

А.Д. ПОЛУЛЯХ, д-р техн. наук

(Украина, Днепр, ОП «Укрнииуглеобогащение» ДП «НТЦ «Углеинновация»)

Д.А. ПОЛУЛЯХ, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»),

КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ МАШИННЫХ КЛАССОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЯ

Современные теоретические представления о физике обогатительных процессов позволяют сделать вывод о том, что наиболее высокие качественно – количественные показатели обогатительных процессов достигаются при обогащении узких классов крупности, подготовительных в соответствии с требованиями этих процессов к исходному продукту. В связи с этим подготовка машинных классов становится одной из наиболее ответственных подготовительных операций на современных углеобогачительных фабриках. Поэтому установление зависимости влияния эффективности подготовки крупного и мелкого машинных классов на эффективность их обогащения является актуальной научно – производственной проблемой.

В качестве показателя эффективности подготовки машинного класса ($E_{ПМК}, \%$) предлагается использовать следующее выражение, обоснование необходимости которого изложено в [1]

$$E_{ПМК} = 0,01E_2 \cdot E_0, \%, \quad (1)$$

где E_2, E_0 – эффективность, соответственно, грохочения и обезвоживания, %.

Эффективность грохочения рассчитывается по формуле [2]

$$E_2 = \frac{10^4 (\alpha - \beta)}{\alpha(100 - \beta)}, \%, \quad (2)$$

где α, β – содержание класса меньше крупности разделения, соответственно, в исходном и надрешетном продуктах, %.

Для определения эффективности обезвоживания используется выражение [3]

$$E_0 = \frac{W_u^r - W_n^r}{W_u^r} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где W_u^r , W_n^r – влажность исходного и надрешетного продукта данной технологической операции, %.

Для установления зависимости E_{pm} от эффективности грохочения $E_{ПМК}$, определяемой при условии, что засорение подситного продукта не происходит, т.е. равно нулю, воспользуемся модернизируемой формулой Пилова П.И. [4]

$$E_{pm} = \frac{\delta_p - A}{B\sqrt{x}} \cdot C, \text{ кг/м}^3, \quad (4)$$

где δ_p – плотность разделения, кг/м³; A и B – эмпирические коэффициенты, специфичные для каждого обогатительного аппарата; x – эквивалентная крупность обогащаемого материала, мм, и предположением, что эквивалентная крупность обогащаемого материала зависит от его засорения некондиционными частицами (β); $C = C_1 \cdot C_2$ – коэффициент зависящий от нагрузки на обогатительный аппарат и от содержания породных фракций в исходном материале, д.ед; $C_1 = Q_f : Q_n$ – коэффициент, показывающий отношение величины фактической нагрузки (Q_f , т/ч) на обогатительный аппарат к номинальной (Q_n , т/ч), равной $Q_n : 1,2$, где Q_n – паспортная нагрузка на обогатительный аппарат, т/ч, 1,2 – коэффициент неравномерности загрузки; $C_2 = \gamma_{п.ф.} : \gamma_{п.50\%}$ – коэффициент, показывающий отношение фактического содержания породных фракций в исходном материале ($\gamma_{п.ф.}$, %) к их содержанию в 50% ($\gamma_{п.50\%}$), которое определяет транспортные возможности обогатительных аппаратов.

Численные значения эмпирических коэффициентов, входящих в формулу (4), полученные в результате обработки экспериментальных данных, содержащихся в работе [5], Пиловым П.И. [4], представлены в табл. 1.

Таблиця 1

Обогатительный аппарат	A	B
Тяжелосредный сепаратор	– 1300	13
Тяжелосредный гидроциклон	857,3	16,53
Отсадочная машина	1000	2,4
Отсадочная машина шламовая	3828	– 11,56

В качестве эквивалентной крупности обогащаемого материала в соответствии с [6 – 8] можно принять средневзвешенный диаметр частиц, определяемый в соответствии с данными гранулометрического состава исходного материала, т.е.

$$X = d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i d_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}, \text{ мм}, \quad (5)$$

Гравітаційна сепарація

где γ_i – выход i – го класса крупности, %; d_i – среднее значение крупности i – го класса, взятое как среднее значение его верхней и нижней границ, мм.

Для определения d_{cp} машинного класса необходимо знать средний диаметр основного машинного класса $d_{cp.>}$ и средний диаметр засоряющего машинного класса $d_{cp.<}$, которые можно определить по гранулометрическому составу исходного материала, подающегося на операцию подготовки данного машинного класса, с помощью уравнения (5).

Исходя из уравнений материального баланса применительно к d_{cp} машинного класса можно предположить, что его величина зависит не только от значений $d_{cp.>}$ и $d_{cp.<}$, но и от количества этих классов в надситном продукте.

Принимая, что засорение надситного продукта равна β и количество засоряемого продукта $(100 - \beta)$ и, исходя из вышеизложенного предположения, можно записать

$$d_{cp} = \frac{(100 - \beta) \cdot d_{cp.>} + \beta \cdot d_{cp.<}}{100}, \text{ мм.} \quad (6)$$

Для определения β воспользуемся известной формулой эффективности грохочения.

Преобразуем формулу (2) относительно β

$$E_2 \cdot \alpha(100 - \beta) = 10^4 (\alpha - \beta);$$

$$100E_2\alpha - \beta E_2\alpha = 10^4\alpha - 10^4\beta;$$

$$10^4\beta - \beta E_2\alpha = 10^4\alpha - 100E_2\alpha;$$

$$\beta \cdot (10^4 - E_2\alpha) = 100\alpha(100 - E_2);$$

$$\beta = \frac{100\alpha(100 - E_2)}{10^4 - E_2\alpha}. \quad (7)$$

Для определения зависимости $d_{cp} = f(E_T)$ подставим в уравнение (6) вместо β его значение из уравнения (7) и выполним преобразования

$$\begin{aligned}
 d_{cp} &= \frac{(100 - \beta) \cdot d_{cp.>} + \beta \cdot d_{cp.<}}{100} = \\
 &= \left\{ \left[100 - \frac{100\alpha(100 - E_2)}{10^4 - E_2\alpha} \right] \cdot d_{cp.>} + \left[\frac{100\alpha(100 - E_2)}{10^4 - E_2\alpha} \right] \cdot d_{cp.<} \right\} : 100 = \\
 &= \left\{ \left[\frac{10^6 - 100E_2\alpha - 100\alpha(100 - E_2)}{10^4 - E_2\alpha} \right] \cdot d_{cp.>} + \left[\frac{100\alpha(100 - E_2)}{10^4 - E_2\alpha} \right] \cdot d_{cp.<} \right\} : 100 = \\
 &= \left[\frac{(10^6 - 100E_2\alpha - 10^4\alpha + 100E_2\alpha) \cdot d_{cp.>} + (10^4\alpha - 100E_2\alpha) \cdot d_{cp.<}}{10^4 - E_2\alpha} \right] : 100 = \\
 &= \left[\frac{10^4(100 - \alpha) \cdot d_{cp.>} + 100(100\alpha - E_2\alpha) \cdot d_{cp.<}}{10^4 - E_2\alpha} \right] : 100 = \\
 &= \frac{100 \left[100(100 - \alpha) \cdot d_{cp.>} + (100\alpha - E_2\alpha) \cdot d_{cp.<} \right]}{100(10^4 - E_2\alpha)} = \\
 &= \frac{(10^4 - 100\alpha) \cdot d_{cp.>} + (100 - E_2)\alpha \cdot d_{cp.<}}{10^4 - E_2\alpha}, \text{ мм} \tag{8}
 \end{aligned}$$

