

При открытой разработке месторождений полезных ископаемых со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями особое значение приобретает решение проблемы оптимизации отвальных и транспортных работ за счет применения технологических схем с многократным перемещением временных внутренних и внешних отвалов. Глубина ряда железорудных карьеров Кривбасса достигла 300-350 м и продолжает увеличиваться. Эти карьеры столкнулись с проблемой нехватки площадей для размещения внешних отвалов и постоянным ростом себестоимости транспортирования горной массы. Доля затрат на транспортирование в себестоимости горной массы достигает 45-50 %. С целью снижения эксплуатационных затрат на транспортирование горной массы осуществляется реконструкция существующих и строительство новых комплексов циклично-поточной технологии.

Применение конвейеров для транспортирования скальной горной массы предусматривает ее предварительное дробление. В то же время известно, что максимальный размер куска, транспортируемого ленточным конвейером, например, с шириной

ленты 2000 мм, достигает 650 мм при удельном весе этой фракции не более 5 % [1]. С целью снижения капитальных затрат на строительство дробильно-грохотильных пунктов предлагается [2] использовать естественное сегрегационное разделение скальной горной массы, которое возникает в процессе ее перемещения по отвальному откосу, для отделения транспортабельной по условию применения конвейерного транспорта фракции. Однако, в целом, решения, предлагаемые в данной работе, опираются на предельно упрощенное, идеальное представление о ходе и результатах процесса гравитационной сегрегации при отвалообразовании скальной горной массы.

Поэтому изучение и использование явления гравитационной сегрегации для разделения отвальной породы на крупную нетранспортабельную фракцию, которая концентрируется в нижней части отвала, и на фракции, пригодные к транспортированию тяжелыми ленточными конвейерами, является проблемой своевременной и актуальной.

Известно, что процесс спонтанного разделения горной массы по крупности при формировании отвалов зависит от множества факторов [3]: ее

Таблица 1
Гранулометрический состав исследуемого материала

Фракции состава I, мм	Фракции состава II, мм	Вес фракции, кг	Содержание, %
-2,0	-8,0	44,5	59,4
+2,0...3,5	+8,0...14	16,303	21,8
+3,5...-5,0	+14,0...-20,0	7,802	10,4
+5,0...-7,0	+20,0...-28,0	4,253	5,7
+7,0 -10,0	+28,0 -40,0	2,087	2,7
Всего		75,00	100

физико-механических свойств; геометрических параметров поверхности отвального откоса; гранулометрического состава породы и формы ее отдельных кусков; параметров отвалообразования – производительности отсыпки, скорости выгрузки. Установлено также, что при самопроизвольной сегрегации скальной горной массы на отвалах и перегрузочных площадках создаются предпосылки для селективной их отработки с учетом гранулометрического состава горной массы, накопленной в разных слоях насыпи по высоте отвала.

Это связано с тем, что отсыпка материала производится наклонными слоями, а распределение масс породы по крупности приводит к образованию слоев, которые расположены параллельно основанию отвала. При этом сегрегация мелкой и крупной фракций является наиболее ярко выраженной. Проведенные исследования показали [4], что четких границ между слоями не наблюдается. Крупнокусковой материал, расположенный в нижней части отвала, только доминирует над мелкой фракцией. Обратное верно как для верхней, так и для средней частей отвала, где доминирует мелкая и средняя фракции горной породы. Целью работы является оценка разделительной способности отвального откоса и определение режима и условий протекания отвалообразова-

ния, обеспечивающих максимальное накопление крупных классов породы в нижних слоях отвала.

При выполнении работы решали следующие задачи:

обоснование и выбор гранулометрического состава горной массы, используемой в экспериментах;

разработка методики экспериментальных исследований и конструкции лабораторного стенда;

определение и оценка физико-механических свойств горной массы, используемой в экспериментах: насыпной массы и сопротивления на сдвиг;

разработка безразмерных комплексов (критериев подобия) для перехода от полученных результатов к реальным условиям отвалов;

разработка методики обработки экспериментальных данных;

разработка рекомендаций по обеспечению режима сегрегации, обеспечивающего максимальное накопление крупных классов породы в нижних слоях отвала.

