

## УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИМИ ПРОЦЕССЫ ДРОБЛЕНИЯ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

асп. Шпургалова М.Ю., д. ф.-м. н. Василевич Ю.В.  
УО «Белорусский национальный технический университет», Минск

Как было установлено в работе [2], большинство прикладных оптимизационных задач горного производства могут быть формализованы в классическом представлении в виде выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_j(\bar{X}_N, \bar{A}, t) \rightarrow \text{extr}, \\ \Phi_r(\bar{X}_N, \bar{A}, t) \leq 0 \quad r \in [1, R], \\ Q_s(\bar{X}_N, \bar{A}, t) = 0 \quad s = [1, S], \\ \bar{X}_N \in \{x_1, x_2, \dots, x_N\}, \\ x_i \in [x_{i\min}, x_{i\max}] \quad i \in [1, N], \\ \bar{A} \in \{a_1, a_2, \dots, a_A\} \end{array} \right. \quad (1)$$

где выражение  $F_j(\bar{X}_N, \bar{A})$  формализует достижение экстремальных значений критериями задачи;  $\Phi_r(\bar{X}_N, \bar{A})$  и  $Q_s(\bar{X}_N, \bar{A})$  - соответственно  $R$  ограничений и  $S$  условий, которым должны удовлетворять переменные параметры модели,  $\bar{X}_N$  - неизвестные переменные, полно и однозначно характеризующие процесс измельчения.

Применительно к процессу измельчения целевая функция в выражении (1) в общем случае будет иметь вид

$$F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_N) \rightarrow \text{extr}, \quad (2)$$

где  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_N$  - группы параметров, полно и однозначно характеризующие процесс измельчения.

Ранее были определены группы параметров [2], характеризующие процесс измельчения. Это технические показатели дробильных установок, характеристики режима процесса обогащения и физико-механические характеристики горной породы. Тогда выражение (2) будет переписано в виде

$$F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3) \rightarrow \text{extr}. \quad (3)$$

При конкретных испытаниях дробилки было установлено, что

$$F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_N) \approx K_1 f(\bar{X}_1) + K_2 f(\bar{X}_2) + K_3 f(\bar{X}_3),$$

где  $\bar{X}_1$  - технические показатели дробильных установок,  $\bar{X}_2$  - характеристики режима процесса обогащения,  $\bar{X}_3$  - физико-механические характеристики горной породы,  $K_i, i = 1..3$  - поправочные коэффициенты, рассчитанные опытным путём в соответствии с конкретными показателями. Так же была установлена связь между техническими параметрами дробильной установки: количеством оборотов ротора дробилки, величиной загрузки и удельной потребляемой мощностью.

Следующей группой параметров, характеризующих процесс измельчения, между которыми будет установлена зависимость – это физико-механические параметры измельчаемого материала и энергия, затраченная на измельчение данного материала.

Затраты энергии на измельчение (разрушение) материала зависят от производительности размольной машины, а также от следующих характеристик:

1. физико-механических свойств твёрдого материала (предел прочности материала  $\sigma_B$ , его модуль упругости  $E$ );
2. геометрических параметров разрушаемого куска (его объём или линейный размер);
3. степени измельчения  $z_n$  – отношения диаметра  $D$  исходных кусков, поступающих на дробление, к диаметру  $d$  наиболее крупных кусков, прошедших дробление, т.е.  $z_n = D/d$ ;
4. выбранного способа измельчения – этот фактор чаще всего является определяющим.

Каждому способу измельчения отвечает своя физическая модель разрушения куска и соответствующее ей математическое описание.

В настоящее время в оценке затрат энергии при разрушении твёрдого материала при измельчении способами раздавливания, раскалывания, удара затраты энергии  $A$  на разрушение куска до конечного размера  $d_k$  при степени измельчения  $z_n$  следуют гипотезе Кирпичёва, согласно которой:

$$A = \frac{\pi \sigma_B^2 d_k^3}{12E} (z_n^3 - 1) \text{ Дж.} \quad (4)$$

Однако, оценивая практические результаты, полученные на основе данной гипотезы, необходимо учитывать следующие обстоятельства.

