of the impact energy through the potential energy kinetic energy of mixture of balls and disperse seeds in the fall at the beginning of its operation in the mill waterfall is considered. To illustrate examples of the use three models for the probability of destruction of the quartz ore are presented. The data obtained show that the additional consideration of the kinetic energy of the ball quite significantly enhances grain destructible. On the other hand, the use of the expression of activation energy through a melting point of fracture ore gives comparable results with the previously received energy barrier equal to the heat of melting. This substantiates the possibility of more accessible evaluation of the activation energy through the melting point of the material. In general, the attempt clarify the activation factor indicates the adaptability of a probabilistic model of grinding and its openness for deeper development of all relevant factors.

**Key words:** drum mill, waterfall mode grinding activation factor, grinding activation energy, ball kinetic energy, melting temperature.

*Поступила 20.05.2014*



УДК 552.576.1:553.493.57

Комплексное использование  
минерального сырья. № 3. 2014

*И.Н. ТАЛУТРОВ, М.Н. СВИРИДОВА\**

*Институт Металлургии Уральского Отделения РАН, Екатеринбург, Россия,*

*\*marina-sviridova@list.ru*

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГЕРМАНИЙСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕЙ И УГЛИСТЫХ ПОРОД

На Павловском бурогольном месторождении способом слоевого сжигания перерабатывается только уголь, алевролит не пригоден для сжигания и по этой причине не используется. В работе приведены результаты исследований, которые позволят вовлечь в переработку и алевролиты. Определены технические характеристики и химические составы образцов германийсодержащего сырья Павловского бурогольного месторождения. Изучены фазовые составы минеральной части угля и алевролита, а также их поведение при нагревании в окислительной атмосфере. Результаты исследований физико-химических свойств образцов будут использованы при разработке инновационной технологии, обеспечивающей совместную переработку обоих видов сырья с повышением извлечения германия, комплексности использования сырья и экологическую безопасность производства.

**Ключевые слова:** германийсодержащие уголь и алевролит, химический и фазовый состав, термические превращения, технология.