Подставляя значение $d_{cp.}$ из уравнения (8) как эквивалентную крупность x в уравнение (4) получим

$$E_{pm} = \frac{(\delta_p - A) \cdot C}{B \sqrt{\frac{(10^4 - 100\alpha) d_{cp.>} + (100 - E_2)\alpha d_{cp.<}}{10^4 - E_2\alpha}}}, \text{ кг/м}^3 \tag{9}$$

Определив E_Γ из уравнения (1) как

$$E_2 = \frac{100E_{ПМК}}{E_o}, \% \tag{10}$$

и, подставляя его значение в уравнение (9), окончательно получим

$$E_{pm} = \frac{(\delta_p - A) \cdot C}{B \sqrt{\frac{(10^4 - 100\alpha)d_{cp.>} + \left(100 - \frac{100E_{ПМК}}{E_o}\right)\alpha d_{cp.<}}{10^4 - \frac{100E_{ПМК}}{E_o}\alpha}}}, \text{ кг/м}^3 \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что с увеличением эффективности подготовки машинного класса ($E_{ПМК}$), крупности надситного ($d_{cp.>}$) и подситного ($d_{cp.<}$) продуктов, а также содержания класса меньше крупности разделения в исходном продукте (α) значение E_{pm} уменьшается. При превышении нагрузки над номинальной и количества породных фракций в исходном продукте более 50% E_{pm} увеличивается.

Для подтверждения возможности применения уравнения (11) для расчетов E_{pm} гравитационных процессов по значениям $E_{ПМК}$ были выполнены исследования влияния качества подготовки крупного и мелкого машинных классов на эффективность их обогащения на основе фактических данных, полученных в результате оказания институтом «Укрниинуглеобогащение» технической помощи в пуске, наладке и отработке режимов эксплуатации технологического оборудования ЦОФ «Червоноградская» [9].

Подготовка крупного и мелкого машинных классов на фабрике осуществлялась следующим образом. Рядовой уголь, после сухого отсева, подвергался мокрому грохочению по крупности 13 мм на последовательной установке двух вибрационных грохотов ГИСТ-72. Надситный продукт данных грохотов являлся крупным машинным классом и направлялся на обогащение в тяжелосредние сепараторы СКВ-32, а подситный продукт – на обесшламливание по 1 мм на неподвижных конусных грохотах ГК-1,5, надситный продукт которых являлся мелким машинным классом и направлялся на обогащение в гидравлические отсадочные машины ОМ-18. Обогащение крупного и мелкого машинных классов осуществлялось по плотности разделения 1900 кг/м³ с выделением двух продуктов: концентрата и отходов.

Всего было проведено четыре опробования данных операций.

Результаты работы операций мокрого подготовительного грохочения и дешламации, а также данные расчета показателей извлечения классов крупности рядового угля в надрешетный и подрешетный продукты грохотов ГИСТ-72 и классов крупности подрешетного продукта грохотов ГИСТ-72 в надрешетный продукт конусных грохотов ГК-1,5 приведены в табл. 2, при этом количество воды, подаваемой на мокрое подготовительное грохочение, равно 720 м³/ч.

В табл. 3 приведены исходные данные и результаты расчета эффективности грохочения, обезвоживания и подготовки машинных классов мокрого подготовительного грохочения и обесшламливания мелкого машинного класса, которые определялись по формулам 1 – 3.

Гранулометрический состав продуктов подготовки крупного и мелкого машинных классов на ЦОФ «Червоноградская»

Класс крупности, мм	Продукты, %										
	Исходный	Крупный Машинный класс			Подситный № 1		Мелкий машинный класс			Подситный № 2	
		γ _и ,	γ _{пр.} ,	γ _и ,	ε _к	γ _{пр.} ,	γ _и ,	γ _{пр.} ,	γ _и ,	ε _м	γ _{пр.} ,
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Опыт № 1											
50 – 100	10,2	20,57	10,2	1,00							
25 – 50	12,0	24,19	12,0	1,00							
20 – 25	6,2	11,75	5,83	0,94	0,73	0,37	0,79	0,37	0,06		
15 – 20	5,0	8,27	4,10	0,82	1,79	0,90	1,93	0,90	0,18		
13 – 15	4,2	5,59	2,77	0,66	2,84	1,43	3,07	1,43	0,34		
10 – 13	14,9	14,42	7,15	0,48	15,37	7,75	16,63	7,75	0,52		
6 – 10	19,1	10,79	5,35	0,28	27,28	13,75	29,50	13,75	0,72		
3 – 6	11,3	3,19	1,58	0,14	19,28	9,72	20,85	9,72	0,86		
1 – 3	5,5	0,26	0,13	0,02	10,65	5,37	9,81	4,57	0,83	21,05	0,8
0 – 1	11,6	0,97	0,48	0,04	22,06	11,12	17,42	8,12	0,70	78,95	3,0
Итого	100,0	100,0	49,59		100,0	50,41	100,0	46,61		100,0	3,8
Зольность, %	48,1	51,8			44,5		45,3			34,3	
Влажность, %	4,6	12,1			69,0		41,7			97,0	
Нагрузка, т/ч	700,8	386,2			314,6		299,3			15,3	
Средний диаметр, мм	18,9	32,05			6,02		6,44			0,82	
Опыт № 2											
50 – 100	15,6	27,91	15,6	1,00							
25 – 50	15,4	27,54	15,4	1,00							
20 – 25	7,8	13,81	7,72	0,99	0,18	0,08	0,20	0,08	0,01		
15 – 20	6,3	10,82	6,05	0,96	0,57	0,25	0,64	0,25	0,04		
13 – 15	5,3	8,53	4,77	0,90	1,20	0,53	1,35	0,53	0,10		
10 – 13	9,7	9,01	5,04	0,52	10,57	4,66	11,91	4,66	0,48		
6 – 10	12,4	0,89	0,5	0,04	26,99	11,90	30,40	11,90	0,96		
3 – 6	13,0	0,70	0,39	0,03	28,6	12,61	32,22	12,61	0,97		
1 – 3	6,4	0,22	0,12	0,02	14,24	6,28	15,21	5,95	0,93	6,67	0,33
0 – 1	8,1	0,57	0,32	0,04	17,65	7,78	8,07	3,16	0,39	93,33	4,62
Итого	100,0	100,0	55,91	1,00	100,0	44,09	100,0	39,14		100,0	4,95
Зольность, %	49,3	57,2			39,3		39,9			34,1	
Влажность, %	5,9	6,8			81,1		33,3			96,8	
Нагрузка, т/ч	340,3	171,0			169,3		147,8			21,5	
Средний диаметр, мм	23,9	38,6			5,34		5,94			0,6	
Опыт № 3											
50 – 100	10,8	20,95	10,8	1,00							
25 – 50	14,6	28,32	14,6	1,00							
20 – 25	7,4	13,93	7,18	0,97	0,45	0,22	0,49	0,22	0,03		
15 – 20	6,0	10,47	5,4	0,90	1,24	0,60	1,33	0,60	0,10		
13 – 15	5,0	7,27	3,75	0,75	2,58	1,25	2,76	1,25	0,25		

