

## ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЕГРЕГАЦИИ СЫПУЧИХ ПОРОД

Выявлена сущность проблемы целенаправленного формирования техногенных месторождений, которая обеспечивается на основе сегрегации горных пород. Определены и систематизированы основные факторы горно-обогатительного производства, которые влияют на показатели качества потенциальных полезных ископаемых и обуславливают пути формирования техногенного образования массивов сыпучих пород.

З'ясовано сутність проблеми цілеспрямованого формування техногенних родовищ, що забезпечується на основі сегрегації гірських порід. Визначені та систематизовані основні фактори гірничо-збагачувального виробництва, які впливають на показники якості потенційних корисних копалин та обумовлюють шляхи формування техногенного утворення масивів сипучих порід.

It is solved the main point of the problem of purposeful technogenic rock formation that it is provided on the basis of rock segregation. The main factors of mining and beneficial production are defined and systematized that influence on the quality indices of the potential mineral resources and cause the ways of formation of technogenic mass of loose rocks.

Современные подходы к оценке эффективности горного производства выдвигают жесткие требования к решению проблем природоохранного характера, в первую очередь, максимального извлечения полезного компонента из недр и как результат сохранения земельных ресурсов.

В этом плане существенным резервом повышения эффективности производства могут служить мероприятия по комплексному освоению природных ресурсов, изучение возможностей использования отходов горного производства в качестве техногенных месторождений.

Согласно классификации техногенных формирований [1], отвалы вскрышных пород, склады некондиционных пород и отходы переработки относятся к минерально-сырьевым формированиям, а, следовательно, должны рассматриваться как потенциальные техногенные месторождения.

Отходами переработки известняков и доломитов на дробильно-сортировочных фабриках является, как правило, щебеночно-песчаная смесь. В основном, из-за несоответствия фракционного состава этой смеси требованиям металлургической промышленности, она размещалась в отвалы. Только в Донецкой области в отвалах дробильно-сортировочных фабрик заскладировано отходов переработки флюсов порядка 143 млн. м<sup>3</sup>. Химический состав полезного ископаемого и отходов переработки флюсов довольно схожи. Это позволяет рассматривать их в качестве потенциальных полезных ископаемых.

Отсевы дробления известняков Еленовского, Стыльского и Каракубского месторождений, при дополнительной переработке – грохочении, пригодны для получения строительного щебня», в качестве закладочного материала для подземных выработок, сырья для производства цемента, извести. При прочих равных условиях, размер среднего куска будет определять то или иное предназначение подобного сыпучего материала.

При всем многообразии применяемого оборудования и схем, используемых в процессе создания насыпных техногенных образований, можно выделить общие явления, степень проявления которых в процессе формирования может в значительной мере сказаться на качественных характеристиках самих образований. Одним из таких явлений является гравитационная сегрегация.

Исследование процессов формирования техногенных месторождений с целью придания новых свойств попутным полезным ископаемым на основе управления процессом сегрегации является своевременной и актуальной задачей.

В теоретической физике процессы случайного поведения множества частиц (в т. ч. кусков породы) описываются кинетическим уравнением диффузионного типа – уравнением Фоккера – Планка. Решение дифференциального уравнения опирается в численные методы, а само представление результатов сложно для восприятия. Трудности строгого математического описания процесса сегрегации приводит к введению в аналитические зависимости вспомогательных коэффициентов, которые затрудняют инженерные расчеты и не позволяют достигнуть адекватного описания движения горной массы в реальных условиях горных работ.

Современные возможности вычислительной техники позволяют моделировать подобные процессы с достаточно высокой степенью точности прогнозирования конечного результата. Предложенная математическая модель процесса сегрегации [2] при формировании техногенных объектов опирается на фундаментальные законы теоретической механики. При этом она позволяет учитывать характеристики горной массы (гранулометрический состав, связность элементов между собой, физические свойства частиц), характер взаимодействия между частицами и схемы формирования техногенных объектов. Генерация процесса и статистическая обработка осуществляется с помощью программы Matlab.

В случае техногенного конусообразного формирования, для каждого горизонтального сечения (слоя) насыпи, закон распределения гранулометрического состава исходного материала в цилиндрических координатах имеет вид (1), что подтверждает и статистика распределения частиц по среднему радиусу –  $R_{cp}$ . (Рис. 1). Средний радиус –  $R_{cp}$ , равный половине среднего диаметра куска –  $d_{cp}$ , является величиной, посредством которой определяется крупность массива.

$$R_{cp} = \gamma \cdot ((1 - R_0/R_{max}) \times \exp(-r^2/H^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha)) + A(\rho)R_0^3 - B(\operatorname{tg}(\varphi)R_0^2 + C(\lambda)R_0 + R_{min}), \quad (1)$$

где  $\gamma = R_{max} \times (H-h)^2 / H^2$  – нормировочный коэффициент;  $R_{max}$  – размер максимального куска, м;  $R_{min}$  – размер минимального куска (обычно  $R_{min} \rightarrow 0$ ), м; А, В и С – величины характеризующие физико-механические свойства сыпучего материала и пропорциональны соответственно плотности куска  $\rho$ , коэффициенту внутреннего трения сыпучего материала  $f = \operatorname{tg} \varphi$  и фактору «лещадности»  $\lambda$ ; Н – высота конуса, м;  $h$  – высота изучаемого горизонта (слоя), м.