Гранулометрический состав материала в экспериментах описывается уравнением Розина-Раммлера и подобен граноставу взорванной породы, характерному для карьеров Кривбасса, с учетом масштабного фактора 1:100 (состав I). Для экстраполяции результатов экспериментов использовали состав материала с масштабным фактором 1:25 (состав II).

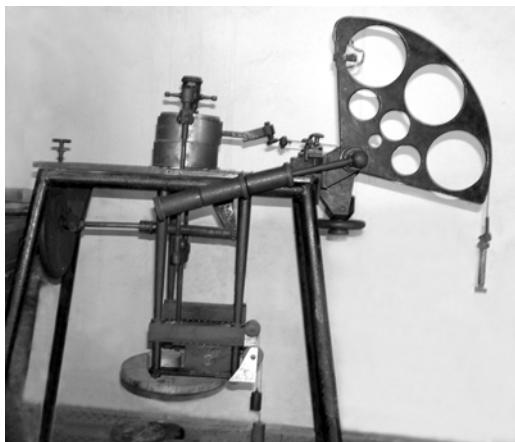


Рис. 1. Общий вид одноплоскостного срезного прибора ГПП-30

рехода к реальным условиям в экспериментах с конвейерным питателем исходили из максимальных касательных напряжений в породе на стенде - 3389,5 Па при высоте столба материала

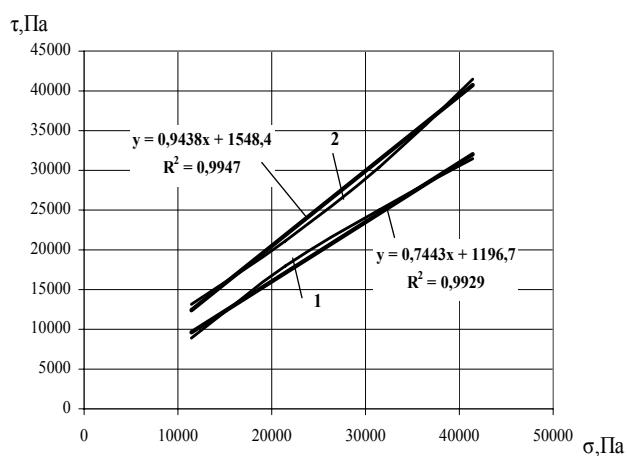
0,5 м и 35202,34 Па в реальных условиях с начальной высотой слоя крупнокускового материала 1,5 м.

Исследования гравитационной сегрегации скальной горной массы проводили в лабораторных условиях на стенде в масштабе 1:100. Стенд загружали (отсыпали модель отвала) из бункера самотеком [6] и при помощи конвейерного питателя (рис. 3).

Стенд состоит из каркаса 1 с размерами 1500×600×150 мм, передняя стенка 2 которого выполнена стеклянной для визуального наблюдения за процессом отсыпки моделируемого отвала, а задняя – оборудована разборным щитом. Внутри стенда под углом естественного откоса материала 35° устанавливали щиток 3, рабочую поверхность которого футеровали слоем отсыпаемого материала. Стенд устанавливали на основании 4 и за-

гружали при помощи конвейерного питателя 7, установленного под днищем бункера 5, который вместе с питателем перемещали по направляющим 6. Производительность отсыпки отвала на стенде регулировали путем изменения скорости ленты питателя при помощи блока питания В-24. Для засыпки стенда