Гравітаційна сепарація

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10 – 13	11,5	9,81	5,06	0,44	13,29	6,44	14,24	6,44	0,56		
6 – 10	14,8	5,74	2,96	0,20	24,44	11,84	26,18	11,84	0,80		
3 – 6	15,6	2,42	1,25	0,08	29,63	14,35	31,73	14,35	0,92		
1 – 3	7,4	0,29	0,15	0,02	14,97	7,25	14,58	6,59	0,89	20,5	0,66
0 – 1	6,9	0,80	0,41	0,06	13,40	6,49	8,69	3,93	0,57	79,5	2,56
Итого	100,0	100,0	51,56		100,0	48,44	100,0	45,22		100,0	3,2
Зольность, %	47,9		61,6			33,3		33,1			35,5
Влажность, %	6,2		8,4			72,4		36,1			97,8
Нагрузка, т/ч	475,2		203,0			277,2		259,6			12,6
Средний диаметр, мм	20,4		34,02			5,86		6,22			0,81
Опыт № 4											
50 – 100	15,3	27,93	15,3	1,00							
25 – 50	13,8	25,19	13,8	1,00							
20 – 25	7,3	13,32	7,3	1,00							
15 – 20	7,1	12,70	6,96	0,98	0,31	0,14	0,36	0,14	0,02		
13 – 15	6,2	10,64	5,83	0,94	0,82	0,37	0,95	0,37	0,06		
10 – 13	10,2	8,19	4,49	0,44	12,63	5,71	14,64	5,71	0,56		
6 – 10	13,1	0,71	0,39	0,03	28,11	12,71	32,59	12,71	0,97		
3 – 6	11,7	0,42	0,23	0,02	25,37	11,47	29,41	11,47	0,98		
1 – 3	6,7	0,35	0,19	0,03	14,40	6,51	16,31	6,36	0,95	2,42	0,15
0 – 1	8,6	0,55	0,30	0,03	18,36	8,3	5,74	2,24	0,26	97,58	6,06
Итого	100,0	100,0	54,79		100,0	45,21	100,0	39,0		100,0	6,21
Зольность, %	46,7		55,8			35,6		35,9			33,9
Влажность, %	5,4		10,4			81,5		30,1			96,3
Нагрузка, т/ч	322,3		157,3			165,0		139,3			25,7
Средний диаметр, мм	23,3		38,13			5,39		6,17			0,49

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчета эффективности обезвоживания, грохочения и подготовки машинного класса

Продукты	Параметры	Опыт			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	2	3	4	5	6
Мокрое подготовительное грохочение					
Исходный	Q^* , т/ч	700,8	340,3	475,2	322,3
	V^{**} , м ³ /ч	753,8	741,3	746,1	738,4
	W^* , %	51,8	68,5	61,1	69,6
Надрешетный	Q^* , т/ч	386,2	171,0	203,0	157,3
	V^{**} , м ³ /ч	53,2	12,5	18,6	10,4
	W^* , %	12,1	6,8	8,4	6,2
Подрешетный	Q^* , т/ч	314,6	169,3	277,2	165,0
	V^{**} , м ³ /ч	700,6	728,0	727,5	728,0
	W^* , %	69,0	81,1	72,4	81,5
Эффективность	E_o , %	76,6	90,1	86,3	91,1
	E_z , %	74,6	86,9	81,6	88,8
	$E_{ПМК}$, %	57,1	78,3	70,4	80,9

1	2	3	4	5	6
Дешламация мелкого машинного класса					
Исходный	Q^* , т/ч	314,6	169,3	277,2	165,0
	V^{**} , м ³ /ч	700,6	728,0	727,5	728,0
	W^r , %	69,0	81,1	72,4	81,5
Надрешетный	Q^* , т/ч	299,3	147,8	259,6	139,3
	V^{**} , м ³ /ч	214,1	73,8	146,7	60,0
	W^r , %	41,7	33,3	36,1	30,1
Подрешетный	Q^* , т/ч	15,3	21,5	12,6	25,7
	V^{**} , м ³ /ч	486,5	655,0	580,8	668,0
	W^r , %	97,0	96,8	97,8	96,3
Эффективность	E_o , %	39,6	58,9	50,1	63,1
	E_z , %	25,5	59,0	38,5	72,9
	$E_{ПМК}$, %	10,1	34,8	19,3	46,0

* – нагрузка на сухую массу, т/ч;

** – количество воды, м³/ч.

Из табл. 3 следует, что эффективность грохочения в узле мокрого подготовительного грохочения в опытах № 1, № 2, № 3 и № 4 составила соответственно 74,6; 86,9; 81,6 и 88,8%, эффективность дешламации – 25,5, 59,0; 38,5 и 72,9%. Эффективность обезвоживания крупного машинного класса в опытах № 1, № 2, № 3 и № 4 составило, соответственно, 76,6; 90,1; 86,3 и 91,1%, мелкого машинного класса – 39,6; 58,9; 50,1 и 63,1%.

Следовательно, эффективность подготовки крупного машинного класса в опытах № 1, № 2, № 3 и № 4 в соответствии с формулой (3) составляла соответственно 57,1; 78,3; 70,4 и 80,9%, мелкого машинного класса – 10,1; 34,8; 19,3 и 46,0%.

Зависимость извлечения классов крупности в крупный машинный класс приведена на рис. 1, из которого следует, что теоретически извлечение крупного машинного класса должна представлять площадь прямоугольника Б – В – Г – Д, а теоретическая кривая извлечения z -образную линию А – Б – В – Г. Однако в силу несовершенствования операции мокрого подготовительного грохочения извлечение крупного машинного класса представляет собой сумму площадей $S_{>13}$ и $S_{<13}$, где $S_{<13}$ – засорение крупного машинного класса; $S_{>13}$ – класс +13 мм. Подготовку крупного машинного класса необходимо вести уменьшая $S_{<13}$ до 0 и увеличивая значение $S_{>13}$ до площади прямоугольника Б – В – Г – Д.

