

Ю.К. Гаркушин, канд. техн. наук, В.С. Белецкий, д-р. техн. наук,  
П.В. Сергеев, канд. техн. наук

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕДЕЛЫ ВЛАЖНОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ОБЕЗВОЖИВАНИИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Запропонована енергетична гіпотеза, яка інтерпретує процес механічного зневоднення. Теоретично показано, що раціональні межі вмісту вологи при механічному зневодненні визначаються областю перегибу кривої “енергія вологовидалення – товщина водної плівки” і відповідають максимальній молекулярній вологоємності (ММВ).

**Ключові слова:** механічне зневоднення, енергія видалення вологи, водна плівка, максимальна молекулярна вологоємність.

Предложена энергетическая гипотеза, интерпретирующая процесс механического влагоудаления. Теоретически показано, что рациональные пределы влажности при механическом обезвоживании мелкодисперсных материалов определяются областью перегиба кривой “энергия влагоудаления - толщина водной пленки” и соответствуют максимальной молекулярной влагоемности (ММВ).

**Ключевые слова:** механическое обезвоживание, энергия влагоудаления, водная пленка, максимальная молекулярная влагоемность.

В теории и практике обезвоживания мелкозернистых материалов существует ряд исследований, посвященных параметрам, которые определяют предел влажности материалов при их механическом обезвоживании [1-4]. Однако, в большинстве случаев вопрос решается эмпирически путем исследования, главным образом, факторов, влияющих на процесс. Достаточного теоретического обоснования рациональных пределов влажности материалов при механическом обезвоживании нет. Единственной успешной попыткой обоснования механически неудаляемой влаги можно считать введение понятия максимальной молекулярной влагоемности (ММВ) [2,3], которая опять таки определяется экспериментально.

Рассмотрим реальность ситуации, когда ММВ соответствует количеству механически неудаляемой пленочной влаги на угольной поверхности. Так как реальные угольные поверхности имеют различную степень гидрофобности, то на их поверхности следует ожидать возникновения устойчивых толстых ( $h_{nl} > 100$  нм, сильно гидратированная поверхность), метастабильных  $\beta$ -пленок ( $h_{nl} = 10 - 100$  нм) и термодинамически устойчивых  $\alpha$ -пленок ( $h_{nl} = 1 - 10$  нм).

Для удельного объема влаги ( $\text{м}^3/\text{г}$ ) можно записать:

$$V_{y\partial} = S_{y\partial} \cdot h_{\beta} \quad (1)$$

где  $S_{y\partial}$  - удельная поверхность угля по БЭТ,  $\text{м}^2/\text{г}$ ;  $h_{\beta}$  - толщина  $\beta$ -пленки, м.

По нашим экспериментальным данным, которые хорошо согласуются с [5] для донецких углей марок Г, Ж, К, ОС и крупностью менее 0,1-0,2 мм  $S_{y\delta} = 1-2,8 \text{ м}^2/\text{г}$ . По [6] толщина  $\beta$ -пленки равна 10-100 нм. Примем для расчета среднее значение в этом интервале  $h_{\beta}=70 \text{ нм}$ . Тогда:  $V_{y\delta} = S_{y\delta} h_{\beta} = (1-2,8) \cdot 10^6 \cdot 0,7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г} = (0,07-1,96) \text{ см}^3/\text{г}$ . Для влажности угля :  $W = 100 \cdot V_{y\delta} \cdot \rho_{\beta} = 100 \cdot (0,07-1,96) \cdot 1,25 = 8,75-24,5 \%$ . Здесь  $\rho_{\beta} = 1,25 \text{ г/см}^3$  - удельный вес воды в тонкой пленке по [1]. Для этих же углей по данным [1] экспериментально определяемая ММВ колеблется в пределах 10,8-28,5%. Это соответствует  $h_{\beta} = 80 \text{ нм}$ .

Таким образом, порядок расчетных значений влажности угля с  $\beta$ -пленкой отвечает пределу влажности механически неудаляемой влаги ММВ. Отсюда можно предположить, что максимальная молекулярная влагоемкость тонкодисперсных углей представлена влагой  $\alpha$  и  $\beta$ -пленок.

В работах [7,8] сделана попытка оценки энергии влагоудаления в отдельных технологических процессах. Нами предлагается интегральный подход к определению энергии механического влагоудаления. В общем случае суммарная энергия влагоудаления может быть представлена как сумма следующих слагаемых:

$$E_{\text{в}} = E_{m\beta} + E_p^{ad} + E_p^{\kappa} \quad (2)$$

где  $E_{m\beta}$  – энергия, затрачиваемая на течение водной пленки по поверхности зерен обезвоживаемого материала;  $E_p^{ad}$  и  $E_p^{\kappa}$  – соответственно энергия адгезионного и когезионного разрыва водных пленок.

