

**А.А. БЕРЕЗНЯК**, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

**Д.П. ГОЛИК**

(Украина, Павлоград, ЦОФ "Павлоградская"),

**Е.А. БЕРЕЗНЯК**

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ УГЛЕЙ**

Центрифугирование является наиболее эффективным с энергетической точки зрения способом обезвоживания мелких угольных концентратов, крупность которых находится в пределах от 0,2 до 13 мм. Для правильного выбора оборудования необходима математическая модель, позволяющая определить конечную влажность концентратов в зависимости от фактора разделения и времени центрифугирования.

### *Характеристика исходных продуктов*

Исследование обезвоживания центрифугированием осуществлялось на пробах крупных и мелких угольных концентратов, полученных из углей следующих шахт: "Благодатная"; "Героев космоса"; "Павлоградская"; "Терновская".

Гранулометрические характеристики крупных и мелких концентратов представлены в таблицах 1 и 2.

Анализ таблиц показывает, что крупные концентраты содержат частицы размером менее 1 мм в количестве от 0,93% (ш. "Благодатная") до 3,5% (ш. "Терновская"), причем в этом продукте содержится около 20% частиц размером менее 40 мкм.

Мелкие концентраты содержат частицы крупностью менее 0,25 мм в значительных количествах: шахты "Благодатная" и "Героев космоса" – около 25%, при этом 12% из них составляет класс -40 мкм, а шахты "Павлоградская" и "Терновская" – 41%, при этом количество класса -40 мкм в них составляет более 20%.

Таблица 1

### Гранулометрическая характеристика концентратов

Выхода классов крупности концентратов -13+1 мм шахт, %:

Класс крупности, мм	Благодатная	Героев космоса	Благодатная + Героев космоса	Павлоградская	Терновская
+10	36,55	16,20	30,79	46,30	34,41
-10+7	17,92	16,21	18,97	16,22	17,25
-7+5	13,54	17,03	15,22	12,50	12,49
-5+2	25,90	40,11	28,39	19,61	26,94
-2+1	5,17	8,92	4,09	2,26	5,32
-1+0	0,93	1,53	2,54	3,11	3,59
Итого:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Таблиця 2

Гранулометрическая характеристика мелких концентратов				
Выхода классов крупности мелких концентратов шахт, %:				
Класс крупности, мм	Благодатная	Героев космоса	Павлоградская	Терновская
+1	31,37	27,78	21,58	31,98
-1+0,5	27,29	30,32	22,15	31,00
-0,5+0,25	14,91	16,20	15,11	20,63
-0,25+0,1	6,65	7,54	10,12	6,42
-0,1+0,04	5,09	5,91	9,48	5,13
-0,04	14,69	12,24	21,56	4,83
Итого:	100,00	100	100,00	100,00

Продукт крупностью менее 40 мкм состоит преимущественно из глинистых гидрофильных частиц, которые могут удерживаться на поверхности крупных частиц за счет адгезии, увеличивая их гидрофильность.

Для лабораторных исследований обезвоживания в центрифугах использовались концентраты крупностью -13+1 и -1+0 мм, а также фракции классов крупности всех концентратов, полученные в результате ситового анализа.

Центрифугирование осуществлялось в стаканчиках диаметром 28 мм и высотой 60 мм, дно которых выполнено из сетки. Размер ячеек сетки в стаканчиках равнялся 250 мкм. В ротор центрифуги одновременно вставлялись два стаканчика, вес которых вместе с материалом должен отличаться менее чем на один грамм.

*Методика проведения экспериментов* включала следующие этапы:

- подготовку исходных проб угля. Для наилучшего усреднения и уменьшения погрешности измерения подготовка исходных проб угля осуществлялась методом квартования;
- взвешивание сухого материала. Стаканчики заполнялись одинаковым количеством материала приблизительно на 3/4 объема;
- насыщение материала водой осуществлялось медленным их опусканием в воду, которая просачивалась через сетчатое дно. Медленное погружение необходимо для предотвращения появления в материале захваченных пузырьков воздуха. Уровень воды поддерживался несколько выше уровня материала в течение около 60 секунд;
- дренирование влажного материала проводилось в течение от 30 секунд до 2 минут, в зависимости от его крупности, причем стаканчики устанавливались на гидрофильную влажную салфетку, которая впитывала избыток влаги;
- взвешивание влажного материала проводилось на электронных весах с чувствительностью 1 мг. Для предотвращения перераспределения влаги между мокрым стаканчиком и поверхностью весов он устанавливался на специальную гидрофобную опору, которой касался в трех точках;
- центрифугирование материала проводилось в течение 30 секунд в лабораторной центрифуге. Частота вращения ротора изменялась ступенчато: 1000, 1500 и 3000 об/мин. Диаметр ротора равен 23 см. Центробежная сила на

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

радиусе, проходящем через середину центрифугируемого материала, соответствовала факторам разделения (числам Фруда) 111, 250, 1000;

- последовательное взвешивание материала после каждого периода центрифугирования;
- обработка полученных результатов.