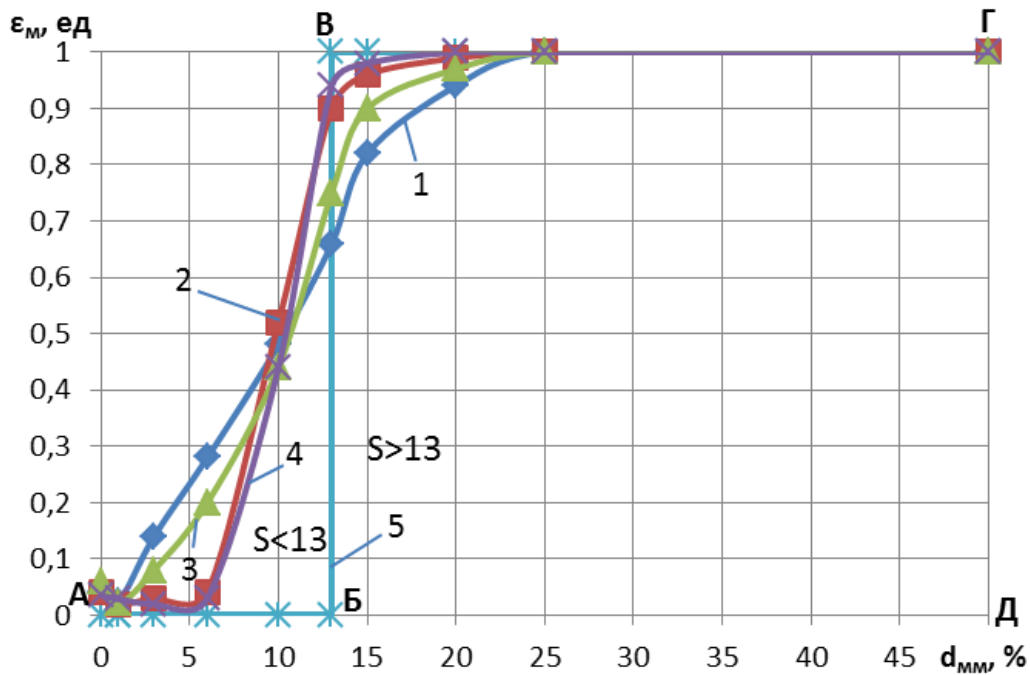


Рис. 1. Извлечение класса крупности рядового угля в крупный машинный класс:
1, 2, 3, 4 – номера опытов; 5 – теоретически.

Зависимость извлечения классов крупности рядового угля в мелкий машинный класс приведена на рис. 2. Из рис. 2 следует, что извлечение мелкого машинного класса теоретически должна представлять площадь прямоугольника Б – В – Г – Д, а теоретическая кривая извлечения – ломаную линию А – Б – В – Г – Д – Е. Однако в силу несовершенства операции мокрого подготовительного грохочения и дешламации извлечение мелкого машинного класса представляет собой сумму площадей $S_{<1}$, S_{1-13} , $S_{>13}$, где $S_{>13}$ – засорение мелкого машинного класса классом +13 мм; $S_{<1}$ – засорение мелкого машинного класса классом 0 – 1 мм; S_{1-13} – класс 1 – 13 мм. Подготовку мелкого машинного класса необходимо вести уменьшая значения $S_{>13}$ до 0 и $S_{<1}$ до 0, и увеличивая значения S_{1-13} до площади прямоугольника Б – В – Г – Д.

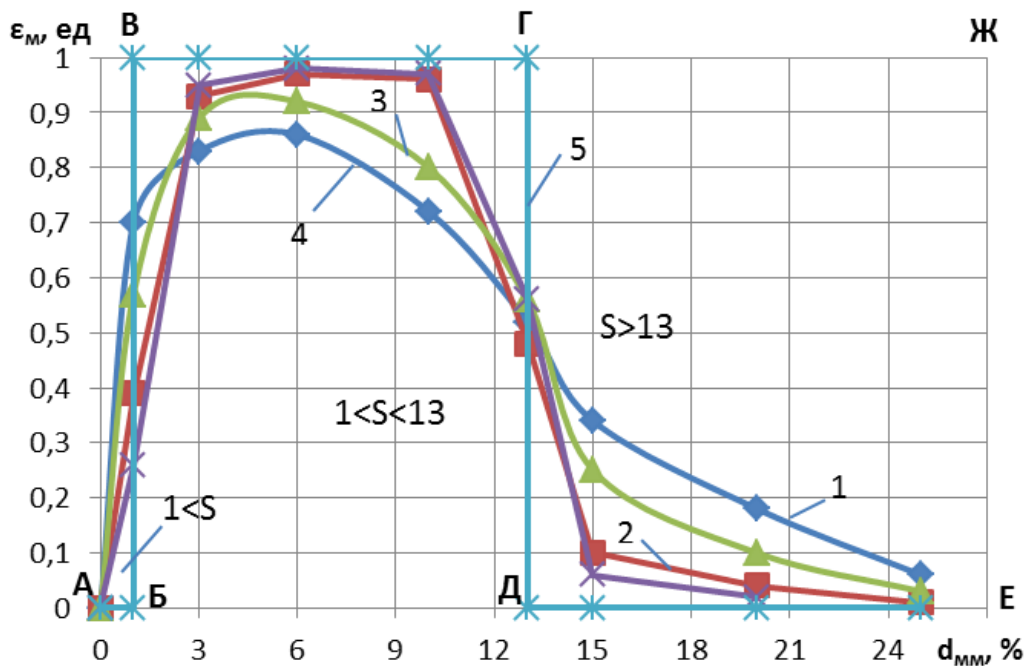


Рис. 2. Извлечение классов крупности рядового угля в мелкий машинный класс:
1, 2, 3, 4 – номера опытов; 5 – теоретически

Результаты работы тяжелосредних сепараторов при обогащении крупного машинного класса и данные расчета показателей извлечения фракций плотности исходного материала приведены в табл. 4. Показатель обогатимости крупного машинного класса в опытах № 1, № 2, № 3 и № 4 соответственно 32,1, 39,9, 41,9 и 41,3%.

В опытах № 1 и № 2 – сверхтрудная № 1 категория обогатимости, в опытах № 3 и № 4 – сверхтрудная № 2 категория обогатимости. Крупность крупного машинного класса в этих опытах примерно одинаковая: средний диаметр составляет для опытов № 1, № 2, № 3 и № 4 соответственно 32,05; 38,6; 34,02 и 38,13 мм.

Сепарационные характеристики разделения крупного машинного класса в тяжелосредних сепараторах СКВ-32 по данным опытам приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что эффективность разделения крупного машинного класса по плотности 1900 кг/м^3 составляет для опыта № 1 – $E_{рм.к} = 75 \text{ кг/м}^3$, № 2 – $E_{рм.к} = 35 \text{ кг/м}^3$, № 3 – $E_{рм.к} = 45 \text{ кг/м}^3$, № 4 – $E_{рм.к} = 32,5 \text{ кг/м}^3$.

Полученные данные позволили установить зависимость эффективности обогащения крупного машинного класса ($E_{рм.к}$) от эффективности его подготовки ($E_{ПМК.к}$), которая приведена на рис. 4.