Энергия  $E_{m\beta}$  равна кинетической энергии слоя жидкости, которая течет по угольной поверхности:

$$E_{m\beta} = 0,5 \cdot V_{\beta}^2 \cdot m_{\beta} , \quad (3)$$

где  $V_{\beta}$  и  $m_{\beta}$  – соответственно скорость и масса воды на поверхности зерна.

С учетом гидрофобно-гидрофильной мозаичности угольной поверхности и допуская наличие адгезионного разрыва на гидрофобных участках и когезионного на гидрофильных для  $E_p^{ad}$  и  $E_p^{\kappa}$  можно записать:

$$E_p^{ad} = \sigma_{\text{жсг}} \cdot (1 + \cos \theta) \cdot S_{\text{гф}} \quad (4)$$

$$E_p^{\kappa} = 2 \cdot \sigma_{\text{жсг}} \cdot S_{\text{гф}} , \quad (5)$$

где  $\sigma_{жсг}$  – поверхностное натяжение на границе “жидкость-газ” ;  $\theta$  - краевой угол смачивания;  $S_{гфo}$  и  $S_{гфu}$  – соответственно площади гидрофобных и гидрофильных участков на угольной поверхности.

Подставляя выражения (3)-(5) в уравнение (2) для  $E_{гy}$  получим:

$$E_{гy} = 0,5 \cdot V_{г}^2 \cdot m_{г} + \sigma_{жсг} \cdot (1 + \cos \theta) \cdot S_{гфo} + 2 \cdot \sigma_{жсг} \cdot S_{гфu} \quad (6)$$

Практическую ценность представляет удельная величина  $E_{гy}$  на единицу массы удаляемой влаги. Введем коэффициент гидрофобности поверхности  $K_{г} = \frac{S_{гфo}}{S_{oбц}}$ , где  $S_{oбц} = S_{гфo} + S_{гфu}$ .

Тогда с учетом того, что  $m_{г} = \rho_{г} \cdot S_{oбц} \cdot h_{nл}$ , где  $\rho_{г}$  – плотность воды,  $h_{nл}$  – толщина водной пленки на угольной поверхности, после преобразований для  $E_{гy}$  имеем:

$$E_{гy} = 0,5 \cdot V_{г}^2 + \sigma_{жсг} \cdot \frac{(1 + \cos \theta) \cdot K_{г}}{\rho_{г} \cdot h_{nл}} + \frac{2 \cdot \sigma_{жсг}}{\rho_{г} \cdot h_{nл}} \cdot (1 - K_{г}) \quad (7)$$

Проанализируем полученное выражение. Исходя из исследований [7,8], а также учитывая нормальные условия проведения экспериментов, примем:  $V_{г} = 1$  м/с ;  $\sigma_{жсг} = 72,8$  мН/м ;  $\theta = 0 - 90^{\circ}$  ;  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> ;  $h_{nл} = 50 - 1000$  нм.

На рис.1 представлена трехмерная поверхность  $E_{гy}(K_{г}, h_{nл})$ . Используя программу MathCAD нами получены частные сечения этой поверхности – кривые  $E_{гy}(K_{г}) \Big|_{h_{nл} = var}$  и

$$E_{гy}(h_{nл}) \Big|_{\theta = var}$$

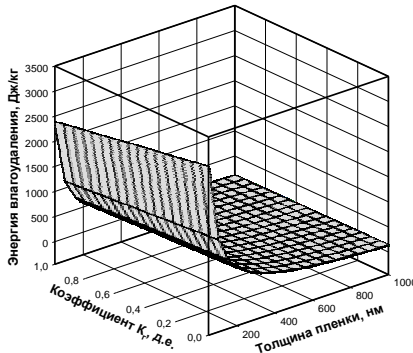


Рис.1 Трехмерная поверхность  $E_{гy}(K_{г}, h_{nл})$

Как видно из рис.2, гидрофобно-гидрофильный баланс угольной поверхности влияет на  $E_{гy}$  только в области малых значений  $h_{nл}$  ( до 50 –100 нм). При больших значениях  $h_{nл}$  энергия  $E_{гy}$  практически не изменяется, так как в “толстых” гидратных пленках практически не ощущается энергетическое воздействие твердой поверхности.

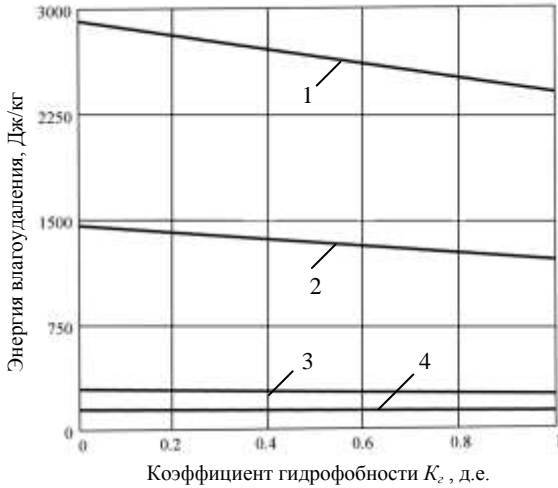


Рис.2 Зависимость энергии влагуудаления от гидрофобно-гидрофильного баланса угольной поверхности ( $K_2$ ) при различной толщине водной пленки:

1- 50 нм ; 2- 100 нм; 3 – 500 нм; 4 – 1000 нм.