Рис. 2. Графики касательных напряжений: 1 - состав I, 2 - состав II



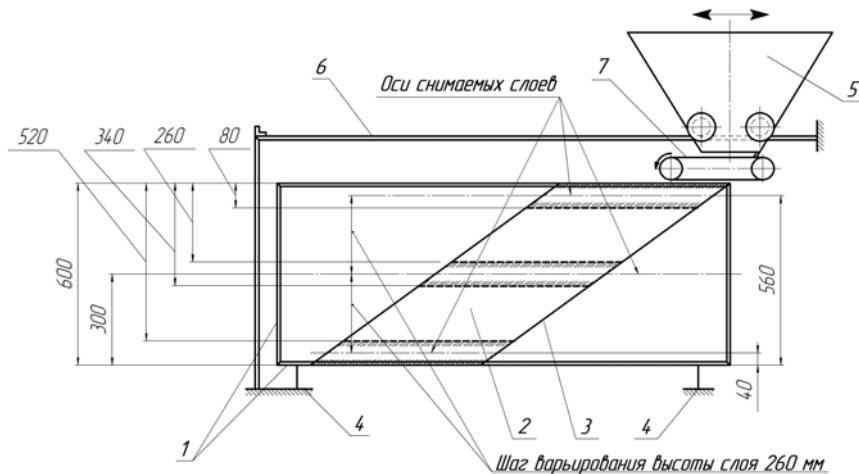


Рис. 3. Лабораторный стенд с конвейерным питателем

использовали дробленую породу (табл. 1, состав I). Порода поступала самотеком на ленту питателя 7 шириной 100 мм через прямоугольную щель 26×15 мм² бункера 5.

Методика экспериментальных исследований составлена на основе математических методов планирования экстремальных экспериментов, основанных на методах статистики.

В процессе исследований получали математическую модель содержания нетранспортабельной фракции материала как функцию производительности отвалообразования Q –(фактор x_1), и уровня отметки слоя относительно подошвы отвала h –(фактор x_2):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

где b_0, b_{ij} ($i, j = 1, 2 \dots k; i \neq j$), b_{ii} – коэффициенты регрессии; y – параметр оптимизации; x_1, x_2 – факторы, уровни которых обоснованы множеством предварительных экспериментов (табл. 2)

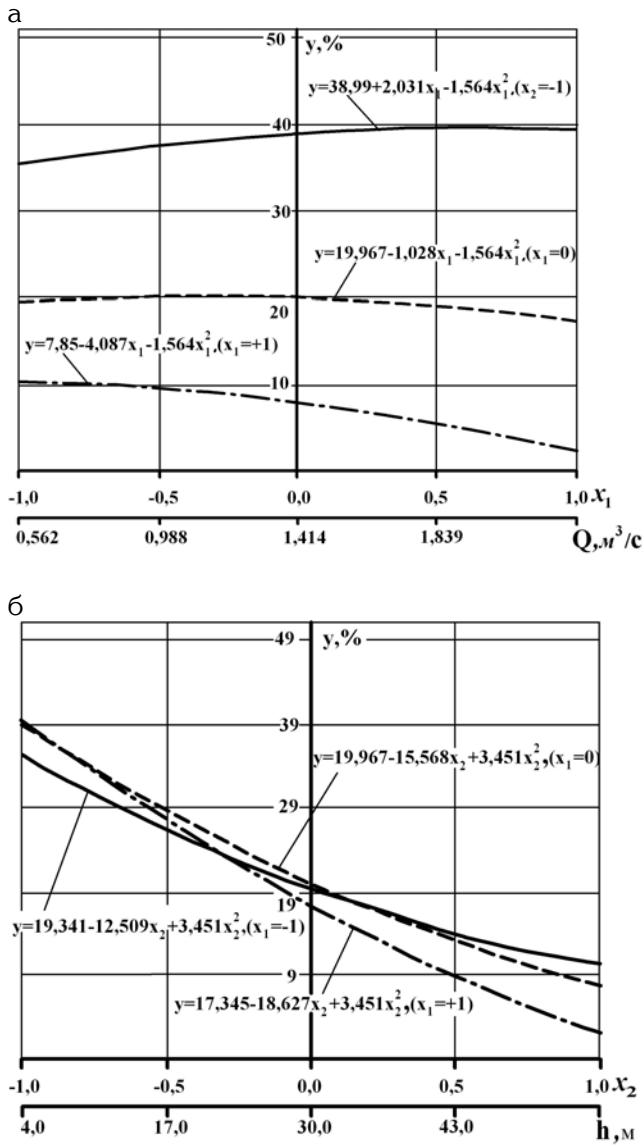
Для перехода к натуральным размерам и реальным условиям отвалообразования использовали критерии подобия (безразмерные комплексы) [6]. На данном этапе исследований, из всего множества предложенных критериев использовали два:

$$K_2 = \frac{h_0^2 \cdot V}{Q}; \quad K_7 = \frac{\tau \cdot h_0^4}{Q^2 \cdot \gamma}, \quad (2)$$

Таблица 2

Таблица уровней факторов

Уровни факторов	Факторы	
	Q , кг/с	h , мм
	x_1	x_2
Основной уровень X_o	0,062	300
Шаг варьирования h_i	0,031	260
Верхний уровень X_i^B	0,093	560
Нижний уровень X_i^N	0,031	40



где h_0 - общая высота отвала, м; Q - производительность отвалообразования, $\text{м}^3/\text{с}$; γ - объемная масса отсыпаемой породы, $\text{кг}/\text{м}^3$; V - начальная скорость породы, укладываемой в отвал, $\text{м}/\text{с}$; τ - сопротивление породы сдвигу, Па.