Фракционный состав продуктов обогащения крупного машинного класса
крупностью +1 мм в тяжелосредних сепараторах СКВ-32
на ЦОФ «Червоноградская»

Плотность фракций, т/м ³	Продукты								
	Исходный		Концентрат				Отходы		
	γ _и , %	A, %	γ _{пр.} , %	A, %	γ _и , %	ε _к	γ _{пр.} , %	A, %	γ _и , %
Опыт № 1									
- 1,4	25,72	8,5	52,62	8,5	25,72	1,0	0	0	0
1,4 – 1,5	3,50	19,0	7,02	19,0	3,43	0,98	0,14	21,1	0,07
1,5 – 1,6	4,12	28,5	7,84	28,5	3,83	0,93	0,57	30,6	0,29
1,6 – 1,7	3,92	35,1	7,14	35,1	3,49	0,89	0,84	40,3	0,43
1,7 – 1,8	5,78	41,9	10,04	41,9	4,91	0,85	1,71	46,0	0,87
1,8 – 1,9	5,07	49,9	7,77	49,6	3,80	0,75	2,48	52,4	1,27
1,9 – 2,0	2,98	62,0	2,56	55,5	1,25	0,42	3,38	64,0	1,73
+2,0	48,91	81,9	5,01	65,5	2,45	0,05	90,88	82,5	46,46
Итого	100,0	52,2	100,0	23,3	48,88		100,0	79,8	51,12
Опыт № 2									
- 1,4	18,27	8,4	45,09	8,4	18,27	1,0	0	0	0
1,4 – 1,5	2,90	19,6	7,16	19,6	2,90	1,0	0	0	0
1,5 – 1,6	3,94	30,7	9,65	30,7	3,91	0,995	0,05	30,8	0,03
1,6 – 1,7	3,85	35,6	9,38	35,6	3,80	0,99	0,08	37,9	0,05
1,7 – 1,8	6,28	42,0	15,21	41,9	6,16	0,98	0,20	45,6	0,12
1,8 – 1,9	5,40	49,9	11,57	49,5	4,89	0,90	0,86	51,9	0,51
1,9 – 2,0	3,02	64,1	0,96	57,1	0,39	0,13	4,42	65,1	2,63
+2,0	56,34	82,3	0,49	66,8	0,20	0,004	94,39	82,4	56,14
Итого	100,0	58,3	100,0	24,8	40,52		100,0	81,2	59,48
Опыт № 3									
- 1,4	16,21	8,7	41,86	8,7	16,21	1,0	0	0	0
1,4 – 1,5	2,85	19,8	7,28	19,8	2,82	0,99	0,05	21,1	0,03
1,5 – 1,6	4,02	29,4	10,18	29,3	3,94	0,98	0,13	34,4	0,08
1,6 – 1,7	3,78	36,3	9,56	36,2	3,70	0,97	0,13	41,4	0,08
1,7 – 1,8	5,93	43,4	14,54	43,0	5,63	0,95	0,49	50,9	0,30
1,8 – 1,9	5,27	51,7	11,57	49,6	4,48	0,85	1,29	63,6	0,79
1,9 – 2,0	3,00	68,4	1,94	55,4	0,75	0,25	3,67	72,7	2,25
+2,0	58,94	84,5	3,07	67,3	1,19	0,02	94,24	84,8	57,75
Итого	100,0	61,7	100,0	26,7	38,72		100,0	83,8	61,28
Опыт № 4									
- 1,4	17,13	8,5	43,43	8,5	17,13	1,0	0	0	0
1,4 – 1,5	2,96	18,9	7,51	18,9	2,96	1,0	0	0	0
1,5 – 1,6	3,99	28,8	10,12	28,8	3,99	1,0	0	0	0
1,6 – 1,7	4,02	35,7	10,19	35,7	4,02	1,0	0	0	0
1,7 – 1,8	6,11	42,8	15,34	42,8	6,05	0,99	0,10	43,0	0,06
1,8 – 1,9	5,37	50,3	12,65	48,9	4,99	0,93	0,63	68,2	0,38
1,9 – 2,0	3,16	65,4	0,48	53,7	0,19	0,06	4,90	75,2	2,97
+2,0	57,26	83,2	0,28	60,8	0,11	0,002	94,37	83,1	57,15
Итого	100,0	59,8	100,0	24,8	39,44		100,0	82,6	60,56

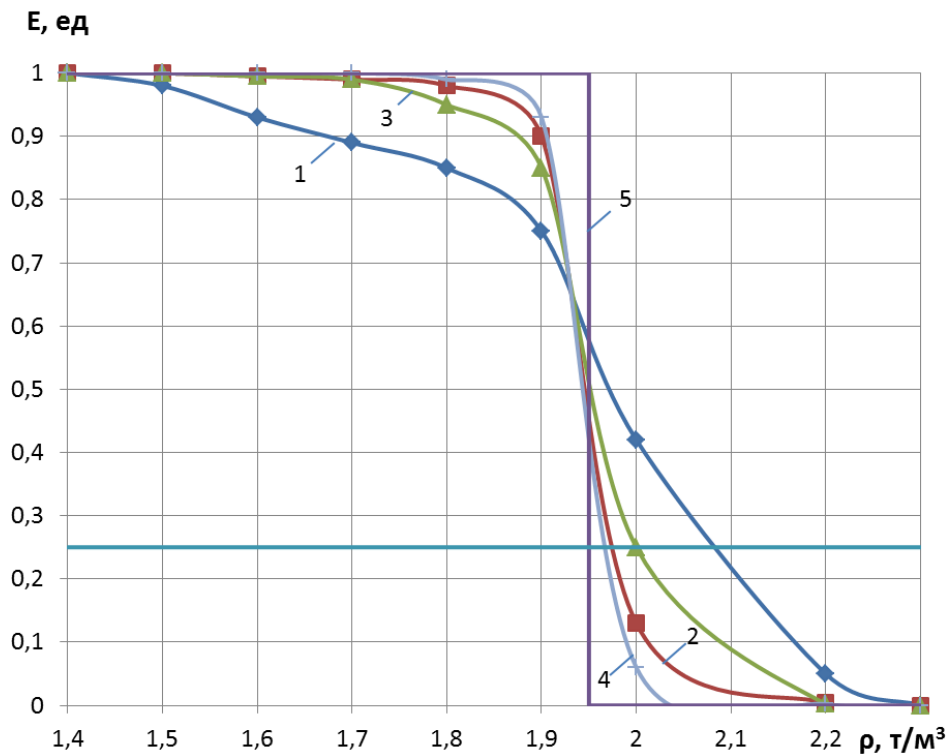


Рис. 3. Сепарационные характеристики обогащения крупного машинного класса в тяжелосреднем сепараторе СКВ-32:
1, 2, 3, 4 – номера опытов; 5 – теоретически