Для случая сыпучего материала, зерна которого представлены одним типом пород (равной плотности и формы слагающих частиц) с определенной точностью можно принять коэффициенты А, В и С в качестве постоянных величин. В этом случае управляющей функцией распределения материала по крупности в теле конуса является величина  $\sim \gamma \times (1 - R_0/R_{max}) \times \exp(-r^2/H^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha)$ .

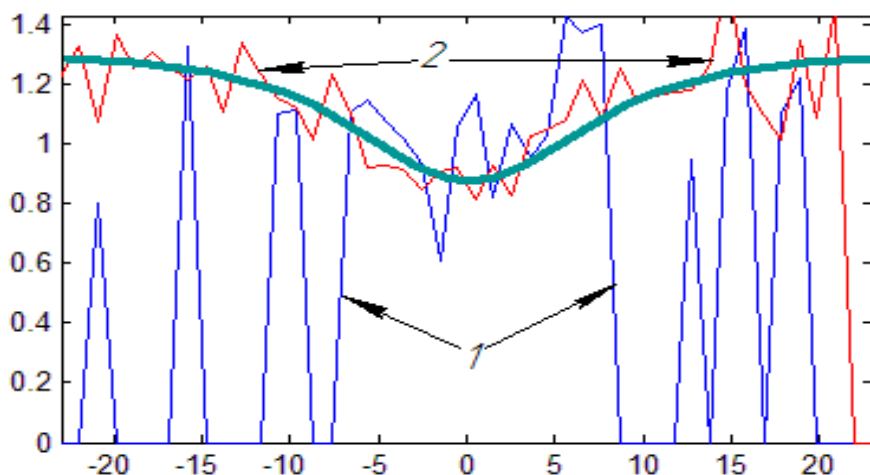


Рис. 1. Характер распределения среднего радиуса «кусков» породы относительно оси конуса: 1 – мгновенное распределение (распределение одного цикла вбрасывания из  $n=150$  частиц); 2 – распределения после  $N=10$  циклов; основная линия – распределение при  $N \rightarrow \infty$ .

Основным результатом разработанной математической модели является гранулометрическая характеристика сыпучего материала в любой точке насыпного объекта, которая определяется через  $R_{\text{cp}}^r$ . Величина среднего размера частицы (куска породы)  $R_{\text{cp}}^r$  для выделенного элементарного объема массива зависит: от положения объема в теле насыпи, которое определяется вектором положения  $\mathbf{r}$ ; от физико-механических свойств сыпучего материала; от технологии формирования насыпи.

С целью апробации результатов математического моделирования был проведен ряд экспериментов с использованием лабораторного стенда [3, 4]. В ходе экспериментов и натурных измерений была проверена адекватность результатов математической модели, а так же изучено влияние гранулометрического состава породы и ее влажности на угол естественного откоса техногенного формирования (табл. 1).

Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. При отсыпке штабеля из скальных сыпучих пород определенного гранулометрического состава происходит перераспределение масс по крупности материала. В верхней части штабеля доминирует мелкая фракция, в нижней части – крупная. При этом более качественное разделение наблюдается при подаче исходного материала имитирующую разгрузку непосредственно на откос отвала, поскольку в этом случае обеспечивается максимальное рассредоточение слагающих частиц при падении на откос. При сталкивании материала скребком (имитация работы бульдозера) разделение породы по крупности выражено слабее, особенно в верхнем слое штабеля.

2. Экспериментально установлено, что разделительная способность наклонной поверхности насыпных тел увеличивается по мере возрастания их высоты. В процессе сползания консолидированной массы происходит втирание в верхней части откоса мелких фракций в пространство между кусками крупных

фракций. Постепенно просеиваясь, мелкие фракции-заполнители перемещаются от верха до основания штабеля, что позволяет сделать вывод о том, что для сыпучей горной породы определенного гранулометрического состава существует минимальная высота наклонной поверхности, с которой эффективно происходит разделение породы по крупности.