Критерии подобия K_2 и K_7 зависят от условий проведения экспериментов и от входящих в них величин. По-

Рис. 4. Содержание нетранспортабельной фракции скальной породы (%) по высоте отвала как функция исследуемых факторов: а - производительности отвалообразования Q , $\text{м}^3/\text{с}$ (фактор x_1), б - уровня отметки слоя породы относительно подошвы отвала h , м (фактор x_2)

этому при определении производительности отвалообразования в реальных условиях в экспериментах с бункерной загрузкой использовали критерий подобия K_2 , численное значение которого для верхнего уровня производительности отвалообразования

равно $K_2^e = 218,18$, среднего уровня $K_2^0 = 292,21$ и нижнего – $K_2^n = 436,36$. В экспериментах с конвейерным питателем учитывали условия работы исследуемого материала на сдвиг при его выгрузке из бункера. При этом применяли критерий K_7 , который принимал значения соответственно $K_7^e = 0,7625 \cdot 10^8$; $K_7^0 = 1,71 \cdot 10^8$ и $K_7^n = 6,7 \cdot 10^8$.

Толщину снимаемого слоя материала после отсыпки условного отвала в модели (рис. 4) принимали равной 80 мм. Отсчет высоты слоя производили относительно его оси с привязкой к низу стендса. При этом полученные математические модели аппроксимировали на всю условную высоту отвала в пределах 0...600 мм.

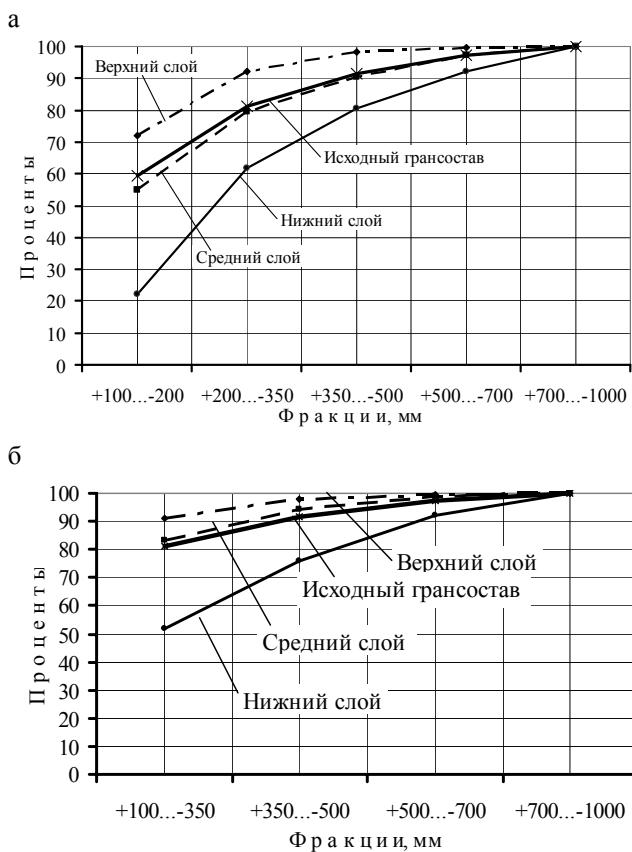


Рис.5. Анализ грансостава в исследуемых слоях отвала:

а – при отсыпке отвала конвейерным питателем, $Q=1,0344 \text{ м}^3/\text{с}$; **б** – при отсыпке из бункера, $Q=24,75 \text{ м}^3/\text{с}$

модели оценивали по коэффициенту аппроксимации и критерию Фишера [7].