Необходимое и достаточное время центрифугирования образцов определилось из графика кинетики обезвоживания при наименьшем факторе разделения, представленном на рисунке 1.

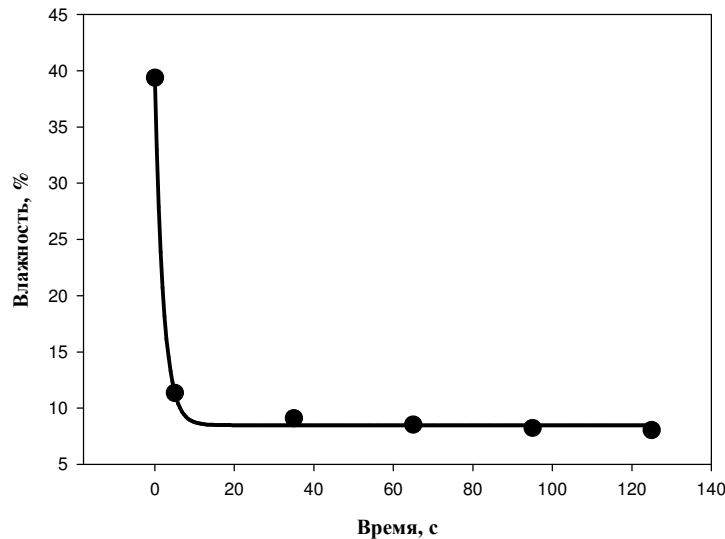


Рис. 1. Зависимость влажности класса крупности -0,5+0,25 мм угля ш. Павлоградская от времени при  $Fr = 111$

Экспериментальные данные аппроксимировались экспоненциальным уравнением вида:

$$W = W_{\kappa} + W_0 e^{-bt},$$

где  $W$  – влажность материала при времени центрифугирования  $t$ , %;  $W_{\kappa}=8,485\%$  – конечная влажность материала при центрифугировании в течение двух минут;  $W_0=30,885\%$  – разность между начальной и конечной влажностями;  $b=0,4752$  – коэффициент.

Коэффициент остается постоянным при различных факторах разделения, от величины которых зависит конечная влажность осадка.

Преобразуя уравнение, получим выражение, в которое входят только начальная и конечная влажности:

$$W = W_n e^{-bt} + W_{\kappa} (1 - e^{-bt}),$$

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

где  $W_n$  – начальная влажность осадка, %.

Согласно этому уравнению можно рассчитать влажность осадка при заданных времени обезвоживания и факторе разделения.

Из рисунка 1 следует, что центрифугирование материала при факторе разделения  $Fr=111$  в течение 30 с вполне достаточно и практически обеспечивает достижение равновесной влажности осадка. При больших значениях фактора разделения равновесие устанавливается за более короткое время.

Экспериментальные результаты зависимости влажности осадка от фактора разделения аппроксимировались экспоненциальным уравнением, подобным уравнению кинетики обезвоживания, с погрешностью менее 2%. Уравнение имеет вид:

$$W = W_k + (W_n - W_k)e^{-b_f Fr},$$

где  $W_n$  и  $W_k$  – начальная и конечная влажности осадка соответственно, %;  $Fr$  – фактор разделения;  $b_f$  – коэффициент, определяемый из аппроксимирующих кривых.

Усредненные значения коэффициента  $b_f$  равны 0,0212 для крупных классов +1 мм и 0,019 для мелких -1+0 мм.

Объединяя уравнения зависимости влажности осадка от времени центрифугирования и фактора разделения, получим окончательное выражение:

$$W = W_k + (W_n - W_k)e^{-b_f Fr} + (W_n - W_k + (W_n - W_k)e^{-b_f Fr})e^{-bt}.$$

### *Анализ обезвоживания угольных концентратов в центрифуге HSG 1100*

Большой и меньший диаметры корзины центрифуги равны 1080 и 715 мм, а ее высота – 725 мм. Средний диаметр равен 898 мм, а длина образующей боковой поверхности, по которой движется материал, равна 748 мм. Число оборотов ротора равно 391 об/мин. Толщина слоя материала на поверхности ротора от 40 до 70 мм. Принимаем толщину слоя в средней части равной 60 мм.