1. Прочностные характеристики конкретного твердого материала, подлежащего измельчению (минерала, породы и т.п.), бывают различными для разных месторождений и размеров куска: сказываются структурные дефекты в материале (плохо воспроизводимые по величине и распределению в куске), влияющие на прочность материала и затраты энергии на его разрушение.
2. Даже в случае абсолютной строгости модели разрушения твердого материала и её математического описания для каждого способа измельчения в силу комбинированного воздействия рабочего органа размольной машины на материал невозможно количественно оценить вклад различных способов измельчения, присущих конкретной размольной машине; отсюда – невозможность точного расчёта затрат энергии на измельчение в реальной размольной установке.

Цель настоящего исследования заключается в том, чтобы в теоретические формулы внести корректирующие эмпирические поправки, которые будут отражать реальные затраты энергии. Предлагается следующий подход: теоретические фрагменты формул учитывают влияние основных факторов, а согласие с реальными затратами энергии достигается за счёт эмпирических поправочных коэффициентов (так как теоретические фрагменты не всегда базируются на основных эффектах реального процесса разрушения твердого материала).

Основываясь на предыдущих расчётах, полученных в работе [1], и опытных данных [3], выведем зависимость, отражающую практическую суть гипотезы Кирпичёва, применительно к процессу дробления калийной руды на установке ударно-центробежной дробилки ДЦ-1,6.

Рассмотрим состав, количество и параметры калийной руды, поступающей на обогащение. В результате обработки данных, исследуя состав 1 т руды (занимаемый объём  $2 \text{ м}^3$ ) различного состава класса крупности от 0,1 до 0,7 м, составим следующую таблицу

Таблица 1 – Количество и объём руды различного состава, поступающей на обогащение.

Диаметр образцов, поступающих на дробление $D_N, \text{ м}$	Объём образца заданного диаметра, поступающих на дробление $V_N$	Количество образцов данного размера $N$	Общий объём образцов заданного диаметра, поступающих на дробление	Процентное содержание данного класса в выбранном объёме %
0,1	0,000523	5	0,002617	0,13
0,2	0,004187	6	0,02512	1,23
0,3	0,01413	9	0,12717	6,22
0,4	0,033493	18	0,60288	29,50
0,5	0,065417	10	0,654167	32,01
0,6	0,11304	4	0,45216	22,13
0,7	0,179503	1	0,179503	8,78
Суммарный объём выборки			2,043617	

Таблица 2 – Результаты испытания процесса дробления сильвинитовой руды в открытом цикле с использованием дробилки СМ-170В.

Обороты ротора, об/мин	Производительность цикла, т/ч	Гранулометрический состав, % по фракциям, мм			
		+10	+5	+1	-1
450	272	3,3	12,0	45,3	39,4
	380	4,6	12,3	45,4	37,7
	736	10,9	16,3	39,5	33,3
550	224	2,1	12,9	43,6	41,4
	441	4,5	14,1	41,7	41,7
	599	4,9	14,0	42,1	39,0
650	336	1,3	11,0	41,3	46,4
	446	2,3	13,8	41,5	42,4
	638	3,4	14,9	48,3	33,4
750	137	2,3	9,9	40,1	50,0
	301	1,9	11,1	42,0	46,9
	395	1,2	10,2	45,5	43,1