Полученная модель адекватно описывает результаты исследований $F_{\text{выч}}=2,12$ при $F_{\text{табл}}=3,16$ ($F_{\text{выч}} < F_{\text{табл}}$). Коэффициент аппроксимации составил величину 0,0024, что дополнительно подтверждает вывод о хорошем описании результатов изме

рений соотношением (4). Коэффициенты регрессии $b_1=-1,028$ и $b_{11}=-1,564$ статистически незначимы ($t_1=-0,11$; $t_{11}=-0,84$ при $t_{\text{табл}}=2,101$). Это объясняется достаточно большой

статистической ошибкой оценки исследуемого параметра $\sigma^2(y)=3,503$, а также тем, что производительность отсыпки условного отвала в модели несущественно влияла на процесс сегрегации породы в рамках проведенного эксперимента. Для получения более полной и достоверной картины исследуемого процесса в соотношении (4) были оставлены все коэффициенты регрессии.

Уравнение регрессии процентного содержания нетранспортабельной крупной фракции, как функция исследуемых параметров в натуральной форме для исследуемой модели в лабораторных условиях, будет иметь вид, %

Достоверность этого предположения проверяли пробными выборками слоя отсыпаемого материала на самом дне модели и в ее верхней части.

Соотношения для кодирования факторов
 $x_1 = (Q - 0,062)/0,032$;
 $x_2 = (h - 300)/260$. (3)

Получено уравнение регрессии процентного содержания нетранспортабельной фракции скальной породы для уровня значимости 5 % в кодированной форме:

$$y = 19,967 - 1,028x_1 - 15,568x_2 - 3,059x_1x_2 - 1,564x_1^2 + 3,451x_2^2 \quad (4)$$

Полученные значения коэффициентов регрессии проверяли на значимость по критерию Стьюдента. Адекватность

Таблица 3

Исследование грансостава отсыпанного материала в среднем слое отвала

Производительность отсыпки, м ³ /с	Грансостав	Фракции, мм					Отклонение, %	
		-200	-350	-500	-700	-1000		
Исходный	59,36	81,11	91,52	97,19	100			
Отсыпка модели отвала конвейерным питателем								
Qmax-2,264	Измеренный в среднем слое	69,29	83,60	93,39	98,46	100	4,630	
Qmid-1,414		54,90	79,39	90,52	97,24	100	2,156	
Qmin-0,562		65,11	80,21	90,66	97,63	100	2,440	
Среднее отклонение грансостава для всех условий отсыпки, %							3,0752	
Отсыпка модели отвала из бункера								
Qmax-33	Измеренный в среднем слое	85,708	94,403	98,419	100		2,521	
Qmid-24,75		83,231	94,443	98,509	100		1,791	
Qmin-16,5		83,197	94,067	98,778	100		1,747	
Среднее отклонение грансостава для всех условий отсыпки, %							2,02	

$$\begin{aligned}
 y = & 19, 967 - 1, 028 \frac{Q - 0, 062}{0, 031} - \\
 & -15, 568 \frac{h - 300}{260} - 3, 059 \frac{Q - 0, 062}{0, 031} \times \\
 & \times \frac{h - 300}{260} - 1, 564 \left(\frac{Q - 0, 062}{0, 03145} \right)^2 + \\
 & +3, 451 \left(\frac{h - 300}{260} \right)^2. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Моделирование процесса сегрегации с применением критерия K_7 , дало возможность установить математическую модель содержания нетранспортабельной фракции пустой породы по высоте отвала 60 м, как функцию исследуемых факторов для реальных условий, %

$$\begin{aligned}
 y = & 19, 967 - 1, 028 \frac{Q - 1, 0344}{0, 5126} - \\
 & -15, 568 \frac{h - 30,0}{26,0} - 3, 059 \frac{Q - 1, 0344}{0, 5126} \times \\
 & \times \frac{h - 30,0}{26,0} - 1, 564 \left(\frac{Q - 1, 0344}{0, 5126} \right)^2 + \\
 & +3, 451 \left(\frac{h - 30,0}{26,0} \right)^2, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где Q – производительность отвалообразования, м³/с; h – уровень отметки

рассматриваемого слоя скальной породы относительно подошвы отвала, м.

В ходе анализа полученной зависимости исследовали влияние каждого фактора на содержание нетранспортабельной фракции горной породы при всех их уровнях (рис. 4).