При таких условиях фактор разделения равен 76,67, а время обезвоживания материала составляет 1,07 с.

Результаты расчетов влажности концентратов -13+1 мм для каждой шахты по классам крупности представлены в таблице 3.

Для каждой шахты выделены 3 колонки. В первой приведены расчетные значения влажностей при настоящих условиях обезвоживания. Вор второй – суммарные влажности, определенные как средневзвешенное значение. В третьей колонке приведены влажности, которые можно получить при данном факторе разделения и времени центрифугирования в течение 60 с.

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

*Таблиця 3*

Влажності продуктів при факторі розділення 76,69 і часі обезвоживання 1,07 с

Клас крупності, мм	Влажність, % при $Fr = 76,69$ і часі обезвоживання 1,07 с					
	ш. Благодатная			ш. Героев космоса		
	Центрифуга HSG 1100	Суммарная по "+"	Минимально возможная	Центрифуга HSG 1100	Суммарная по "+"	Минимально возможная
-13+10	12,09	12,09	6,45	8,26	8,26	4,41
-10+7	13,75	12,64	7,93	12,00	10,13	5,58
-7+5	16,05	13,32	8,63	13,19	11,19	6,45
-5+2	20,51	15,30	10,12	19,75	15,02	8,38
-2+1	34,89	16,32	10,89	32,30	16,59	10,41
-1+0	37,27	16,52	13,60	35,98	16,88	13,58
Итого:	16,52		8,26	16,88		7,21

*Продолжение табл. 3*

Клас крупності, мм	Влажність, % при $Fr = 76,69$ і часі обезвоживання 1,07 с					
	ш. Благодатная + Героев космоса			ш. Павлоградская		
	Центрифуга HSG 1100	Суммарная " по +"	Минимально возможная	Центрифуга HSG 1100	Суммарная " по +"	Минимально возможная
-13+10	9,36	9,36	5,62	8,19	8,19	3,99
-10+7	12,44	10,53	6,81	13,44	9,56	7,17
-7+5	15,40	11,68	7,92	16,33	10,69	8,31
-5+2	21,41	14,63	9,72	22,37	13,11	10,44
-2+1	28,39	15,21	11,88	34,05	13,60	11,84
-1+0	37,53	15,78	15,12	39,24	14,39	14,81
Итого:	15,78		7,86	14,39		6,83

*Окончание табл. 3*

Клас крупності, мм	Влажність, % при $Fr = 76,69$ і часі обезвоживання 1,07 с		
	ш. Терновская		
	Центрифуга HSG 1100	Суммарная " по +"	Минимально возможная
-13+10	7,82	7,82	3,00
-10+7	10,72	8,79	4,64
-7+5	11,72	9,36	5,37
-5+2	20,92	12,78	7,57
-2+1	34,20	13,96	9,85
-1+0	36,58	14,78	13,28
Итого:	14,78		5,55

Долевое участие в шихте шахт Благодатная, Героев космоса, Павлоградская и Терновская составляет 35,5; 45,0; 18,2; 0,9% соответственно. При таком соотношении расчетная влажность суммарного концентрата равна 15,0%. Из кинетики обезвоживания, представленной на рис. 1, следует, что основная масса воды удаляется в первые несколько секунд. Далее влага удаляется медленно и после 60 секунд центрифугирования достигает наименьшего значения. Если суммарный концентрат центрифугировать при факторе разделения  $Fr=76,69$  в течение этого времени, можно снизить влажность до минимальной величины 7,7%. Однако, при таком длительном обезвоживании производительность цен-

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

трифуги будет чрезвычайно малой.

Согласно технологической схеме, влажность продукта, поступающего на обезвоживание в центрифугу HSG 1100, равна 18%. Для этого случая зависимость влажности концентрата от времени в течение первых трех секунд обезвоживания представлена на рис. 2.