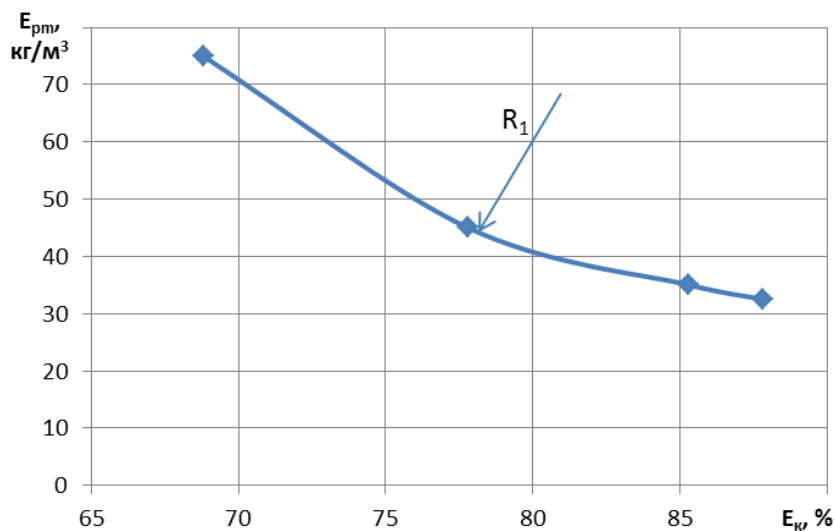


Рис. 4. Зависимость показателя $E_{рт.к}$ от показателя эффективности подготовки крупного машинного класса $E_{ПМК.к}$

Из рис. 4 следует, что эта зависимость носит обратноэкспоненциальный характер с незначительной кривизной (радиус кривизны большой), которая объясняется тем, что ограничение по крупности данного машинного класса осуществляется с одной (нижней) стороны.

Гравітаційна сепарація

Результаты работы гидравлических отсадочных машин при обогащении мелкого машинного класса и данные расчета показателей извлечения фракций плотности исходного материала в концентрат приведены в табл. 5. Показатель обогатимости мелкого машинного класса в опытах № 1, № 2, № 3 и № 4 соответственно 17,4; 16,2; 20,4 и 17,2%, т.е. «очень трудная». Крупность мелкого машинного класса в данных опытах примерно одинакова: средний диаметр составляет для опытов № 1, № 2, № 3 и № 4 соответственно 18,9; 23,9; 20,4 и 23,3 мм. Сепарационные характеристики разделения мелкого машинного класса в гидравлических отсадочных машинах ОМ-18 по данным опытам приведено на рис. 5.

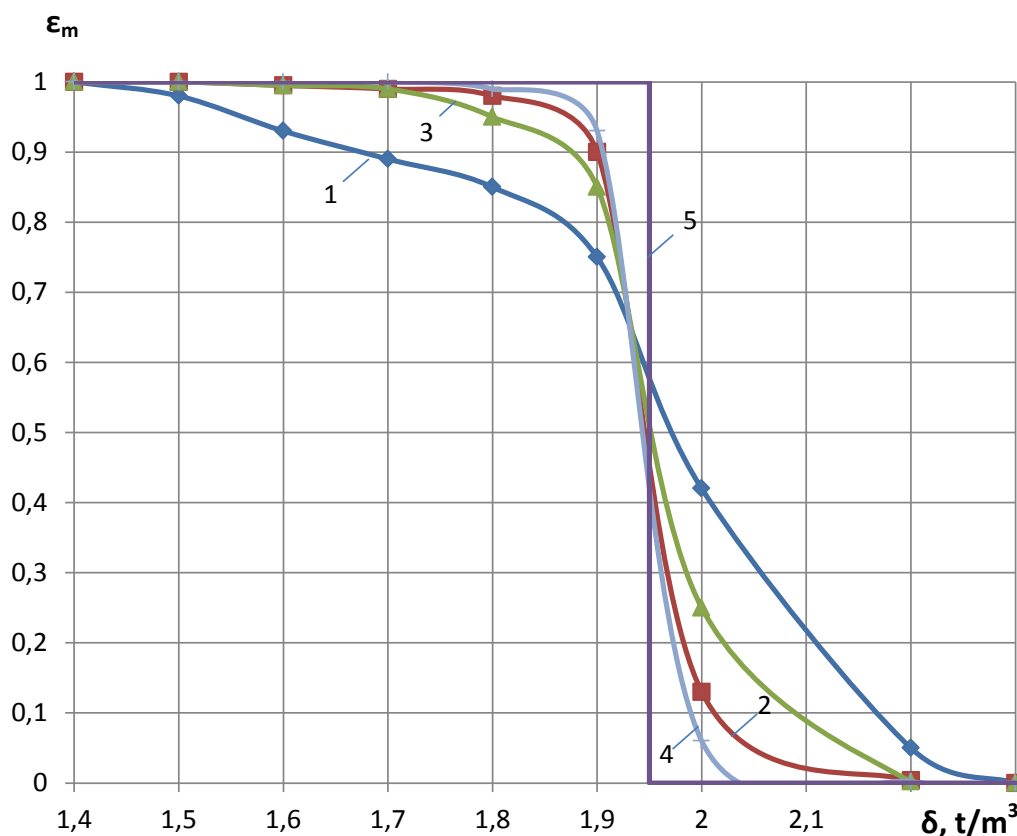


Рис. 5. Сепарационные характеристики обогащения мелкого машинного класса в гидравлической отсадочной машине ОМ-18:
1, 2, 3, 4 – номера опытов; 5 – теоретически

Из рис. 5 следует, что эффективность разделения мелкого машинного класса по плотности 1900 кг/м^3 составляет для опыта № 1 – $E_{pm} = 190 \text{ кг/м}^3$, № 2 – $E_{pm} = 75 \text{ кг/м}^3$, № 3 – $E_{pm} = 120 \text{ кг/м}^3$, № 4 – $E_{pm} = 60 \text{ кг/м}^3$.

Фракционный состав продуктов обогащения мелкого машинного класса
в гидравлической машине ОМ-18 на ЦОФ «Червоноградская»