Установлено, что характер полученных зависимостей адекватно согласуется с данными исследований, полученными при отсыпке условного отвала на стенде с гипервысокими производительностями (33 м³/с) [6]. Наибольшее влияние на сегрегацию оказывает высота расположения слоя породы относительно подошвы отвала ($b_2=15,568$), что также подтверждает ранее полученные результаты. При этом снижение производительности отвалообразования до реальных величин порядка 0,5...1,5 м³/с приводит к снижению на 10% нетранспортабельной фракции в нижних слоях отвала ($x_2=-1$). Содержание этой фракции (рис. 4, б) составило величину не более 40 %. Очевидно (рис. 4, а), что в нижних слоях отвала с уменьшением производительности отвалообразования содержание нетранспортабельной фракции в теле отвала продолжает уменьшаться ($x_2=-1$).

Из анализа полученных результатов (табл. 3) видно, что в среднем слое отвала исходный грансостав практически повторяется (рис.5). Расхождение грансостава с измеренным составляет при отсыпке конвейерным питателем не более 3,07 %, а при отсыпке из бункера с гиперпроизводительностью $24,75 \text{ м}^3/\text{с}$ до 2 %. По результатам выполненных исследований строили гистограммы процентного содержания фракций материала в исследуемых слоях отвала для всех условий отвалообразования (рис. 6).