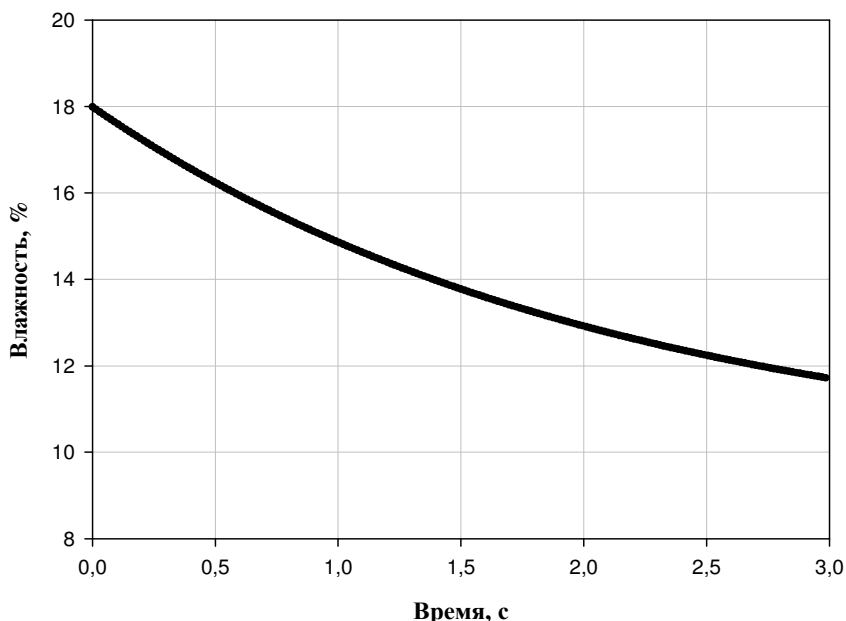


Рис. 2. Зависимость влажности крупного концентрата от времени обезвоживания

Фактор разделения, равный числу Фруда, прямо пропорционален квадрату частоты вращения ротора и его диаметру.

Диаметр ротора есть неизменная конструктивная величина. Из паспортных данных на центрифугу следует, что максимальное число оборотов ротора равно 410 об/мин. При этом фактор разделения в среднем сечении ротора будет равен 83,86, а влажность снизится на 3,6% с 17,14% до 16,68%.

### *Параметры обезвоживания мелких концентратов*

Результаты центрифугирования мелких классифицированных на узкие классы крупности угольных концентратов при различных факторах разделения представлены в таблицах 4-6. В этих таблицах в итоговых строках приведены экспериментальные результаты центрифугирования исходных мелких концентратов. Приведенные результаты являются усредненными из серии опытов. В некоторых случаях отклонения от среднего значения превышали 2%. Такие значительные отклонения можно объяснить как случайным распределением зерен угля в стаканчике, так и возможным захватом воздушных пузырьков при смачивании материала.

Экспериментальные данные центрифугирования неклассифицированных исходных мелких угольных концентратов при различных факторах разделения

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

приведены в таблице 7.

Таблица 4

Центрифугирование мелких концентратов при факторе разделения $Fr=111$				
Класс крупности, мм	Влажность, %			
	ш. Благодатная	ш. Героев космоса	ш. Павлоградская	ш. Терновская
+1	13,14	12,81	11,21	11,93
-1+0,5	15,62	16,82	12,70	14,14
-0,5+0,25	17,27	19,18	17,12	16,69
-0,25+0	24,16	30,18	38,73	28,58
Итого:	17,35	19,52	23,76	16,32

Таблица 5

Центрифугирование мелких концентратов при факторе разделения $Fr=250$				
Класс крупности, мм	Влажность, %			
	ш. Благодатная	ш. Героев космоса	ш. Павлоградская	ш. Терновская
+1	11,43	11,71	8,92	9,71
-1+0,5	13,49	14,86	10,52	11,58
-0,5+0,25	14,98	16,75	14,77	14,69
-0,25+0	21,83	26,10	34,46	26,51
Итого:	15,27	17,18	20,67	14,07

Таблица 6

Центрифугирование мелких концентратов при факторе разделения $Fr=1000$				
Класс крупности, мм	Фактор разделения $Fr=1000$			
	ш. Благодатная	ш. Героев космоса	ш. Павлоградская	ш. Терновская
+1	9,71	10,43	7,48	8,24
-1+0,5	11,04	13,02	9,12	9,46
-0,5+0,25	13,28	15,04	11,62	12,86
-0,25+0	19,53	20,42	25,17	25,38
Итого:	13,20	14,53	15,75	12,38

Таблица 7

Центрифугирование исходных угольных концентратов крупностью -1 мм				
Шахта	Влажность, %			
	$Fr=0$	$Fr=111$	$Fr=250$	$Fr=1000$
Благодатная	34,31	17,18	15,27	13,20
Героев космоса	31,71	19,52	17,18	14,53
Павлоградская	40,09	23,76	20,67	15,75
Терновская	37,83	15,67	14,07	12,38

### *Анализ обезвоживания угольных концентратов в центрифуге ОФЦ 40×72*

Диаметр фильтрующей части ротора центрифуги 40×72 равен 1 м. При частоте вращения ротора 940 об/мин фактор разделения равен 494. Используя данные о влажности концентрата из технологической схемы и объединенное уравнение зависимости влажности от времени и фактора разделения, было рассчитано время обезвоживания, которое составило 3,1с.