Моделирование процессов отвалообразования и вариантов разгрузки горной массы на стенде, указывает на связь между степенью сегрегации и тем как горная масса разгружается на бровку. На основании математического и стендового моделирования, предложена модель, согласно которой, горная масса в процессе перемещения по откосу претерпевает фазные переходы [4,5]:

- первая фаза представляет движение горной массы в виде консолидированного образования, с коэффициентом разрыхления, обеспечивающим определенную стабильность объема рыхлых пород в данный момент времени;

- вторая (промежуточная) фаза характеризуется постепенным увеличением числа отдельностей, движение которых напоминает хаотически сталкивающиеся свободные частицы;

- третья фаза – это фаза «свободного движения» отдельностей, то есть когда подавляющее большинство частиц при своем движении периодически испытывают действие окружения с одного, максимум с двух направлений.

Вклад каждой из фаз в разделительный процесс горной массы двигающейся по откосу определяется свойствами горных пород, общей высотой отвала, производительностью отвального оборудования (исходным потоком горной массы), технологией и параметрами процесса отвалообразования.

С целью максимального раскрытия складированного скального материала по крупности следует рекомендовать технологии, в результате которых реализуются в максимальной степени последние две фазы. Этому удовлетворяют схемы с периферийной разгрузкой автосамосвалов (колесных погрузчиков), одноковшовых экскаваторов с максимальным объемом отгружаемых пород непосредственно на откос и конвейерной укладкой.

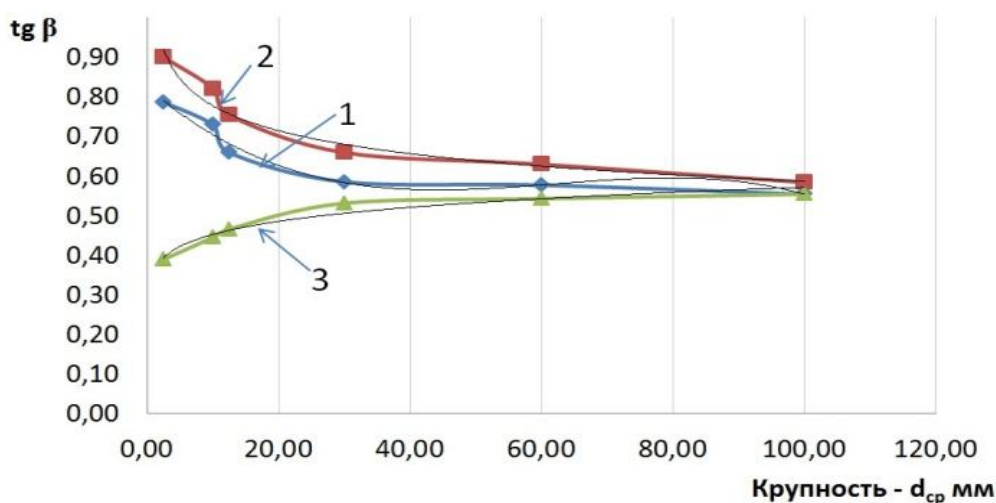
3. При отсыпке сыпучих пород на горизонтальное, либо на наклонное основание происходит установление определенного угла естественного откоса, который для данного типа пород определяется, в первую очередь, классом крупности и влажностью пород и не зависит от способа формирования насыпи.

4. Реальная поверхность откоса отвала, сложенного из сыпучих пород, имеет кривизну, которая определяется распределением масс по крупности и влажностью слагающих пород. Аналитическая зависимость между углом естественного откоса (тангенсом угла) и гранулометрическим составом сыпучей породы для выделенного горизонта штабеля прогнозирует результат натуральных измерений с погрешностью не более 3,5 % (рис.2).

5. Характерной особенностью откоса является наличие в нижней части выполаживающей призмы (контрфорса), состоящей из крупных фракций. Параметры призмы тем больше, чем выше процентный состав крупной фракции в исходном материале. При моделировании отвалообразования [5,6] подобного конвейерному и материалу подобному грансоставу скальной вскрыши для условий карьера «Центральный» ЧАО «ДФДК» формировалась призма высотой равной

более 1/3 высоты штабеля ( $0,38H_0$ ).

В тоже время при отсыпке штабеля толстыми слоями (имитация бульдозерного отвалообразования) разделение на фракции проявлялся в меньшей степени. В результате чего размеры выполаживающих призм составили  $0,27H_0$ .



Уравнения характеристических кривых поверхности откоса

Кривая №	Влажность породы	Уравнение кривой	Дисперсия
1	2%	$y = 1,0302x^{-0,122}$	$R^2 = 0,9746$
2	12%	$y = -1E-06x^3 + 0,0003x^2 - 0,0144x + 0,8251$	$R^2 = 0,9671$
3	>17%	$y = 0,3588x^{0,1011}$	$R^2 = 0,9601$

Рис. 2. Изменение тангенса угла естественного откоса штабеля от класса крупности материала и его влажности

6. Наличие слоистой структуры с разным коэффициентом сцепления отдельностей и вогнутой поверхности откоса отвала (рис. 3), требует пересмотра подходов к методике определения коэффициента запаса устойчивости для отвалов из скальных вскрышных пород.