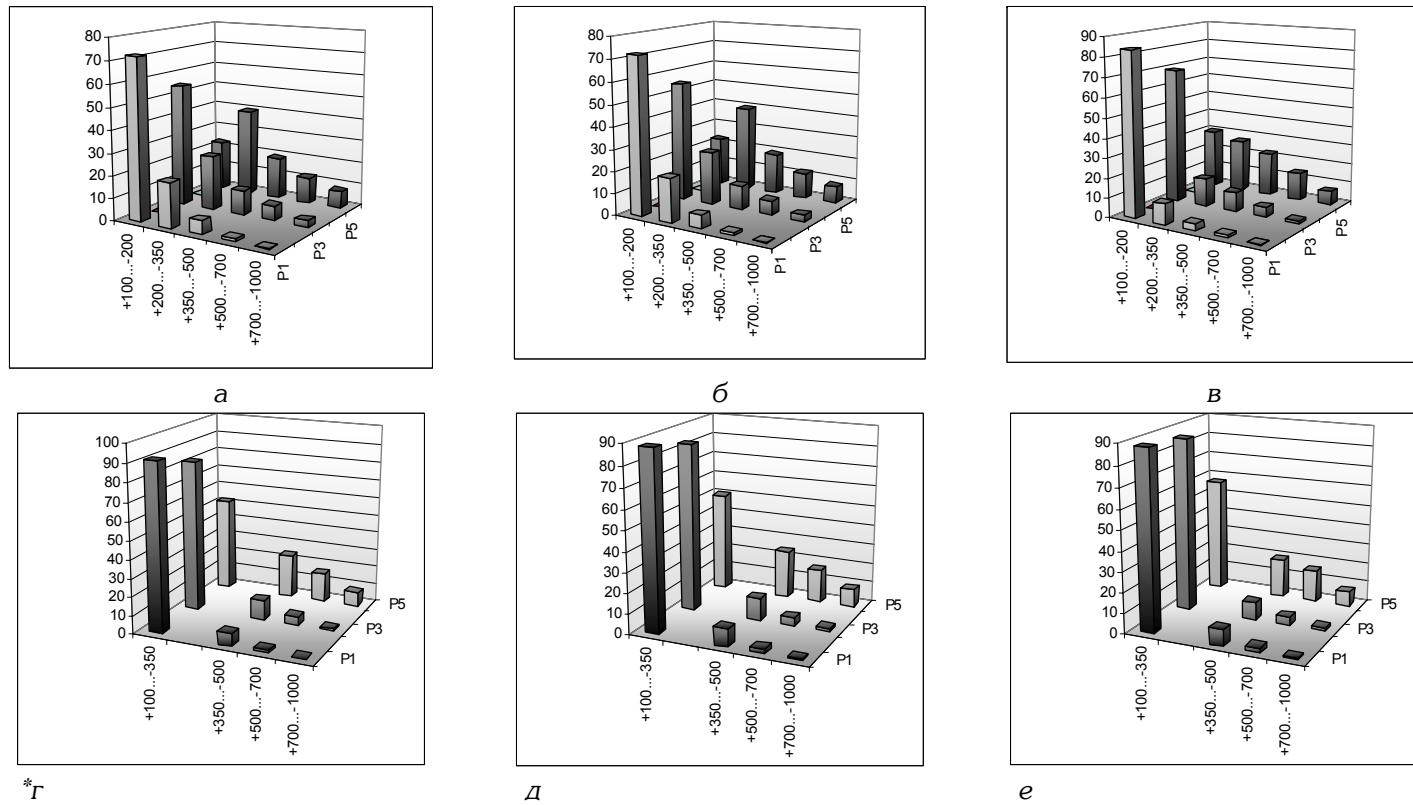


Рис.6. Гистограммы грансостава горной массы по слоям отвала при его отсыпке конвейерным питателем:
а - $Q=0,5218 \text{ м}^3/\text{с}$, *б* - $Q=1,0344 \text{ м}^3/\text{с}$, *в* - $Q=1,547 \text{ м}^3/\text{с}$ и при отсыпке из бункера:
г - $Q=16,5 \text{ м}^3/\text{с}$, *д* - $Q=24,75 \text{ м}^3/\text{с}$, *е* - $Q=33,0 \text{ м}^3/\text{с}$; (P1 - верхний, P3 - средний, P5 - нижний слои)

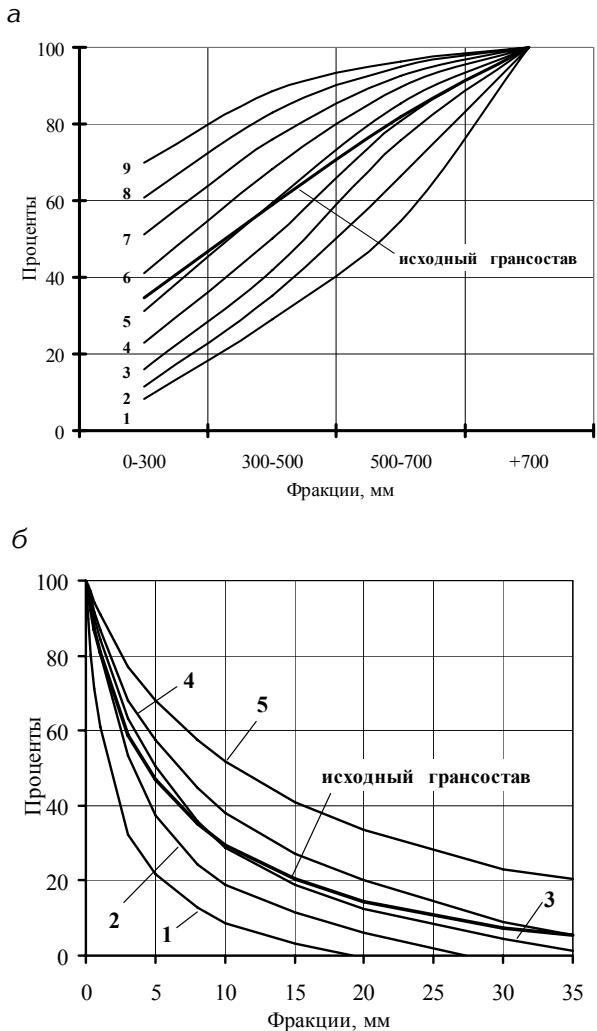


Рис. 7. Исследование грансостава:

а – отвала скальных пород (1 – уровень подошвы уступа, 2 – отметка 4,5 м, 3 – 9 м, 4 – 13,5 м, 5 – 18 м, 6 – 22,5 м, 7 – 27 м, 8 – 31,5 м, 9 – 36 м);
б – слоя аглошихты (1 – верхний слой, 2, 3, 4 – промежуточные слои, 5 – нижний слой), высота слоев – 48 мм

По результатам обработки исходных данных построены графические зависимости (рис. 7).

Во всех случаях эта закономерность подтверждается – в средней части отвала сохраняется исходный грансостав. Эту закономерность можно рассматривать как проявление закона гравитационной сегрегации при формировании насыпей.

При реализации технологии горных работ с многократным перемещением отвалов скальных пород данная закономерность приведет к парадоксальному факту. Так, имея в развале взорванную скальную горную массу с содержа-

нием нетранспортабельной фракции на предельно допустимом уровне, по условию применения конвейерного транспорта, после укладки ее во временный отвал, согласно установленной закономерности, дальнейшему перемещению конвейерами будет подлежать только верхняя половина отвала. Решить данную проблему можно путем применения специальных средств активного воздействия на материал, укладываемый в отвал. К таким средствам можно отнести гро-

Гистограммы дают наглядное представление о повторяемости исходного грансостава в среднем слое отвала.