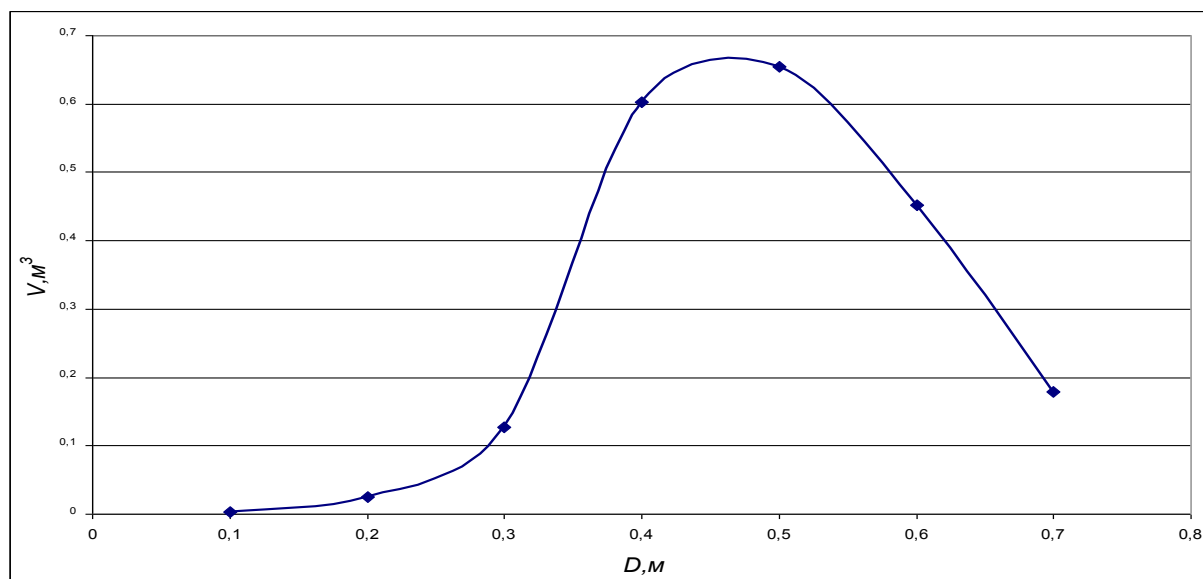
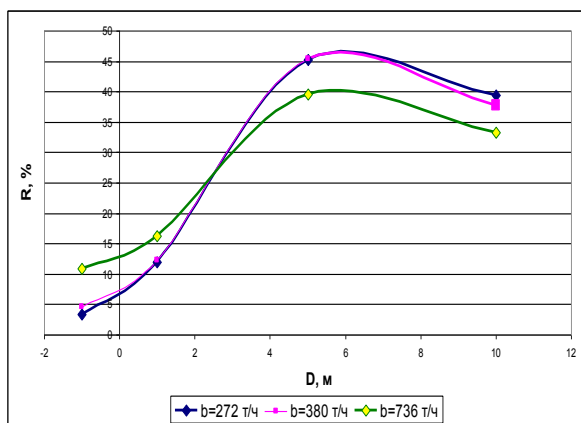
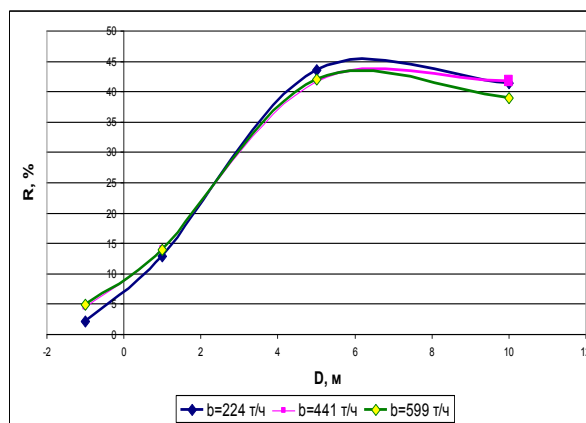


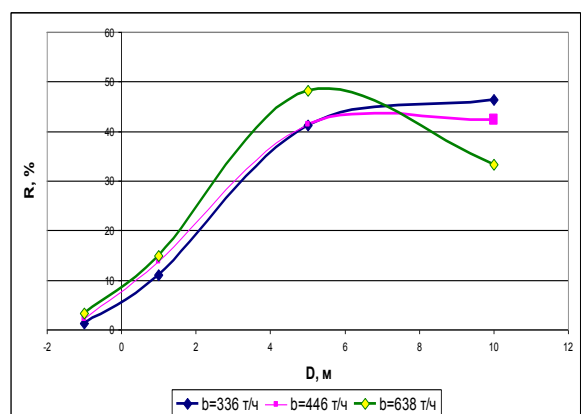
Рисунок 1. - Изменение состава руды в зависимости от объема соответствующих образцов на дробление



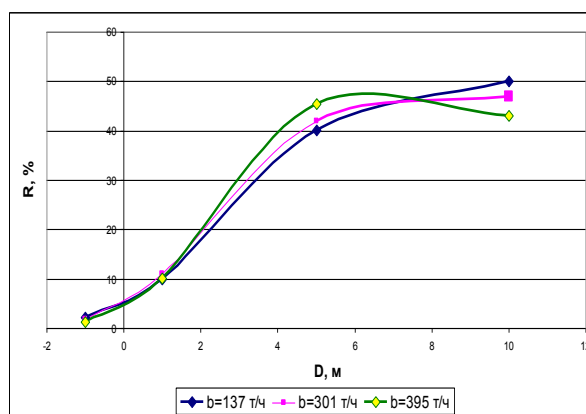
Гранулометрический состав дробленого продукта при количестве оборотов ротора  $n=450$



Гранулометрический состав дробленого продукта при количестве оборотов ротора  $n=550$



Гранулометрический состав дробленого продукта при количестве оборотов ротора  $n=650$



Гранулометрический состав дробленого продукта при количестве оборотов ротора  $n=750$

Рисунок 2. - Зависимость между процентным соотношением руды различного гранулометрического состава.