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Результаты расчетов влажности концентратов для каждой шахты по классам крупности представлены в таблице 8.

Как и для крупных концентратов, для каждой шахты выделены 3 колонки. В колонках приведены расчетные значения влажностей при обезвоживании в промышленных условиях, суммарные влажности, определенные как средневзвешенное значение и расчетные влажности, которые можно получить при данном факторе разделения и времени центрифугирования в течение 60 с.

Таблица 8

Влажности продуктов при факторе разделения 494 и времени обезвоживания 3,1 с

Класс крупности, мм	Влажность, % при $Fr=494$ и времени обезвоживания 3,1 с					
	ш. Благодатная			ш. Героев космоса		
	Центрифуга 40x72	Суммарная по "+"	Минимально возможная	Центрифуга 40x72	Суммарная по "+"	Минимально возможная
-3+1	16,88	16,88	9,96	17,10	17,10	10,66
-1+0,5	18,20	17,49	11,29	20,07	18,65	13,27
-0,5+0,25	20,05	18,01	13,52	21,59	19,29	15,27
-0,25+0	25,02	19,86	19,72	26,03	21,02	20,62
Итого:	19,86		13,43	21,02		14,75

Продолжение табл. 8

Класс крупности, мм	Влажность, % при $Fr=494$ и времени обезвоживания 3,1 с					
	ш. Павлоградская			ш. Терновская		
	Центрифуга 40x72	Суммарная по "+"	Минимально возможная	Центрифуга 40x72	Суммарная по "+"	Минимально возможная
-3+1	13,95	13,95	7,71	14,95	14,95	8,47
-1+0,5	15,23	14,60	9,33	16,49	15,71	9,70
-0,5+0,25	17,63	15,38	11,83	20,10	16,79	13,11
-0,25+0	29,28	21,10	25,31	29,94	18,95	25,54
Итого:	21,10		15,94	18,95		12,61

При долевом участии в шихте шахт Благодатная, Героев космоса, Павлоградская и Терновская 35,5; 45,0; 18,2; 0,9% соответственно расчетная влажность суммарного концентрата составит 20,6%. Если при факторе разделения, равном 494, центрифугировать суммарный концентрат в течение 60 с, то можно снизить его влажность до 14,48%.

Исходная влажность мелкого концентрата, определенная в лабораторных условиях, равна 34,22%. Для этого случая зависимость влажности мелкого концентрата от времени в течение первых пяти секунд обезвоживания представлена на рис. 3.

Снижение влажности возможно при уменьшении нагрузки на центрифугу. Качественно можно считать, что уменьшение производительности в два раза равносильно такому же увеличению времени центрифугирования и, согласно рис. 3, влажность осадка уменьшится до 16%.



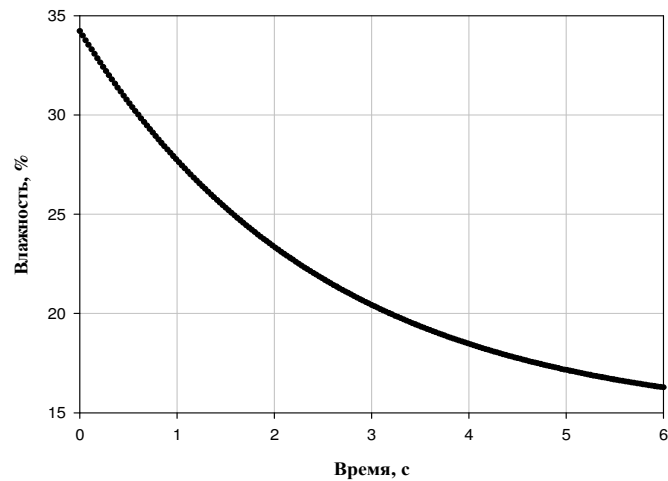


Рис. 3. Залежність вологості мелкого концентрата від часу обезвоживання

### *Выводы*

Остаточная влажность, полученная в результате обезвоживания углей центрифугированием, зависит не только от гранулометрического состава осадка, но также и от степени метаморфизма углей.

Полученное общее уравнение зависимости влажности продуктов центрифугирования углей от времени и фактора разделения позволяет прогнозировать конечную влажность концентратов в зависимости от состава шихты и ее гранулометрической характеристики.

© Березняк А.А., Голик Д.П., Березняк Е.А., 2015

*Надійшла до редколегії 22.03.2015 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*