Плотность фракций, т/м ³	Продукты								
	Исходный		Концентрат				Отходы		
	γ _и , %	А, %	γ _{пр.} , %	А, %	γ _и , %	ε _к	γ _{пр.} , %	А, %	γ _и , %
Опыт № 1									
- 1,3	22,9	4,2	43,7	4,1	22,0	0,96	1,8	6,6	0,9
1,3 – 1,5	15,3	8,2	27,4	8,0	13,8	0,90	3,0	10,0	1,5
1,5 – 1,7	4,5	27,0	7,2	24,7	3,6	0,80	1,8	36,2	0,9
1,7 – 1,8	4,4	40,4	5,8	35,6	2,9	0,65	3,0	49,7	1,5
1,8 – 1,9	4,0	48,6	4,0	42,4	2,0	0,50	4,0	54,8	2,0
1,9 – 2,0	3,4	54,2	2,4	48,3	1,2	0,36	4,4	57,4	2,2
2,0 – 2,2	9,8	71,8	4,0	62,7	2,0	0,20	15,7	74,1	7,8
+2,2	35,7	82,0	5,5	75,3	2,8	0,08	66,3	82,6	32,9
Итого	100,0	45,3	100,0	17,3	50,3		100,0	73,6	49,7
Опыт № 2									
- 1,3	29,2	7,2	50,1	7,2	29,2	1,0	0	0	0
1,3 – 1,5	19,5	8,9	32,1	8,4	18,7	0,96	1,9	20,6	0,8
1,5 – 1,7	5,8	30,4	8,9	29,8	5,2	0,90	1,4	35,7	0,6
1,7 – 1,8	3,6	36,7	5,2	34,6	3,0	0,83	1,4	47,2	0,6
1,8 – 1,9	2,5	46,6	2,2	42,7	1,3	0,52	2,9	50,8	1,2
1,9 – 2,0	3,2	56,9	1,2	54,3	0,7	0,22	6,0	57,6	2,5
2,0 – 2,2	6,8	75,3	0,3	71,7	0,2	0,03	15,8	75,4	6,6
+2,2	29,4	84,7	0	0	0	0	70,6	84,7	29,4
Итого	100,0	39,9	100,0	12,6	58,3		100,0	78,1	41,7
Опыт № 3									
- 1,3	26,7	8,1	43,0	8,0	26,0	0,98	1,8	11,7	0,7
1,3 – 1,5	22,8	13,4	35,1	13,2	21,2	0,93	4,0	16,1	1,6
1,5 – 1,7	10,1	28,0	14,4	27,0	8,7	0,86	3,5	34,2	1,4
1,7 – 1,8	2,6	38,0	3,3	37,6	2,0	0,77	1,5	39,3	0,6
1,8 – 1,9	2,3	45,4	2,0	43,3	1,2	0,52	2,8	47,7	1,1
1,9 – 2,0	2,0	57,8	1,0	52,6	0,6	0,30	3,5	60,0	1,4
2,0 – 2,2	5,6	73,8	0,5	68,3	0,3	0,05	13,4	74,1	5,3
+2,2	27,9	84,1	0,7	80,6	0,4	0,02	69,5	84,2	27,5
Итого	100,0	38,8	100,0	15,5	60,4		100,0	74,5	39,6
Опыт № 4									
- 1,3	32,8	7,3	50,93	7,3	32,8	1,0	0	0	0
1,3 – 1,5	20,2	9,6	30,75	9,5	19,8	0,98	1,12	17,5	0,4
1,5 – 1,7	7,8	29,2	11,51	29,0	7,41	0,95	1,09	33,0	0,39
1,7 – 1,8	3,2	37,8	4,47	37,1	2,88	0,90	0,90	44,1	0,32
1,8 – 1,9	2,6	44,7	1,97	40,3	1,27	0,49	3,74	48,9	1,33
1,9 – 2,0	2,3	56,2	0,28	52,8	0,18	0,08	5,96	56,5	2,12
2,0 – 2,2	6,4	74,4	0,09	68,3	0,06	0,01	17,81	74,5	6,34
+2,2	24,7	84,5	0	0	0	0	69,38	84,5	24,7
Итого	100,0	35,9	100,0	12,5	64,4		100,0	78,1	35,6

На рис. 6 приведена зависимость эффективности разделения по плотности

Гравітаційна сепарація

мелкого машинного класса от эффективности его подготовки, т.е. $E_{рт.м} = f(E_{ПМК.м})$, из которой следует, что с повышением эффективности подготовки мелкого машинного класса эффективность его обогащения увеличивается, т.е. $E_{рт.м}$ снижается.

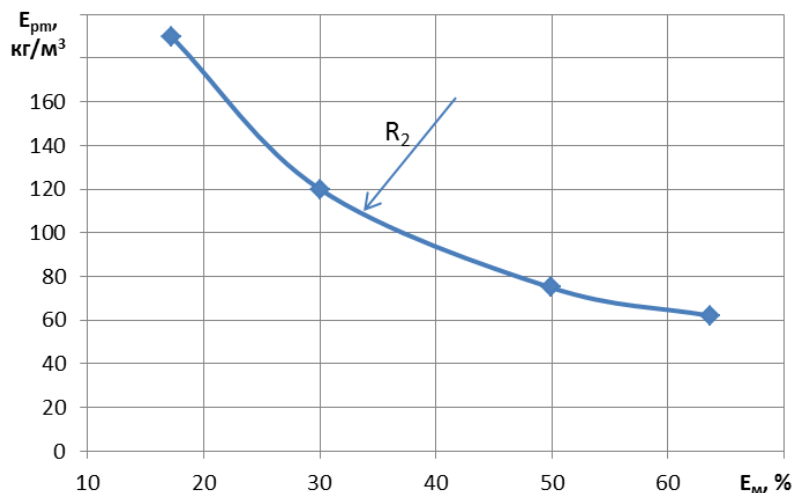


Рис. 6. Зависимость показателя $E_{рт.м}$ от показателя эффективности подготовки мелкого машинного класса $E_{ПМК.м}$

Данная зависимость носит обратную экспоненциальный характер, со значительной кривизной (малый радиус кривизны), которая объясняется тем, что ограничение по крупности данного машинного класса осуществляется с двух (верхней и нижней) сторон.

Таким образом, среднеквадратическое отклонение $E_{рт}$ гравитационного обогатительного процесса, определяемое его сепарационной характеристикой, обратно экспоненциально показателю эффективности подготовки по крупности и влажности соответствующего машинного класса угля, при этом величина радиуса обратной экспоненциальной кривой зависит от количества ограничений по крупности машинного класса: при одностороннем ограничении она больше, чем при двухстороннем.

Для сравнения полученных фактических данных $E_{рт}$ с данными $E_{рт}$, которые можно получить по уравнению (11), выполним расчет $E_{рт}$ для обогащения крупного и мелкого машинных классов, гранулометрический состав которых приведен в табл. 2 и плотности разделения 1900 кг/м³. При этом используем данные табл. 1 – 5.

Согласно [10] максимальная паспортная характеристика по нагрузке сепаратора СКВ – 32 составляет $Q_{п} = 300$ т/ч, с учетом коэффициента неравномерности 1,2 номинальная нагрузка составит $Q_{н} = 250$ т/ч, отсадочной машины ОМ-18 для мелкого машинного класса $Q_{п} = 300$ т/ч, т.е. $Q_{н} = 250$ т/ч,

В табл. 6 приведен расчет необходимых данных для формулы (11) (на основе данных табл. 1 – 5). При этом значение A и B составляют соответственно – 1300 и 13 для тяжелосредних сепараторов и 1000 и 2,4 для гидравлических отсадочных машин (табл. 1).