С целью подтверждения установленной закономерности были собраны, проанализированы и обработаны исходные данные, приведенные в публикациях [8, 9]. Диапазон крупности материала варьировал от 0,16 мм до 35 мм при высоте отсыпаемого слоя 240 мм [8] и от 0,30 м до 1,2 м при высоте отсыпаемого отвала 36 м [9].

хот-сбрасыватель (положительное решение по заявке U200607505. Грехот-скидач/ Ю.Г Вілкул, В.К Слободянюк, А.С. Арапкін), метатели горной породы и другие аналогичные устройства.

Результаты работы. Проведены экспериментальные исследования с применением методов статистики и теории моделирования, позволяющие прогнозировать процесс сегрегации в широком диапазоне производительности отвалообразования 0,5...33,0 м³/с. Впервые получены экспериментальные эмпирические зависимости, достоверно описывающие процесс сегрегации (коэффициент аппроксимации – 0,0024,

Критерий Фишера $F_{вых} = 2,12$ при $F_{табл} = 3,16$). Впервые установлено, что в исследуемом диапазоне производительности отвалообразования в средней части повторяется исходный грансостав складируемого материала. В проведенных экспериментах среднее расхождение грансостава средней части отвала и исходного грансостава не превысило 2,02...3,07 %.

Полученные результаты и установленные закономерности являются основой для проектирования новых технологических схем открытой разработки с многократным перемещением временных отвалов [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конвейеры: Справочник/ Р.А. Волков, А.Н. Гнутов, В.К. Дьячков и др. Под общ. ред. Ю.Н. Пертена. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд.-ние. 1984. 367 с., ил.
2. Бастан П.П., Кяючкин Е.И., Гальяннов А.В. О возможности применения сегрегационного разделения материалов при циклично-поточной технологии //Изв. вузов. Горный журнал. - 1979. - № 12. - С. 36-38.
3. Лаптев Ю.В., Гальяннов А.В. Теоретические основы процесса сегрегации горной массы// Геотехнические проблемы комплексного освоения недр - Сб. научн. тр./ ИГД УрОРАН.– Вып. 2(92). Екатеринбург, 2004.- 463с. - С. 245-258.
4. Гальяннов А.В., Лаптев Ю.В., Ковалев М.Н. Закономерности сегрегации при складировании скальных пород и руд на карьерах ОАО "Комбинат Магнезит". Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1997, 100 с
5. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. М.: Машиностроение, 1964.-280 с.
6. Вілкул Ю.Г., Слободянюк В.К., Арапкін А.С. Експериментальні дослідження гравітаційної сегрегації скельної горної маси //Розробка рудних месторождень.– Вып. №1. – Кривий Рог, 2006, С. 3–8.
7. Балута А.М., Деркач Н.И., Калиниченко В.Ф., Чуб В.Ф. Применение математических методов планирования экспериментов при разработке рудных месторождений. К.: Наукова думка, 1973. - 161 с.
8. Фролов Ю.А., Братчиков С.Г., Заславский Е.Е., Статников Б.Ш. Исследование сегрегации агломерационных шихт// Сталь. – 1974. – №10. – С.882-886.
9. Томаков П.И., Попов Н.С. Определение физико-механических свойств пород отвального массива на карьерах Кузбасса // Уголь.– 1965.– № 4.– С. 44-46.
10. Декларацийний патент на корисну модель 15525. Україна, МПК E21C41/00. Спосіб відкритої розробки крутоспадних родовищ корисних копалин / Вілкул Ю.Г., Слободянюк В.К., Арапкін А.С. (Україна), № U 2005 11226; Заявл. 28.11.2005; Опубл. 17.07.2006, Бюл. №7.– 6с. ГНАБ

Коротко об авторах

Вілкул Ю.Г – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой открытых горных работ, Слободянюк В.К. – кандидат технических наук, доцент, Арапкін А.С. – кандидат технических наук, доцент, Криворізький технічний університет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 16 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.С. Коваленко.