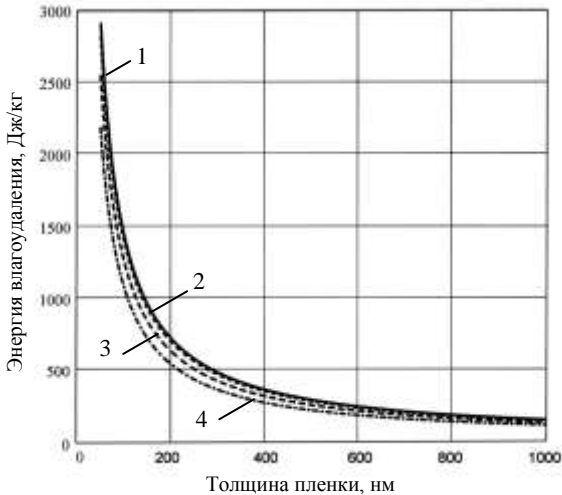


Рис.3 Зависимость энергии влагуудаления от толщины водной пленки  $h_{nl}$  при различном краевом угле смачивания  $\theta$ :

1 -  $0^\circ$ ; 2 -  $30^\circ$ ; 3 -  $60^\circ$ ; 4 -  $90^\circ$ .

Кривая  $E_{w}(h_{nl})$  имеет характерную гиперболическую форму с перегибом в области  $h_{nl} = 100-200$  нм (см.рис.3). При этом влияние краевого угла

смачивания незначительно.

Резкое увеличение необходимой энергии влагоудаления при  $h_{пл}$  менее 100 – 200 нм существенно затрудняет процесс механического обезвоживания. Поэтому область перегиба кривой  $E_{ув}(h_{пл})$  можно считать в определенном смысле критической.

В таблице приведены предельные расчетные значения влажности углей различных классов крупности при механическом обезвоживании.

Таблица

Класс крупности, мм	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Предельная влажность, %		
		$h_{пл}^{ксп} = 100$ нм	$h_{пл}^{ксп} = 150$ нм	$h_{пл}^{ксп} = 200$ нм
2,0 – 1,0	339,4	0,34	0,51	0,68
1,0 – 0,5	373,9	0,38	0,57	0,76
0,5 – 0,3	624,7	0,63	0,95	1,26
0,3 – 0,2	668,1	0,67	1,01	1,34
0,2 – 0,1	941,7	0,94	1,41	1,88
0,1 – 0	13036,2	13,0	19,5	26,0

Не трудно видеть, что “критическая” толщина  $h_{пл}$  из уравнения (7) близка к толщине пленки влаги, соответствующей ММВ, а влажность, соответствующая ММВ для углей крупностью менее 0,1 мм (10,8-28,5%), близка к расчетной (13,0-26,0 %).

Таким образом, изложенная энергетическая гипотеза может рассматриваться как теоретическая интерпретация ММВ. Рациональные пределы влажности при механическом обезвоживании мелкодисперсных материалов определяются областью перегиба кривой “энергия влагоудаления - толщина водной пленки” и соответствуют максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ).

#### Список литературы

1. Бейлин М.И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей.-М.: Недра, 1969.-240 с.
2. Руденко К.Г., Шемаханов М.М. Обезвоживание и пылеулавливание.-М.: Недра,1981.-352 с.
3. Бочков Ю.Н., Зарубин Л.С. Оценка эффективности механических способов обезвоживания угольной мелочи // Теория и практика обезвоживания угольной мелочи. -М.: Наука, 1966.- С. 5-20.
4. Интенсификация процессов обезвоживания.- М.: Недра, 1982.- 224 с.
5. Сергеев П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугілля.- Донецьк: УК-Центр,1999.-136 с.
6. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. Вода в дисперсных системах.-М.: Химия, 1989.- 288 с.

7. **Скибенко В.Н.** Аэромеханическое обезвоживание мелкодисперсного угля // Научн. труды Донецкого государственного техн. университета, выпуск 27.- Донецк: ДонДТУ.- 2001.- С. 109-113.

8. **Гаркушин Ю.К.** Энергетическая гипотеза процесса обезвоживания тонкодисперсного угля // Научн. труды Донецкого государственного техн. университета, выпуск 27.- Донецк: ДонДТУ.- 2001.-С. 353-358.

*Надійшла до редколегії xx.xx.xx*