Как видно из графических зависимостей, построенных выше, распределение руды, поступающей на обогащение, и руды на выходе различного гранулометрического состава, класса крупности от  $-1$  мм до  $+10$  мм имеет нормальное распределение. Кроме того, известен химический состав образцов, поступающих на измельчение: 95-98% сильвина и галита и 2-5% нерастворимого остатка. Поэтому формула (4) в отношении процесса обогащения калийной руды будет более достоверной, если её переписать в виде суммы отдельных компонент – составляющих калийной руды:

$$A = \frac{\pi P_{KCl} \sigma_{KCl}^2}{12 E_{KCl}} \cdot \sum_{k=1}^K d_k^3 P_k \cdot \sum_{n=1}^N P_n \left[ \left( \frac{D}{d} \right)_n^3 - 1 \right] + \frac{\pi P_{NaCl} \sigma_{NaCl}^2}{12 E_{NaCl}} \cdot \sum_{k=1}^K d_k^3 P_k \cdot \sum_{n=1}^N P_n \left[ \left( \frac{D}{d} \right)_n^3 - 1 \right] + (1 - P_{KCl} - P_{NaCl}) \cdot A_{NO} \quad (5)$$

где  $P_{KCl}, P_{NaCl}$  – процентное содержание сильвина и галита в исходном образце руды,  $\sigma_{KCl}, \sigma_{NaCl}$  – предел прочности материала соответствующих компонент,  $E_{KCl}, E_{NaCl}$  – модули Юнга,  $A_{NO}$  – энергия, затраченная на разрушение компонента нерастворимого остатка в образце.

Практическая значимость формулы (5) состоит в том, что изначальный продукт дробления был разбит на 7 классов крупности, от 10 см до 70 см в диаметре, а так же рассчитано процентное соотношение, занимаемое ими в общем объеме поступающей на дробление руды. Поскольку куски руды, поступающие на измельчение, имеют нормальное распределение, то, очевидно, что с наименьшей погрешностью можно рассчитать значение энергии, идущей на разрушение образцов, если представить каждый класс в виде суммы соотношений  $\frac{D_{k+1}}{d_k}$ , умноженное на процентное

содержание данного класса в исходном объёме. Где  $D_{k+1} - d_k = 0,1$ . Кроме того, поскольку исходная руда имеет сложный химический состав, то энергия идущая на разрушение образца, состоит из суммы энергий, затраченных на разрушение основных компонент, его составляющих.

Таким образом, основываясь на фундаментальной теории разрушения, в соответствии с гипотезой Кирпичёва, была выведена зависимость между энергией, идущей на разрушение образца калийной руды и его физико-механическими, а так же химическими параметрами.

## РЕЗЮМЕ

Установлена зависимость между физико-механическими параметрами процесса обогащения калийной руды. Была выведена формула, отражающая связь между прочностью, линейными размерами и количеством содержащегося вещества в исходной руде, поступающей на обогащение и энергией, необходимой для разрушения данного образца до предельных размеров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Василевич, Ю.В. Оптимизационная модель процесса дробления калийных руд/ Ю.В. Василевич, М.Ю. Шпургалова, В.В. Сапешко // Международный научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика», Минск, 2013г, вып.28. – С.216-218.
2. Шпургалов Ю.А. Компьютерное моделирование принятия решений в производственных задачах: монография/ Ю.А. Шпургалов. – Минск: БНТУ, 2009. – 217 с.
3. Выполнить исследования и провести опытно-промышленные испытания замкнутого цикла дробления калийной руды на 4 РУ с использованием различных типов дробилок и модернизированного грохота ГИТ-71М с целью улучшения грансостава дробленого продукта: отчет о НИР/ОАО «Белгорхимпром»; рук. В.В. Сапешко. – Минск, 2007. – 56 с. - №ГР 400.В.2005-2006.

## SUMMARY

*In this work, the dependence between the physical and mechanical parameters of potash ore beneficiation process. On the basis of existing theory of destruction was a formula that reflects the relationship between the strength of linear dimensions and amount of a substance contained in the original ore coming to the enrichment and energy- it necessary to break up the sample size limits. Just it was shown that the derived formula, compared with the existing hypothesis gives more reliable values as based on practical results.*

Поступила в редакцию 12.09.2013