Исходные данные для расчета

Средний диаметр класса, мм	Выход, %			
	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4
Крупный машинный класс				
75	20,57	27,91	20,95	27,93
37,5	24,19	27,54	28,32	25,19
22,5	11,75	13,81	13,93	13,32
17,5	8,27	10,82	10,47	12,70
14,0	5,59	8,53	7,27	10,64
Итого	70,37	88,61	80,94	89,78
$d_{cp.>}$, мм	41,7	42,3	39,9	41,3
11,5	14,42	9,01	9,81	8,19
8,0	10,79	0,89	5,74	0,71
4,5	3,19	0,70	2,42	0,42
2,0	0,26	0,22	0,29	0,35
0,5	0,97	0,57	0,80	0,55
Итого	29,63	11,39	19,06	10,22
$d_{cp.<}$, мм	9,0	10,1	9,0	10,1
α , %	62,4	49,6	56,2	50,3
C_1	1,545	0,684	0,812	0,629
C_2	1,139	1,295	1,394	1,315
C	1,760	0,886	1,132	0,827
$E_{ПМК}$, %	57,1	78,3	70,4	80,9
E_o , %	76,6	90,1	86,3	91,1
$E_{рт}$, кг/м ³	76,7	35,1	46,2	33,0
$E_{факт\ рт}$, кг/м ³	75,0	35,0	45,0	32,5
% ошибки	2,21	0,29	2,67	1,54
Мелкий машинный класс				
22,5	0,79	0,20	0,49	–
17,5	1,93	0,64	1,33	0,36
14,0	3,07	1,35	2,76	0,95
11,5	16,63	11,91	14,24	14,64
8,0	29,50	30,40	26,18	32,59
4,5	20,85	32,22	31,73	29,41
2,0	9,81	15,21	14,58	16,31
Итого	82,58	91,93	91,31	94,26
α , %	22,06	17,65	–	–
$d_{cp.>}$, мм	7,7	6,4	6,8	6,5
0,5	17,42	8,07	8,69	5,74
Итого	17,42	8,07	8,69	5,74
$d_{cp.<}$, мм	0,5	0,5	0,5	0,5
α , %	22,06	17,65	13,4	18,36
C_1	1,197	0,591	1,298	0,557
C_2	1,058	0,838	0,606	0,720
C	0,208	0,495	0,787	0,401
$E_{ПМК}$, %	10,1	34,8	19,3	46,0
E_o , %	39,6	58,9	50,1	63,1
$E_{рт}$, кг/м ³	186,9	76,1	118,0	60,6
$E_{факт\ рт}$, кг/м ³	190,0	75,0	120,0	60,0
% ошибки	1,63	1,47	1,67	1,00

Гравітаційна сепарація

Процент ошибки при определении E_{pm} по формуле (11) для крупного машинного класса составляет 0,29 – 2,67%, для мелкого – 1,0 – 1,67%, т.е. меньше 5%, что рекомендует формулу (11) для применения при расчетах эффективности процессов гравитационного обогащения угля.

Относительная разница Δ между максимальными и минимальными значениями E_{pm} при повышении эффективности подготовки машинных классов с минимальных до максимальных значений составляет:

– для тяжелосреднего сепаратора

$$\Delta_M = \frac{E_{pm.к. max} - E_{pm.к. min}}{E_{ПМК.к. max} - E_{ПМК.к. min}} = \frac{90 - 32,5}{80,9 - 58,1} = 2,42 \frac{\text{кг/м}^3}{\%}, \quad (12)$$

где $E_{pm.к. max}$, $E_{pm.к. min}$ – максимальное и минимальное значение E_{pm} , полученные при обогащении крупного машинного класса, кг/м^3 ;
 $E_{ПМК.к. max}$, $E_{ПМК.к. min}$ – максимальное и минимальное значение $E_{ПМК}$ при подготовке крупного машинного класса, %;

– для отсадочной машины

$$\Delta_M = \frac{E_{pm.м. max} - E_{pm.м. min}}{E_{ПМК.м. max} - E_{ПМК.м. min}} = \frac{190 - 60}{46,0 - 10,1} = 3,62 \frac{\text{кг/м}^3}{\%}, \quad (13)$$

где $E_{pm.м. max}$, $E_{pm.м. min}$ – максимальное и минимальное значение E_{pm} , полученные при обогащении мелкого машинного класса, кг/м^3 ;
 $E_{ПМК.м. max}$, $E_{ПМК.м. min}$ – максимальное и минимальное значение $E_{ПМК}$ при подготовке мелкого машинного класса, %.

Следовательно, при постоянной плотности разделения с уменьшением крупности машинного класса относительная разница между максимальным и минимальным значениями E_{pm} при повышении эффективности подготовки машинного класса увеличивается.

Выводы

1. Эффективность гравитационного обогащения машинного класса зависит от качества его подготовки из рядового угля.

2. Предложено оценивать качество подготовки машинного класса к гравитационному обогащению показателем $E_{ПМК}$, который учитывает как эффективность грохочения, так и эффективность обезвоживания.

3. Величина среднеквадратического отклонения E_{pm} гравитационного обогащения машинного класса угля имеет обратнoэкспоненциальную зависимость от показателя эффективности его подготовки по крупности и влажности и достигает своего минимального значения при $E_{ПМК} \rightarrow 100\%$.

4. Минимальные значения E_{pm} , которые могут быть достигнуты при обогащении крупного машинного класса в тяжелосредних сепараторах и мелкого машинного класса в гидравлических отсадочных машинах составляют, соответственно, 20 кг/м³ и 40 кг/м³. Эти значения позволяют устанавливать требования к усовершенствованию этих технологических процессов.

5. При постоянной плотности разделения с уменьшением крупности машинного класса относительная разница между максимальным и минимальным значениями E_{pm} при повышении эффективности подготовки машинного класса увеличивается.

Список литературы

1. Шевченко А.И. Интенсификация разделения по крупности и обезвоживание минерального сырья при новом способе вибрационного грохочения / А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 34(95). – С. 157-167.
2. Полулях А.Д. Грохочение угля / А.Д. Полулях, Д.А. Полулях. – Днепро: НГУ, 2017. – 352 с.
3. Гірничий енциклопедичний словник, Т.1 / За загальною ред. В.С. Білецького. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2001. – 512 с.
4. Пилов П.И. Уточненная оценка эффективности гравитационной сепарации каменных углей / П.И. Пилов, В.А. Святошенко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 25(66) – 26(67). – С. 27-33.
5. Справочник по обогащению углей / под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, И.С. Зарубина. – М: Недра, 1984. – 614 с.
6. Прейгерзон Г.И. Обогащение угля / Г.И. Прейгерзон. – М.: Недра, 1969. – 472 с.
7. Андреев Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых // Е.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра, 1980. – 465 с.
8. Кизельватер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения / Б.В. Кизельватер. – М.: Недра, 1979. – 205 с.
9. Техническая помощь в пуске, наладке и отработке режимов эксплуатации технологического оборудования ЦОФ «Червоноградская»: Отчет о НИР / Под рук. В.С. Бутовецкого. – Ворошиловград: Укрнииуглеобогачение, 1980. – 219 с.
10. Артюшин С.П. Обогащение углей / С.П. Артюшин. – М.: Недра, 1975. – 384 с.

© Полулях А.Д., Полулях Д.А., 2019

*Надійшла до редколегії 13.12.2018 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*