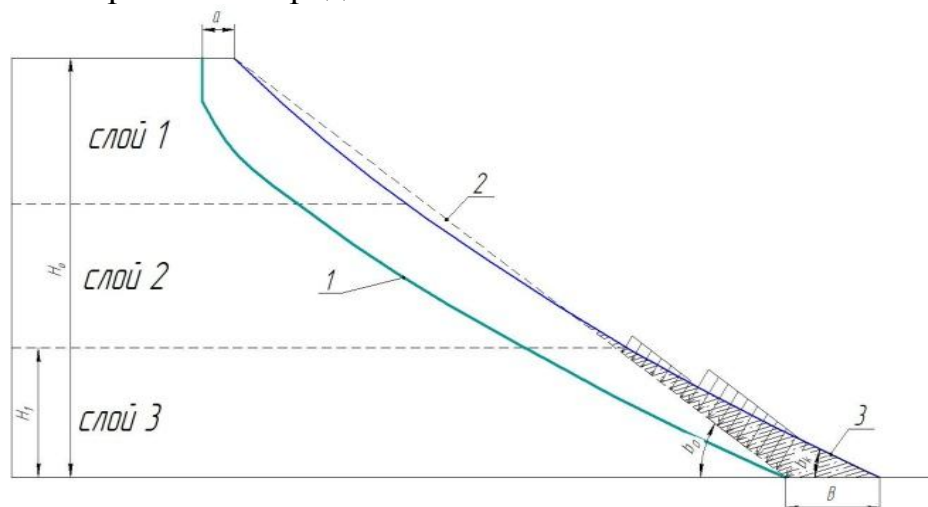


Рис. 3. Схема расчет параметров для естественного контрфорса для предотвращения поверхностных и фильтрационных деформаций:  
1 – поверхность скольжения, 2 – прямолинейный откос

При наличии естественного контрфорса, в расчете коэффициента запаса устойчивости  $F_k$  необходимо учитывать нормальное давление контрфорса  $\sigma_{\min}$

$$F_k = \frac{\sum \tau_{уд} + \sigma_{\min} \times l_d}{\sum \tau_{сд}} \quad (2)$$

где  $\tau_{уд}$  и  $\tau_{сд}$  – соответственно удерживающие и сдвигающие напряжения, действующие на поверхности разрушения;  $l_d$  – длина линии поперечного сечения откоса на которую действует нагрузка (рис. 3) контрфорса, м.

Проведенные исследования позволили установить, что с учетом естественной кривизны откоса и при наличии в нижней части призмы – контрфорса, коэффициент запаса устойчивости увеличивается на 10 %–12 %. При этом, с учетом скорректированного коэффициента устойчивости отвалов, появляется возможность размещения дополнительно 10 % объемов скальных вскрышных пород в пределах занятых под отвалы площадей.

#### Список литературы

1. Научные основы рационального природопользования при открытой разработке месторождений [Текст]: моногр. / Г.Г. Пивняк, И.Л. Гуменик, К. Дребенштедт, А.И. Панасенко. – Д.: Национальный горный университет, 2011. – 568 с
2. Кустов В.В. О математическом моделировании процесса сегрегации горной массы при формировании конусообразного объекта / В.В. Кустов, Г.Д. Пчёлкин // *Металлургическая и горная промышленность*. – 2009. - №1. – С. 96-101.
3. Кустов В.В. Технологические схемы разработки отходов флюсодобывающих предприятий / В.В. Кустов, Г.Д. Пчёлкин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2011. - №1. - С.88 – 92.
4. Кустов В.В. О проблеме выбора технологий формирования и последующей разработки техногенного месторождения с учетом сегрегации горных пород / В.В. Кустов, Г.Д. Пчёлкин // *Материалы международной конференции «Форум горняков – 2011»*. – Д.: НГУ, 2011. – с. 99 – 104.
5. Пчёлкин Г.Д. Влияние технологических процессов и свойств рыхлых пород на особенности структуры и характеристику откоса насыпного техногенного формирования / Г.Д. Пчёлкин, В.В. Кустов, А.В. Кустов // *Материалы международной конференции «Форум горняков – 2012»*, том 3. – Д.: НГУ, 2012. – с. 89 – 95.
6. Пчёлкин Г.Д. Экспериментальные исследования влияния свойств рыхлых пород на характеристику откоса насыпного техногенного формирования / Пчёлкин Г.Д., Кустов В.В., Кустов А.В. // *Материалы международной научно-технической конференции*. – Кривой Рог: КНУ. – Вып. 31, 2012. – С.98 – 101.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Собком Б.Е.  
Надійшла до редакції 14.05.2013*